



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Gustavo de Aguiar Isaia

**CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE FILER CALCÁRIO EM
MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS COM CINZA VOLANTE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA, MICROESTRUTURA E
SUSTENTABILIDADE**

Santa Maria, RS
2021

Gustavo de Aguiar Isaia

**CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE FILER CALCÁRIO EM
MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS COM CINZA VOLANTE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA, MICROESTRUTURA E
SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Rizzatti

Santa Maria, RS
2021

Isaia, Gustavo de Aguiar

Concretos com altos teores de fíler calcário em misturas binárias e ternárias com cinza volante: resistência à compressão mecânica, microestrutura e sustentabilidade / Gustavo de Aguiar Isaia.- 2021.

394 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Rizzatti

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2021

1. Concreto 2. Fíler calcário 3. Adições minerais 4. Microestrutura. Carbonatação 5. Emissão CO2. ACV e CCV I. Rizzatti, Eduardo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a **Gustavo de Aguiar Isaia**. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: gustavoaisaia@gmail.com

Declaro, GUSTAVO DE AGUIAR ISAIA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Gustavo de Aguiar Isaia

**CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE FILER CALCÁRIO EM
MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS COM CINZA VOLANTE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA, MICROESTRUTURA E
SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Civil**.

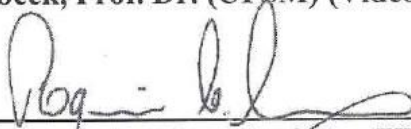
Aprovado em 19 de Agosto de 2021:



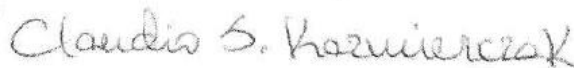
Eduardo Rizzatti, Prof. Dr. (UFSM) (Vídeoconferência)
(Presidente/Orientador)



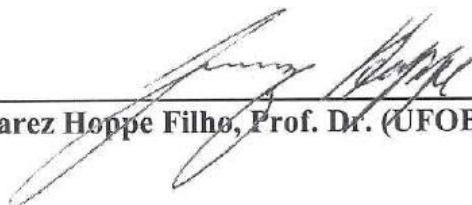
Andre Lübeck, Prof. Dr. (UFSM) (Vídeoconferência)



Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Prof. Dr. (UFSM) (Vídeoconferência)



Claudio de Souza Kazmierczak, Prof. Dr. (UNISINOS) (Vídeoconferência)



Juarez Hoppe Filho, Prof. Dr. (UFOB) (Vídeoconferência)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS



É chegada a hora de agradecer, tarefa difícil em uma caminhada onde muitas pessoas contribuíram para que este sonho acalentado, a tanto tempo, pudesse se concretizar. Um agradecimento inicial a todos aqueles que de maneira direta e/ou indireta contribuíram para a realização desta tese de doutorado. Neste sentido várias pessoas e instituições estiveram envolvidas ao longo do processo e merecidamente recebem o devido reconhecimento. Assim gostaria de registrar meu profundo agradecimento de maneira especial:

- Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela força dada nos momentos em que pensei que não conseguiria, por Ele ter permitido chegar ao fim desta jornada.
- Agradeço a minha querida Mãe, Professora, Doutora que tanto me ajudou nesta caminhada, pelos seus conselhos, ensinamentos e, acima de tudo, por seu amor incondicional, obrigado Mãe!
- Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Eduardo Rizzatti pela confiança depositada em mim e pelo apoio dado durante a execução da tese, meu muito obrigado.
- Agradeço a querida amiga e companheira de jornada Silvane pela ajuda dada em todos os momentos, sua colaboração foi essencial e merece todo o meu reconhecimento.
- Agradeço a todos os professores, colegas do curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSM pela acolhida e viabilização da obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- Agradeço a todos os bolsistas, alunos colaboradores, funcionários da UFSM em especial a Luciane secretária do PPGEC pela ajuda na resolução dos inúmeros questionamentos feitos durante esta jornada.
- Agradeço ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) pela disponibilização do espaço e equipamentos para realização da parte experimental da pesquisa, bem como a sua direção e funcionários pela ajuda.
- Agradeço a UFSM por ter permitido minha especialização, mestrado e doutorado. É motivo de grande orgulho ter estudado nessa magnífica instituição.

DEDICATÓRIA

Ao consultar o dicionário sobre o significado da palavra dedicação deparei-me com uma descrição extremamente pequena, porém gigantesca em relação ao seu significado. No dicionário a palavra dedicação significa manifestação de amor. Nada poderia expressar mais meu sentimento, nesta dedicatória, que o imenso amor que sinto por estas duas pessoas a quem dedico esta tese de doutorado.

A minha amada esposa Priscila sem seu amor, apoio, dedicação, paciência e compreensão não teria conseguido realizar este trabalho que não é para mim, mas sim para nós. Sabes, melhor do que ninguém, os inúmeros momentos difíceis pelos quais passei durante esta jornada e, em todos eles, sua mão sempre esteve estendida para me resgatar. Seu amor incondicional ao longo deste caminho me fez perceber o quão importante foi seu papel. Se a autoria intelectual do trabalho é dada a mim, com certeza a autoria emocional é sua, pois fostes, és, e sempre serás minha rocha.

Meu primeiro impulso ao escrever a dedicatória para a segunda pessoa foi reler aquela que fiz por ocasião da dissertação de mestrado, pois o amor e o reconhecimento são os mesmos. Contudo, neste caso há um segundo aspecto envolvido que pode ser descrito como autoria inspiradora desta tese, ou seja, o responsável que incitou a capacidade de criação, o qual proporcionou a alavanca dos conceitos, ideias, teorias, ensaios e demais aspectos teóricos e práticos para que pudessem ser congregados de forma a conceber um documento ligado a minha origem, a minha história em suma, com minha fonte de inspiração.

O autor-inspirador desta tese está comigo desde sempre, tendo sido o responsável pela minha profissão, minha graduação, minha especialização, meu mestrado, por ser professor universitário, enfim por tudo aquilo que se relaciona à Engenharia Civil. Ele pode ser uma pessoa reservada, discreta, um verdadeiro exemplo de profissional a ser seguido, tudo isto é verdade, no entanto, para mim é, muito mais, é aquele a quem dedico esta tese, pois sem sua inspiração não teria conseguido. Muitos agradeceriam ao Professor Doutor Engenheiro Civil Geraldo Cechella Isaia, como li em inúmeras dissertações de mestrado e teses de doutorado, no entanto eu agradeço dizendo simplesmente obrigado Pai.

RESUMO

CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE FILER CALCÁRIO EM MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS COM CINZA VOLANTE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA, MICROESTRUTURA E SUSTENTABILIDADE

AUTOR: Gustavo de Aguiar Isaia

ORIENTADOR: Eduardo Rizzatti

A indústria cimenteira produz cerca de 5% de todas as emissões de CO₂ que contribuem para os gases do efeito estufa, que representa um número significativo frente à grandeza mundial da sua produção, com os respectivos efeitos do uso de recursos naturais e do aumento da temperatura da terra. Quanto maiores os teores de adições minerais (AM) ao cimento Portland (CP), menores serão os teores de clínquer, tornando o CP mais sustentável pelo menor consumo de recursos e de energia. Entre as AM inertes uma muito empregada nas fábricas de cimento são os Fileres Calcários (FC) moídos juntamente com o clínquer, porque são encontrados em quase todos os lugares do mundo. Pesquisas atuais direcionam para o aumento do uso de FC em substituição ao CP em teores maiores que os previstos em normas, inclusive em misturas ternárias com pozolanas, com o intuito de se obter concretos mais resistentes, sustentáveis e de custo unitário mais barato, sem perda de suas características de durabilidade. Esta tese teve por objetivo a utilização de altos teores de substituição de CP (50 a 80%), em misturas binárias, ternárias e quaternária de AM (FC e Cinza Volante - CV) e adição de Cal Hidratada (CH), com estudo da vida útil provável, através da carbonatação e sustentabilidade por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e do Custo do Ciclo de Vida (CCV). Foi possível observar as mudanças ocorridas nos traços de concreto por ocasião da variação do teor de CP, FC, CV e CH e suas implicações na resistência à compressão, carbonatação, formação de compostos carbonatados, teores de água combinada, Portlandita e Carbonatos, bem como os reflexos destas mudanças nos parâmetros de sustentabilidade (ACV e CCV). Neste sentido foi possível verificar a viabilidade da elaboração de concretos através do emprego de aditivo hiperplastificante que permitiu a redução do teor a/ag (0,25), juntamente com a otimização do empacotamento de partículas, resultando em uma trabalhabilidade de 100+20 mm e resistências à compressão variando entre 51,8 e 88,6 MPa aos 91 dias de idade. Destacaram-se os traços FC50 e FC60CH10 com resistências à compressão (aos 91 dias) e coeficiente de carbonatação de 87,8/88,6 MPa e 0,22/0,34 mm.t^{-0,5}, respectivamente. Outro traço que mereceu destaque foi o FC70CV10P, com somente 20% de CP e um consumo de 87 kg.m⁻³ e 104 L.m⁻³ de clínquer e água, respectivamente, obteve uma resistência à compressão, aos 91 dias, de 51,8 MPa, bem como um coeficiente de carbonatação (kc) de 0,27 mm.t^{-0,5}, conduzindo a uma vida útil 55 vezes superior à máxima utilizada neste estudo (100 anos). Em relação a vida útil constatou-se que, à exceção dos traços FC70CV10 e FC70CV10CH10, todos os demais apresentaram uma vida útil superior a 100 anos levando os traços FC50, FC60 e FC60CH10 a primeira colocação em relação a ACV e CCV.

Palavras-chave: Concreto. Filer calcário. Adições minerais. Microestrutura. Carbonatação. Emissão CO₂. ACV e CCV.

ABSTRACT

CONCRETE WITH HIGH LIMESTONE FILER CONTENT IN BINARY AND TERNARY MIXTURES WITH FLY ASH: RESISTANCE TO MECHANICAL COMPRESSION, MICROSTRUCTURE AND SUSTAINABILITY

AUTHOR: GUSTAVO DE AGUIAR ISAIA

ADVISOR: EDUARDO RIZZATTI

The cement industry produces about 5% of all CO₂ emissions that contribute to greenhouse gases, which represents a significant number compared to the worldwide magnitude of its production, with the respective effects of the use of natural resources and the increase in temperature from the earth. The higher the contents of mineral additions (MA) to Portland cement (PC), the lower the clinker contents, making the PC more sustainable due to the lower consumption of resources and energy. Among inert MA, the most used in cement factories are limestone fillers (LF) ground together with clinker, as they are found almost everywhere in the world. Current research points to the increase in the use of LF to replace PC at levels greater than those provided for in standards, including in ternary mixtures with pozzolans, in order to obtain more resistant, sustainable concretes with a cheaper unit cost, without loss of its durability characteristics. This thesis aims to use high levels of PC substitution (50 to 80%) in binary, ternary and quaternary mixtures of MA (LF and Fly Ash - FA) and addition of Hydrated Lime (HL), with the study of probable useful life, through carbonation and sustainability through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC). It was possible to observe the changes that occurred in the concrete mixes due to the variation in the PC, LF, FA and HL content and its implications on compressive strength, carbonation, formation of carbonated compounds, combined water, Portlandite and carbonate contents, as well as the consequences of these changes in the sustainability parameters (LCA and LCC). In this sense, it was possible to verify the feasibility of preparing concrete through the use of a hyperplasticizer additive that allowed the reduction of the w/b content (0.25), together with the optimization of particle packing, resulting in a workability of 100+20 mm and compressive strengths ranging from 51.8 to 88.6 MPa at 91 days of age. The highlights are the mixtures FC50 and FC60CH10 with compressive strength (at 91 days) and carbonation coefficient (kc) of 87.8/88.6 MPa and 0.22/0.34 mm.t^{-0.5}, respectively. Another trait worth mentioning is FC70CV10P, with only 20% PC and a consumption of 87 kg.m⁻³ and 104 L.m⁻³ of clinker and water, respectively, obtained a compressive strength, at 91 days, of 51, 8 MPa, as well as a carbonation coefficient (kc) of 0.27 mm.t^{-0.5}, leading to a service life 55 times longer than the maximum used in this study (100 years). Regarding the useful life, it was found that, with the exception of the FC70CV10 and FC70CV10CH10 traits, all the others had a useful life greater than 100 years, taking the FC50, FC60 and FC60CH10 traits to the first position in relation to LCA and LCC.

Keywords: Concrete. Limestone filer. Mineral additions. Microstructure. Carbonation. CO₂ Emission. LCA and LCC.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Ciclo do Carbonato Silicato - simplificação	50
Figura 2.2	a) evolução histórica da concentração dos GEE; b) aquecimento global ocorrido no último século e 3 diferentes estimativas para sua evolução no século XXI – cenários A2, A1B e B1	51
Figura 2.3	Índice de desenvolvimento humano e a pegada ecológica	54
Figura 2.4	Medida das emissões de $\text{CO}_2 \cdot \text{ton}^{-1}$ de clínquer: a) divididas por forno e ano; b) média mundial	56
Figura 2.5	Opções para a redução de CO_2 na indústria cimenteira	57
Figura 2.6	a) histórico de produção de CP mundial e estiva de evolução até 2050, b) estimativa de emissões de GEE da produção de CP – 1990 a 2050	58

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Esquema da distribuição de partículas de um sistema contendo 100% de CP (<i>a</i>) e o sistema com 40% do CP substituído por uma AM (<i>b</i>)	69
Figura 3.2	Representação esquemática da hipótese sobre a majoração da hidratação do CP nas primeiras idades: (<i>esq.</i>) com AM inerte; (<i>dir.</i>) sem AM inerte	69
Figura 3.3	Hidratos formados devido à nucleação heterogênea	70
Figura 3.4	Sistema das fases hidratadas no subsistema ternário de $\text{CaSO}_4\text{-C}_3\text{A-CaCO}_3$	72
Figura 3.5	Formação de compostos pela hidratação de CP com e sem substituição de FC	73
Figura 3.6	Difratometria de raios-X para avaliação dos compostos formados a partir da hidratação de CP com e sem substituição de FC	74
Figura 3.7	Demanda de água e configuração de pastas de CP com FC	77
Figura 3.8	Efeito do FC na hidratação do CP	79
Figura 3.9	Efeito do FC na resistência à compressão	80
Figura 3.10	Efeito da substituição de CP por 15% a 45% de FC na resistência à compressão	81
Figura 3.11	Ciclo da Cal	89
Figura 3.12	Profundidade da carbonatação como função da resistência à compressão para o concreto produzido com CPs com níveis variáveis de FC	102
Figura 3.13	Influência do teor de FC na carbonatação do concreto para o mesmo fator <i>a/ag.</i> a) Carbonatação natural. b) Carbonatação acelerada	103
Figura 3.14	Mínima porosidade calculada pelo modelo de Andreassen modificado em função do módulo de distribuição, grão mínimo de $0,17 \mu\text{m}$ e grão máximo de 16 mm	114
Figura 3.15	Esquematização da estrutura de um concreto com os parâmetros de separação entre partículas (<i>IPS/MPT/ITZ</i>)	115

Figura 3.16	Representação esquemática do modelo IPS. O volume da fase líquida (<i>água em materiais base de CP</i>) aumenta da esquerda para a direita	116
Figura 3.17	Exemplo de curvas de distribuição granulométrica do programa EMMA, em vermelho, a curva padrão, em azul, curva a ser ajustada	118
Figura 3.18	Ciclo de vida na construção civil	119
Figura 3.19	CCV x custo de construção e manutenção	128
Figura 3.20	Traçado dos custos no ciclo de vida	129

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Distribuição granulométrica dos aglomerantes e AM	137
Figura 4.2	Micrografia dos grãos de CPV-ARI (<i>esquerda</i>) e CH (<i>direita</i>)	141
Figura 4.3	Micrografia dos grãos de CV (<i>esquerda</i>) e FC (<i>direita</i>)	142
Figura 4.4	Difratograma do CPV-ARI	144
Figura 4.5	Difratograma da CV	145
Figura 4.6	Difratograma do FC	145
Figura 4.7	Difratograma da CH	146
Figura 4.8	Curva termogravimétrica do CPV-ARI	147
Figura 4.9	Curva termogravimétrica da CH	148
Figura 4.10	Curva termogravimétrica do FC	148
Figura 4.11	Distribuição granulométrica da brita 0	150
Figura 4.12	Distribuição granulométrica da areia fina	150
Figura 4.13	Distribuição granulométrica da areia média	151
Figura 4.14	Compatibilidade entre o CPV-ARI e o hiperplastificante Master Glenium 54	153
Figura 4.15	Distribuição do diâmetro de partículas no programa EMMA – FC50	154
Figura 4.16	Relação aglomerante x aditivo ($m^2.L^{-1}.10^4$)	159
Figura 4.17	Teor de FC x teor relativo de aditivo	159
Figura 4.18	Intensidade de ligante (<i>IL</i>) versus a resistência à compressão aos 28 dias para dados internacionais, brasileiros e de mercado. As linhas representam concretos com o mesmo teor total de ligantes, em $kg.m^{-3}$	162
Figura 4.19	Etapas e prazos de pré-condicionamento	167
Figura 4.20	Representação esquemática das camadas CS e CN dos corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada	168
Figura 4.21	Profundidade de carbonatação acelerada do FC70CV10CH10 com 6 semanas	171
Figura 4.22	Diagrama da sustentabilidade e metodologias utilizadas	178
Figura 4.23	Unidade funcional MCC: fluxos e fronteiras	181
Figura 4.24	Unidade funcional PEC: fluxos e fronteiras	191

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Teor de FC x resistência à compressão aos 28 dias	198
Figura 5.2	Teor de FC x resistência à compressão aos 91 dias	201
Figura 5.3	Intensidade de ligante x resistência à compressão (<i>comparativo</i>)	209

Figura 5.4	Profundidade carbonatada x tempo em semanas (REF/FC50/FC60/FC70CV10)	217
Figura 5.5	Profundidade carbonatada x tempo em semanas (FC60P/FC60CH10/FC70CV10P/FC70CV10CH10)	217
Figura 5.6	Percentual total da profundidade carbonatada em 3 semanas x teor de FC	228
Figura 5.7	Profundidades de carbonatação acelerada e linhas de tendência (REF/FC50/FC60/FC70CV10)	230
Figura 5.8	Profundidades de carbonatação acelerada e linhas de tendência (FC6P/FC60CH10/FC70CV10P/FC70CV10CH10)	230
Figura 5.9	Coefficiente de carbonatação (k_c) x o consumo de CP e CH	231
Figura 5.10	Difratograma da camada CN traço REF	237
Figura 5.11	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC50	239
Figura 5.12	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC60	243
Figura 5.13	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC60CH10	245
Figura 5.14	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10	246
Figura 5.15	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10P	248
Figura 5.16	Difratograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10CH10	250
Figura 5.17	TG/DTG para o traço FC50-CN	259

CAPÍTULO 6

Figura 6.1	Eco indicador 99 (MCC)	271
Figura 6.2	Saúde humana e recursos x teor de FC (MCC)	272
Figura 6.3	Eco-indicador 99 x teor de FC (MCC)	272
Figura 6.4	Mudanças climáticas x teor de FC (MCC)	273
Figura 6.5	Uso de recursos naturais x teor de FC (MCC)	274
Figura 6.6	Consumo de energia x teor de FC (MCC)	275
Figura 6.7	Geração de resíduos x teor de FC (MCC)	276
Figura 6.8	Consumo de água (MCC)	277
Figura 6.9	Emissão de CO _{2eq} x teor de FC (MCC)	279
Figura 6.10	IC x resistência à compressão (MCC)	281
Figura 6.11	Formação de material particulado x teor de FC (MCC)	282
Figura 6.12	Esgotamento fóssil x teor de FC (MCC)	283
Figura 6.13	Custo do MCC	285
Figura 6.14	Custo do MCC, CP e aditivo x teor de FC	286
Figura 6.15	Sistema binário ACV e CCV para indicadores de sustentabilidade	290
Figura 6.16	Indicador global de sustentabilidade x teor de FC (MCC)	291
Figura 6.17	Indicador global de sustentabilidade – gráfico tipo “radar” (MCC)	292
Figura 6.18	Plano de ecoeficiência (MCC)	292
Figura 6.19	Eco indicador 99 (PEC)	294
Figura 6.20	Eco indicador 99 x teor de FC (PEC)	295
Figura 6.21	Mudanças climáticas x teor de FC (PEC)	296
Figura 6.22	Uso de recursos naturais x teor de FC (PEC)	297
Figura 6.23	Consumo de energia x teor de FC (PEC)	298
Figura 6.24	Geração de resíduos x teor de FC (PEC)	298
Figura 6.25	Consumo de água x teor de FC (PEC)	299
Figura 6.26	Emissão de CO _{2eq} x teor de FC (PEC)	301
Figura 6.27	Emissão de CO _{2eq} x volume de concreto (PEC)	301
Figura 6.28	Formação de material particulado x teor de FC (PEC)	302
Figura 6.29	Formação de material particulado x volume de concreto (PEC)	303

Figura 6.30	Esgotamento fóssil x teor de FC (<i>PEC</i>)	304
Figura 6.31	Custos do PEC x teor de FC (<i>PEC</i>)	307
Figura 6.32	Indicador global de sustentabilidade – gráfico tipo “ <i>radar</i> ” (<i>PEC</i>)	314
Figura 6.33	Plano de ecoeficiência (<i>PEC</i>)	315
Figura 6.34	Valores unitários da I_{cq} , IL, emissão de CO_{2eq} e média geométrica	318

APÊNDICE A

Figura APA.1	Planta baixa do térreo do edifício e posição do pilar analisado	363
Figura APA.2	Dimensionamento do pilar para o traço REF	364
Figura APA.3	Dimensionamento do pilar para o traço FC50	364
Figura APA.4	Dimensionamento do pilar para o traço FC60 e FC60P	365
Figura APA.5	Dimensionamento do pilar para o traço FC60CH10	365
Figura APA.6	Dimensionamento do pilar para o traço FC70CV10P	366

APÊNDICE D

Figura APD.1	Curva de empacotamento para a mistura REF	381
Figura APD.2	Curva de empacotamento para a mistura FC60e FC60P	381
Figura APD.3	Curva de empacotamento para a mistura FC60CH10	382
Figura APD.4	Curva de empacotamento para a mistura FC70CV10 e FC70CV10P	382
Figura APD.5	Curva de empacotamento para a mistura FC70CV10CH10	383

APÊNDICE E

Figura APE.1	TG/DTG para o traço REF-CN	384
Figura APE.2	TG/DTG para o traço FC50-CN	384
Figura APE.3	TG/DTG para o traço FC50-CS	385
Figura APE.4	TG/DTG para o traço FC60-CN	385
Figura APE.5	TG/DTG para o traço FC60-CS	386
Figura APE.6	TG/DTG para o traço FC70CV10-CN	386
Figura APE.7	TG/DTG para o traço FC70CV10-CS	387
Figura APE.8	TG/DTG para o traço FC60P-CN	387
Figura APE.9	TG/DTG para o traço FC60CH10-CN	388
Figura APE.10	TG/DTG para o traço FC60CH10-CS	388
Figura APE.11	TG/DTG para o traço FC70CV10P-CN	389
Figura APE.12	TG/DTG para o traço FC70CV10P-CS	389
Figura APE.13	TG/DTG para o traço FC70CV10CH10-CN	390
Figura APE.14	TG/DTG para o traço FC70CV10CH10-CS	390

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1	Potencial de aquecimento global dos GEE's	52
Tabela 2.2	Variações das emissões de CO ₂ , relacionadas à produção de clínquer	55
Tabela 2.3	Emissões de CO ₂ por tonelada de clínquer	57

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1	Diferenças entre ACV e CCV	120
------------	----------------------------	-----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Siglas adotadas para os traços estudados	134
Tabela 4.2	Especificação das bolas metálicas do moinho	136
Tabela 4.3	Tamanho das partículas do CP, FC, CV e CH	137
Tabela 4.4	Composição química dos aglomerantes	139
Tabela 4.5	Caracterização física dos aglomerantes	141
Tabela 4.6	Caracterização por análise termodiferencial e termogravimétrica do CP	146
Tabela 4.7	Perdas de massa e teores de Portlandita e FC no CP	146
Tabela 4.8	Características físicas dos agregados	149
Tabela 4.9	Características físicas e químicas do aditivo hiperplastificante	152
Tabela 4.10	Parâmetros utilizados para a convergência entre as curvas do programa EMMA	156
Tabela 4.11	Consumo de materiais em kg por m ³ , aditivo em L.m ⁻³	157
Tabela 4.12	Relação aglomerante x aditivo ($m^2.L^{-1}.10^4$)	158
Tabela 4.13	Nomenclatura dos traços frente à carbonatação acelerada	168
Tabela 4.14	Equipamentos e consumo para extração de agregado graúdo (MCC)	184
Tabela 4.15	Massa molar do explosivo tipo "Slurry" e dos produtos da reação (MCC)	185
Tabela 4.16	Substâncias químicas relacionadas a 1g de explosivo (MCC)	185
Tabela 4.17	Insumos para obtenção de 1 tonelada de brita 0 (MCC)	186
Tabela 4.18	Dados de mineração da jazida de Calcário (MCC)	186
Tabela 4.19	Massa molares de TNT e dos produtos da reação química (MCC)	187
Tabela 4.20	Emissões relacionadas a 1 kg de explosivo TNT (MCC)	187
Tabela 4.21	Resumo dos dados de fabricação do CPV-ARI até a clinquerização (MCC)	188
Tabela 4.22	Consumo total de energia do CPV-ARI (MCC)	188
Tabela 4.23	Fatores de emissão de óleo Diesel (CONAMA 315/2002) (MCC)	190
Tabela 4.24	Emissões relacionadas a 1 L de Diesel (MCC)	190
Tabela 4.25	Esforços solicitantes e definições de projeto (PEC)	192
Tabela 4.26	Dimensionamento dos PEC	193

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1	Resistência à compressão axial dos cps aos 28 e 91 dias	198
Tabela 5.2	Evolução (%) da resistência à compressão aos 28 e 91 dias	205
Tabela 5.3	Intensidade de clínquer (I_{cq}) aos 28 e 91 dias	206
Tabela 5.4	Determinação da IL conforme metodologia de Damineli (2013)	209

Tabela 5.5	Resistência à compressão unitária ($f_{c_{unit}}$) aos 28 e 91 dias	212
Tabela 5.6	ANOVA análise estatística integrada da resistência à compressão aos 28 dias	215
Tabela 5.7	ANOVA análise estatística integrada da resistência à compressão aos 91 dias	215
Tabela 5.8	Profundidade média de carbonatação acelerada	216
Tabela 5.9	Profundidade carbonatada FC50	219
Tabela 5.10	Profundidade carbonatada FC60	221
Tabela 5.11	Profundidade carbonatada FC70CV10	222
Tabela 5.12	Profundidade carbonatada FC60CH10	224
Tabela 5.13	Profundidade carbonatada FC70CV10P	225
Tabela 5.14	Profundidade carbonatada FC70CV10CH10	226
Tabela 5.15	Coefficientes de carbonatação (kc) e determinação (R^2) dos traços estudados	231
Tabela 5.16	Estimativa da vida útil dos traços estudados com um cobrimento de 20 mm	233
Tabela 5.17	Resultados da DRX da camada CN do traço REF	237
Tabela 5.18	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC50	240
Tabela 5.19	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC60	243
Tabela 5.20	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC60CH10	245
Tabela 5.21	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10	247
Tabela 5.22	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10P	249
Tabela 5.23	Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10CH10	251
Tabela 5.24	Características dos traços estudados quanto a CS	252
Tabela 5.25	Características dos traços estudados quanto a CN	256
Tabela 5.26	Teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada na camada CN	260
Tabela 5.27	Teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada na camada CS	260

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1	Gases e fatores de equivalência (MCC)	278
Tabela 6.2	Determinação da IC conforme metodologia de Damineli (2013) (MCC)	280
Tabela 6.3	Análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais (MCC)	284
Tabela 6.4	ANOVA para o custo do MCC	287
Tabela 6.5	Composição do índice de impacto ambiental (MCC)	288
Tabela 6.6	Composição do índice de custo (MCC)	289
Tabela 6.7	Indicador global de sustentabilidade (MCC)	291
Tabela 6.8	Dióxido de Carbono equivalente (PEC)	300
Tabela 6.9	Análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais (PEC)	305
Tabela 6.10	Custos de cada fase do PEC	307
Tabela 6.11	Similaridades entre os traços FC50 e FC60CH10	309
Tabela 6.12	Composição do índice de impacto ambiental (PEC)	311
Tabela 6.13	Composição do índice de custo (PEC)	311
Tabela 6.14	Indicador global de sustentabilidade (PEC)	312

Tabela 6.15	Similaridade entre diversos parâmetros nos traços FC50 e FC60CH10	313
Tabela 6.16	Valores unitários da I_{cq} , IL, Emissão de CO_{2eq} e M.G.	317

APÊNDICE B

Tabela APB.1	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - REF	367
Tabela APB.2	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC50	367
Tabela APB.3	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC60	367
Tabela APB.4	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC60P	368
Tabela APB.5	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC60CH10	368
Tabela APB.6	Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC70CV10P	368
Tabela APB.7	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - REF	369
Tabela APB.8	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto – FC50	369
Tabela APB.9	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto – FC60	369
Tabela APB.10	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto – FC60CH10	370
Tabela APB.11	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto – FC70CV10	370
Tabela APB.12	Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC70CV10CH10	370
Tabela APB.13	Dados de entrada SimaPro consumo de Diesel e energia elétrica	371

APÊNDICE C

Tabela APC.1	Encargos sociais – RS (<i>SINAPI – cálculos e parâmetros</i>)	372
Tabela APC.2	Composição da fôrma para pilares com madeira compensada 12 mm	373
Tabela APC.3	Composição de custos do pilar REF	373
Tabela APC.4	Composição de custos do pilar FC50	374
Tabela APC.5	Composição de custos do pilar FC60 e FC60P	374
Tabela APC.6	Composição de custos do pilar FC60CH10	375
Tabela APC.7	Composição de custos do pilar FC70CV10P	375
Tabela APC.8	Composição de custos da limpeza do pilar	376
Tabela APC.9	Composição de custos da demolição com martelo rompedor do pilar	376
Tabela APC.10	Composição de custos para carga mecanizada do entulho do pilar	376
Tabela APC.11	Composição de custos transporte caminhão basculante	377
Tabela APC.12	Composição de custos manejo do RCD	377
Tabela APC.13	Composição de custos pintura acrílica	377
Tabela APC.14	Composição de custo de um metro cúbico de concreto REF	378
Tabela APC.15	Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC50	378
Tabela APC.16	Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC60	379
Tabela APC.17	Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC60CH10	379
Tabela APC.18	Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC70CV10	380
Tabela APC.19	Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC70CV10CH10	380

ANEXO A

Tabela ANA.1	Inventário de emissões (<i>MCC</i>)	393
Tabela ANA.2	Inventário de emissões (<i>PEC</i>)	394

LISTA DE ABREVIATURAS

μm	Micrômetro
A	Área de concreto exposta
a	Coefficiente angular da reta de ajuste
Å	Angstrom
a/ag	Fator água x aglomerante
a/c	Fator água x cimento
acc	Ensaio de carbonatação acelerado
AFm	Monosulfoaluminato
ag	Aglomerante
ago.	Agosto
aq	Aquoso
b	Consumo total de material cimentício ou ponto em que as retas cruzam o eixo y
C	Quantidade de clínquer no aglomerante
c	Emissão de Dióxido de Carbono equivalente
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
Co	Propriedades constantes do concreto no ensaio de carbonatação
cp	Corpo de prova
CPFT	Percentual acumulado de finos menor que “d” em volume
D	Maior tamanho de partícula da distribuição ou difusividade do gás
d	Tamanho da partícula
dez.	Dezembro
dm	Menor tamanho de partícula da distribuição
dm^3	Decímetro cúbico
Dmáx	Diâmetro máximo
DS	Menor diâmetro
e	Profundidade de carbonatação em mm ou vazios
env	Ensaio de carbonatação natural
et al.	E outros
F	Parâmetro de Fisher
f_{c28}	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade
fck	Resistência característica
F_{critico}	Parâmetro de escala
$f_{c\text{unit}}$	Resistência à compressão unitária
fev.	Fevereiro
g	Grama
GJ	Giga joule
GL	Graus de liberdade
h	Hora
hab	Habitante
hp	Cavalo vapor
Ia	Índice de impacto ambiental
Ic	Índice de custo
I_{cq}	Intensidade de clínquer
Id	Índice de durabilidade
IL	Intensidade de ligante
Is	Indicador global de sustentabilidade

jan.	Janeiro
jul.	Julho
k	Coeficiente de reatividade
kc	Coeficiente de carbonatação
kcal	Quilo caloria
kCO ₂	Coeficiente de carbonatação expresso em mm.ano ^{-0,5}
kg	Quilograma
kgCO ₂ eq	Quilogramas de Dióxido de Carbono equivalente
kg _{clq}	Quilogramas de clínquer
kg _{eq}	Quilograma equivalente
kgMP10eq	Quilogramas de material particulado equivalente
kg _{oleq}	Quilogramas de óleo equivalente
km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
kN.m	Quilo Newton metro
kv	Quilo volt
KVA	Quilovoltampere
kw	Quilo watt
kWh	Quilo watt hora
L	Litros
l	Consumo de materiais ligantes
lc	Consumo total de clínquer
M	Fração molar química adimensional
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mA	Mili amper
mar.	Março
m _{eq} ³	Metro cúbico equivalente
mg	Miligrama
min	Minuto
MJ	Mega joule
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mol	Massa molecular
MPa	Mega pascal
MQ	Média dos quadrados
MWh	Mega watts hora
Mxd	Momento fletor no eixo horizontal x da seção do pilar
Myd	Momento fletor no eixo vertical y da seção do pilar
n	Expoente variável dependente das condições de umidade
n.	Número
Nd	Esforço normal de cálculo
°C	Graus Célsius
p.	Página
PDF	Fração de potencial desaparecimento
pH	Potencial de hidrogênio
ppm	Parte por milhão
psi	Libra força por polegada quadrada
Pt	Um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu

q	Coeficiente de distribuição
R	Proporção de CaO totalmente carbonatada e transformada em CaCO ₃
R\$	Real
R ²	Coeficiente de determinação
rc	Requisito de desempenho
R _{comp}	Resistência à compressão aos 28 e/ou 91 dias
rpm	rotações por minuto
s	Segundo
set.	Setembro
SQ	Somatório dos quadrados
T	Temperatura
t	Tempo em anos
tf	Tonelada força
ton	Tonelada
ton _{eq}	Tonelada equivalente
un	Unidade
USD	Dólar americano
v.	Volume
Valor-P	Nível de significância
V _s	Volume de sólidos
V _t	Volume total
V _v	Volume de vazios
W	Watts
w.m ⁻²	Força radioativa
w/b	Fator água x aglomerante
w/c	Fator água x cimento
Wk	Medida de pré-hidratação do cimento Portland
x	Profundidade carbonatada em metros
nm	Nanomêtro

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABCV	Associação Brasileira do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano do Concreto
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-m	Avaliação do Ciclo de Vida Modular
ALCONPAT	Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade e Recuperação da Construção
AM	Adição Mineral
ANA	Anexo A
ANOVA	Análise de Variância
APA	APÊNDICE A
APB	APÊNDICE B
APC	APÊNDICE C
APD	APÊNDICE D
APE	APÊNDICE E
AR5	Quinto Informe de Avaliação
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	Sociedade Americana de Ensaios e Materiais
BASF	Fábrica de Anilina e Soda de Baden
BDI	Bonificação e Despesas Indiretas
BET	Brunauer, Emmett e Teller
CAA	Concreto Auto Adensável
CANMET	Centro Canadense de Tecnologia Mineral e Energética
CAR	Concreto de Alta Resistência
CBCS	Conselho Brasileiro da Construção Sustentável
CBECIMAT	Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
CBECIMAT	Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
CBPAT	Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CEFRACOR	Centro Frances Anticorrosão
CEM IV	Cimento Portland Composto com Cinza Volante
CH	Cal Hidratada
CH-I	Cal Pura
CH-II	Cal Intermediária
CH-III	Cal Impura
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CKD	Pó de Forno de Cimento
CN	Camada Não Carbonatada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONPAT	Congresso Latino Americano de Patologia das Construções
COP 21	21º Conferência do Clima em Paris
COP 22	22º Conferência do Clima em Ruanda e Marrakesh
CP	Cimento Portland
CP 32	Cimento Portland 32 MPa

CP40	Cimento Portland 40 MPa
CPI	Cimento Portland Tipo I
CPII	Cimento Portland Tipo II
CPIII	Cimento Portland de Alto Forno
CPIV	Cimento Portland Pozolânico
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CS	Camada Carbonatada
CSA	Associação de Normas Canadense
CSC	Capacidade de Estocagem de Carbono
CV	Cinza Volante
D.C.	Distrito de Colúmbia
DALY	Anos de Vida Ajustados por Incapacidade
DBIS	Departamento de Inovação e Competências Empresariais
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios-X
EAF	Escória de Alto Forno
EF	Esgotamento Fóssil
EM	Especificação de Material
EMMA	Analisador de Mistura de Materiais Elkem
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EU-ETS	Sistema Europeu de Comércio de Emissões
FA	Cinza Volante
FC	Filer Calcário
FC50	Traço com 50% de FC
FC60	Traço com 60% de FC
FC60CH10	Traço com 60% de FC e Adição de 10% de CH
FC60P	Traço com 60% de FC e Película de Proteção
FC70CV10	Traço com 70% de FC e 10% de CV
FC70CV10CH10	Traço com 70% de FC, 10% de CV e Adição de 10% de CH
FC70CV10P	Traço com 70% de FC, 10% de CV e Película de Proteção
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FGTS	Fundo de Garantia por Tempo de Serviço
FIB	Federação Internacional do Concreto
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FMP	Formação de Material Particulado
FTIR	Espectrometria por Transformada de Fourier
GABC	Aliança Global para Edifícios e Construção
GCCA	Associação Global de Cimento e Concreto
GEE	Gás de Efeito Estufa
GEN	Grupo Editorial Nacional
GEPECON	Grupo de Estudos e Pesquisas em Estruturas de Concreto
GGBS	Escória Granulada de Alto Forno
GNR	Aquisição de Números Corretos
HRB	Conselho de Pesquisa em Autoestradas
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IC	Intensidade de Dióxido de Carbono Equivalente
ICAL	Indústria de Calcinação
ICDD	Centro Internacional de Dados de Difração
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano

IEA	Agência Internacional de Energia
IL	Intensidade de Ligante
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INSS	Instituto Nacional de Seguridade Social
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudança Climática
IPS	Espaçamento Entre Partículas
ISO	Organização Internacional para Padronização
ITZ	Interface da Zona de Transição
LAPAM	Laboratório de Processos Ambientais
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida
LCC	Custo do Ciclo de Vida ou Concreto com Baixo Teor de Cimento
LEED	Liderança em Energia e Projeto Ambiental
LF	Filer Calcário
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LTC	Livros Técnicos Científicos
M.G.	Média Geométrica
M.O.	Mão de Obra
MA	Adição Mineral
MCC	Metro Cúbico de Concreto
MCFA	Contabilidade de Custo dos Fluxos de Materiais
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
MPT	Espessura Máxima de Pasta
NBR	Norma Brasileira
NEEBC	Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono
NM	Norma Mercosul
NRC	Conselho Nacional de Pesquisa
NRMCA	Associação Nacional de Concreto Usinado
ONU	Organização das Nações Unidas
OPC	Cimento Portland Comum
PC	Cimento Portland
PCD	Permeabilidade do Concreto como Critério de Durabilidade
PCE	Éteres de Policarboxilato
PEC	Pilar Estrutural de Concreto
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PF	Perda ao Fogo
PFA	Cinza Volante Pulverizada
PIB	Produto Interno Bruto
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PPGEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSM
PPM	Modelos de Empacotamento de Partículas
PR	Paraná
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição

RDC	Resíduo de Demolição de Concreto
REF	Traço Referência ou Referências
RILEM	União Internacional de Laboratórios e Experts em Materiais de Construção
RPC	Concreto de Pó Reativo
RS	Rio Grande do Sul
SA	Sílica Ativa
SCC	Concreto Auto Adensável
SCM	Materiais Cimentícios Suplementares
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SECONCI	Serviço Social da Construção Civil
SENAI	Serviço Nacional da Indústria
SESI	Serviço Social da Indústria
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil
SINTEF	Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TC	Traços com Cal ou Comitê Técnico
TCPO	Tabela de Composições e Preços para Orçamentos
TG/DTG	Termogravimetria/Termogravimetria Derivada
TN	Traços Normais
TNT	Trinitrotolueno
TP	Traços com Pintura
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UHPC	Concreto de Ultra Alto Desempenho
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Ambiente
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UR	Umidade Relativa
US	Estados Unidos
USD	Dólar Americano
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
USGS	Pesquisa Geológica dos Estados Unidos
USP	Universidade de São Paulo
UWM	Universidade de Wisconsin (<i>Milwaukee</i>)
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

\wedge	Sobe
\vee	Desce
#	Peneira ou bitola
%	Por cento
<	Maior que
=	Igual
\neq	Diferente
>	Menor que
\pm	Mais ou menos
\pm	Mais ou menos
Δ	Varição
$\sqrt{\quad}$	Raiz quadrada
\approx	Aproximadamente
\leq	Maior ou igual
\geq	Menor ou igual
2θ	Ângulo de difração
$^{\circ}$	Graus
ϕ	Densidade de empacotamento ou bitola de aço
ρ	Densidade
Σ	Somatório

LISTA DE NOTAÇÕES QUÍMICAS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
As	Arsênio
C	Carbono
C/S	Relação Cálcio x Sílica
C ₂ S	Silicato Bicálcio ou Belita*
C ₃ A	Aluminato Tricálcico*
C ₃ S	Silicato Tricálcio ou Alita*
C ₄ AF	Ferro Aluminato de Tetracálcio*
C ₇ H ₅ O ₆ N ₃	Trinitrotolueno
Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Portlandita
Ca ²⁺	Cátion de Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CaCO ₃ Medido	Teor de Carbonato de Cálcio no concreto
CAH	Aluminato de Tetracálcio Hidratado
CaO	Óxido de Cálcio
CASH	Sílico-Aluminato de Cálcio Hidratado*
CaSO ₄	Sulfato de Cálcio
CC	Calcita*
Cd	Cádmio
CEMHYD3D	Hidratação e microestrutura do cimento tridimensional*
CFC	Clorofluorcarboneto
CH	Cal Hidratada
CH ₂	Óleo Diesel
CH ₄	Gás Metano
CH _{medido}	Teor de Portlandita no concreto
Cl ⁻	Íons Cloreto
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Dióxido de Carbono equivalente
CO ₃ ²⁻	Ânion Carbonato
Cr	Cromo
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado*
CSH ₂	Gesso*
Cu	Cobre
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
FH ₃	Óxido de Ferro Hidratado*
H	Água*
H ⁺	Cátion Hidrogênio
H ₂ CO ₃	Ácido Carbônico
H ₂ O	Água
H ₂ O _{comb}	Teor de água combinada
H ₂ S	Gás Sulfídrico
HC	Hidrocarbonetos
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
HCO ³⁻	Bicarbonato

HFC	Hidrofluorocarbonetos
Hg	Mercúrio
K ₂ O	Óxido de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
Ldc	Perda de massa na decarbonatação dos Carbonatos acima de 600°C
Ldh	Perda de massa na desidratação do CSH gel entre 105° e 400°C
Ldx	Perda de massa da desidroxilação da Portlandita entre 400° e 500°C
m _{CaCO₃}	Massa molecular do CaCO ₃ (100g.mol ⁻¹)
m _{CH}	Massa molecular do CH (74 g.mol ⁻¹)
m _{CO₂}	Massa molecular do CO ₂ (44g.mol ⁻¹)
Mg(OH) ₂	Brucita
MgO	Óxido de Magnésio
m _{H₂O}	Massa molecular da água (18 g.mol ⁻¹)
MnO	Óxido de Manganês
N ₂	Gás Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
Na ₂ O	Óxido de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH ₄ NO ₃	Nitrato de Amônia
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Anidrido Fosfórico
Pb	Chumbo
PCE	Éter de Policarboxilato
Se	Selênio
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
SiO ₄ ⁴⁻	Ânion Ortossilicato
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO ₃	Anidrido Sulfúrico
SrO	Óxido de Estrôncio
TiO ₂	Óxido de Titânio
WL _{CaCO₃}	Perda de massa do composto no ensaio acima de 600°C
WL _{CH}	Perda de massa devido à evaporação da água entre 400°C e 500°C
Zn	Zinco
*	Notações específicas da química do cimento Portland

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	39
1.1	OBJETIVOS	42
1.1.1	Objetivo geral	42
1.1.2	Objetivos específicos	42
1.2	JUSTIFICATIVA	43
1.3	ORIGINALIDADE DA PESQUISA	45
2	O EFEITO ESTUFA E AS AM NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	49
2.1	O EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL	49
2.2	AQUECIMENTO GLOBAL E A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.....	53
2.3	AQUECIMENTO GLOBAL E A PRODUÇÃO DE CP E CONCRETO	54
2.4	AQUECIMENTO GLOBAL E AS AM NA PRODUÇÃO DE CP.....	58
2.4.1	A sustentabilidade do FC	61
2.4.2	A sustentabilidade da CV	63
2.4.3	A sustentabilidade da CH	65
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	67
3.1	AS ATIVIDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO FC	67
3.1.1	O efeito filer	67
3.1.2	O efeito diluição	67
3.1.3	O efeito da nucleação heterogênea	68
3.1.4	As reações de hidratação	71
3.1.5	A granulometria	75
3.2	AS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO COM FC	76
3.2.1	A trabalhabilidade	76
3.2.2	O tempo de pega	77
3.2.3	O calor de hidratação	78
3.3	AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM FC	79
3.4	O FC E OS ALTOS TEORES DE SUBSTITUIÇÃO.....	82
3.5	AS MISTURAS DE FC E CV.....	85
3.6	A CAL HIDRATADA	88
3.7	A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO.....	91
3.7.1	Mecanismos da carbonatação	92
3.7.2	Fatores intervenientes	93
3.7.2.1	<i>Tipo e quantidade de CP</i>	93
3.7.2.2	<i>Relação água x cimento</i>	94
3.7.2.3	<i>Teor de Umidade</i>	94
3.7.2.4	<i>Teor de pH</i>	95
3.7.2.5	<i>Teor de Portlandita e porosidade da pasta</i>	96
3.7.2.6	<i>Temperatura</i>	98
3.7.2.7	<i>Meio ambiente</i>	98
3.7.2.8	<i>Concentração de CO₂</i>	99
3.7.3	Influência das AM na carbonatação	100
3.7.3.1	<i>Efeitos do FC</i>	101
3.7.3.2	<i>Efeitos da CV</i>	104
3.7.4	Carbonatação e a CH	105
3.7.5	Película protetora	106
3.7.6	Modelagem matemática	108
3.8	O EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	111

3.8.1	Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA)	117
3.9	ACV E CCV.....	118
3.9.1	Introdução aos conceitos de ACV e CCV	118
3.9.2	ACV	120
3.9.2.1	<i>Objetivo e escopo</i>	120
3.9.2.2	<i>Inventário</i>	121
3.9.2.3	<i>Avaliação de impactos</i>	122
3.9.2.4	<i>Interpretação dos resultados e tomada de decisão</i>	123
3.9.3	Ciclo de vida modular	124
3.9.4	ACV e o concreto	124
3.9.5	CCV	126
3.9.5.1	<i>CCV e as construções</i>	127
3.9.5.2	<i>CCV e a sustentabilidade das construções</i>	130
3.9.5.3	<i>CCV: limitações</i>	132
4	MATERIAIS E MÉTODOS	133
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	134
4.2	VARIÁVEIS DA PESQUISA	135
4.2.1	Variáveis independentes	135
4.2.2	Variáveis intervenientes	135
4.2.3	Variáveis dependentes	136
4.3	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	136
4.3.1	Aglomerantes	136
4.3.1.1	<i>Composição granulométrica dos aglomerantes</i>	137
4.3.1.2	<i>Composição química dos aglomerantes</i>	139
4.3.1.3	<i>Composição física dos aglomerantes</i>	140
4.3.1.4	<i>Difração de raios-X dos aglomerantes</i>	144
4.3.1.5	<i>Análise termogravimétrica dos aglomerantes</i>	146
4.3.2	Agregados	149
4.3.3	Aditivo químico	151
4.3.3.1	<i>Verificação da compatibilidade entre CP e aditivo pelo método Marsh</i>	152
4.3.4	Estudo do empacotamento	153
4.3.4.1	<i>Curva de distribuição do tamanho das partículas x curva de Andreassen modificado</i>	155
4.3.5	Estudo da dosagem	156
4.3.5.1	<i>Estudo da trabalhabilidade</i>	158
4.4	ENSAIOS EM CONCRETO	160
4.4.1	Resistência à compressão	160
4.4.1.1	<i>Intensidade de clínquer</i>	161
4.4.1.2	<i>Resistência à compressão unitária</i>	163
4.4.2	Carbonatação acelerada	164
4.4.2.1	<i>Pré-condicionamento e a carbonatação acelerada</i>	166
4.4.2.2	<i>Nomenclatura referente à carbonatação</i>	167
4.4.2.3	<i>Metodologia para a determinação da frente de carbonatação</i>	168
4.4.2.4	<i>Película de proteção contra a carbonatação</i>	171
4.5	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA.....	172
4.5.1	Preparação das amostras	172
4.5.1.1	<i>Paralisação das reações de hidratação</i>	172
4.5.2	Termogravimetria analítica e diferencial (TG/DTG)	173
4.5.2.1	<i>Cálculo dos teores de água combinada, Portlandita e Carbonatos</i>	174
4.5.3	Difração de raio-X (DRX)	176

4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	177
4.7	ESTUDO DA SUSTENTABILIDADE – ACV E CCV	177
4.7.1	Definição dos parâmetros da ACV e CCV	177
4.7.1.1	<i>Software SimaPro</i>	179
4.7.1.2	<i>ACV modular</i>	179
4.7.2	Unidade funcional metro cúbico de concreto (MCC)	180
4.7.2.1	<i>Metodologia da ACV referente a unidade funcional MCC</i>	180
4.7.2.1.1	Definições de escopo e objetivos (MCC).....	180
4.7.2.1.2	Unidade funcional, fluxos de referência e fronteiras do sistema (MCC)	180
4.7.2.1.3	Avaliação e seleção de impactos (MCC).....	181
4.7.2.1.4	Coleta de dados para o inventário (MCC)	182
4.7.2.2	<i>Análise do inventário do ciclo de vida (MCC)</i>	183
4.7.2.2.1	Agregados miúdos do berço ao portão (MCC).....	183
4.7.2.2.2	Agregados graúdos do berço ao portão (MCC).....	184
4.7.2.2.3	CPV-ARI do berço ao portão (MCC).....	186
4.7.2.2.4	Aditivo hiperplastificante e água (MCC).....	189
4.7.2.2.5	FC e CV (MCC).....	189
4.7.2.2.6	CH (MCC)	189
4.7.2.2.7	Combustível do berço ao portão (MCC)	189
4.7.2.2.8	Energia elétrica do berço ao portão (MCC).....	190
4.7.3	Unidade funcional pilar estrutural de concreto (PEC)	190
4.7.3.1	<i>Metodologia da ACV referente a unidade funcional PEC</i>	191
4.7.3.1.1	Definições de escopo e objetivos (PEC)	191
4.7.3.1.2	Unidade funcional, fluxos de referência e fronteiras do sistema (PEC)	191
4.7.3.1.3	Avaliação e seleção de impactos (PEC).....	193
4.7.3.1.4	Coleta de dados para o inventário (PEC)	193
4.7.3.2	<i>Análise do inventário do ciclo de vida (PEC)</i>	193
4.7.3.2.1	Madeira (PEC).....	193
4.7.3.2.2	Execução da estrutura (PEC).....	194
4.7.3.2.3	Uso e manutenção do portão ao túmulo (PEC)	194
4.7.3.2.4	Fixação de CO ₂ durante a vida útil do portão ao túmulo (PEC)	195
4.7.3.2.5	Pintura do portão ao túmulo (PEC)	195
4.7.3.2.6	Desconstrução e reciclagem do portão ao túmulo (PEC).....	196
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	197
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	197
5.1.1	Resistência à compressão	197
5.1.1.1	<i>Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias</i>	198
5.1.1.2	<i>Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão aos 91 dias</i>	201
5.1.2	Evolução da resistência à compressão	204
5.1.3	Intensidade de clínquer	206
5.1.3.1	<i>Análise e discussão dos resultados da intensidade de clínquer aos 28 dias</i>	207
5.1.3.2	<i>Análise e discussão dos resultados da intensidade de clínquer aos 91 dias</i>	207
5.1.3.3	<i>Análise e discussão dos resultados da intensidade de ligantes.....</i>	208
5.1.4	Resistência à compressão unitária	212
5.1.4.1	<i>Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão unitária aos 28 dias</i>	212
5.1.4.2	<i>Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão unitária aos 91 dias</i>	213
5.1.5	Análise estatística integrada da resistência à compressão aos 28 e 91 dias....	214
5.2.1	Determinação da profundidade carbonatada	216

5.2.1.1	<i>Profundidade carbonatada REF</i>	218
5.2.1.2	<i>Profundidade carbonatada FC50</i>	219
5.2.1.3	<i>Profundidade carbonatada FC60</i>	220
5.2.1.4	<i>Profundidade carbonatada FC70CV10</i>	221
5.2.1.5	<i>Profundidade carbonatada FC60P</i>	223
5.2.1.6	<i>Profundidade carbonatada FC60CH10</i>	224
5.2.1.7	<i>Profundidade carbonatada FC70CV10P</i>	225
5.2.1.8	<i>Profundidade carbonatada FC70CV10CH10</i>	226
5.2.1.9	<i>Análise integrada da profundidade carbonatada</i>	227
5.2.2	Determinação do coeficiente de carbonatação (<i>kc</i>)	229
5.2.3	Determinação da vida útil	232
5.3	DIFRAÇÃO DE RAIO-X (<i>DRX</i>)	234
5.3.1	Pré-análise dos resultados	234
5.3.2	Difratograma do traço REF	236
5.3.3	Difratograma do traço FC50	239
5.3.4	Difratograma do traço FC60	242
5.3.5	Difratograma do traço FC60CH10	244
5.3.6	Difratograma do traço FC70CV10	246
5.3.7	Difratograma do traço FC70CV10P	248
5.3.8	Difratograma do traço FC70CV10CH10	250
5.3.9	Análise integrada da difração de raios-X (<i>DRX</i>) na CS	252
5.3.10	Análise integrada da difração de raios-X (<i>DRX</i>) na CN	255
5.4	TERMOGRAVIMETRIA ANALÍTICA E DIFERENCIAL (<i>TG/DTG</i>)	259
5.4.1	Análise integrada da <i>TG/DTG</i> na CN	261
5.4.2	Análise integrada da <i>TG/DTG</i> na CS	264
6	RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV – UNIDADES FUNCIONAIS	269
6.1	RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV DA UNIDADE FUNCIONAL MCC	269
6.1.1	Resultados e análises da ACV (<i>MCC</i>)	269
6.1.1.1	<i>Pré-análise dos impactos ambientais (<i>MCC</i>)</i>	270
6.1.1.2	<i>Impactos ambientais totais: Eco-indicador 99 (<i>MCC</i>)</i>	270
6.1.1.3	<i>Impactos ambientais individuais (<i>MCC</i>)</i>	273
6.1.1.3.1	<i>Mudanças climáticas (<i>MCC</i>)</i>	273
6.1.1.3.2	<i>Uso de recursos naturais (<i>MCC</i>)</i>	274
6.1.1.3.3	<i>Consumo de energia (<i>MCC</i>)</i>	275
6.1.1.3.4	<i>Geração de resíduos (<i>MCC</i>)</i>	275
6.1.1.3.5	<i>Consumo de água (<i>MCC</i>)</i>	276
6.1.1.4	<i>Demais índices ambientais (<i>MCC</i>)</i>	277
6.1.1.4.1	<i>Emissão de CO_{2eq} (<i>MCC</i>)</i>	278
6.1.1.4.2	<i>Intensidade de CO_{2eq} (<i>MCC</i>)</i>	279
6.1.1.4.3	<i>Formação de material particulado (<i>MCC</i>)</i>	282
6.1.1.4.4	<i>Esgotamento fóssil (<i>MCC</i>)</i>	283
6.1.1.5	<i>Análise estatística integrada dos impactos ambientais (<i>MCC</i>)</i>	284
6.1.2	CCV (<i>MCC</i>)	285
6.1.3	Avaliação dos resultados ambientais e econômicos (<i>MCC</i>)	288
6.1.4	Indicador global de sustentabilidade (<i>MCC</i>)	289
6.2	RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV DA UNIDADE FUNCIONAL PEC	294
6.2.1	Resultados e análises da ACV (<i>PEC</i>)	294

6.2.1.1	<i>Impactos ambientais totais: Eco-indicador 99 (PEC)</i>	294
6.2.1.2	<i>Impactos ambientais individuais (PEC)</i>	296
6.2.1.2.1	Mudanças climáticas (PEC)	296
6.2.1.2.2	Uso de recursos naturais (PEC)	296
6.2.1.2.3	Consumo de energia (PEC)	297
6.2.1.2.4	Geração de resíduos (PEC)	298
6.2.1.2.5	Consumo de água (PEC)	299
6.2.1.3	<i>Demais índices ambientais (PEC)</i>	300
6.2.1.3.1	Emissão de CO _{2eq} (PEC)	300
6.2.1.3.2	Formação de material particulado (PEC)	302
6.2.1.3.3	Esgotamento fóssil (PEC)	304
6.2.1.4	<i>Análise estatística integrada dos impactos ambientais (PEC)</i>	305
6.2.2	CCV (PEC)	306
6.2.3	Avaliação dos resultados ambientais, econômicos e de durabilidade (PEC)	310
6.2.4	Indicador global de sustentabilidade (PEC)	312
6.3	ANÁLISE INTEGRADA DA ACV E CCV DAS UNIDADES FUNCIONAIS	316
6.4	INTENSIDADE DE CLÍNQUER X INTENSIDADE DE LIGANTE X EMISSÃO CO _{2EQ}	316
7	CONCLUSÕES	321
7.1	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, ADITIVO E TRABALHABILIDADE	321
7.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	321
7.2.1	Resistência à compressão	321
7.2.2	Alta resistência à compressão	322
7.2.3	Evolução da resistência à compressão	322
7.2.4	Intensidade de clínquer (I_{cq})	323
7.2.5	Intensidade de ligante (IL)	323
7.2.6	Resistência à compressão unitária ($f_{c_{unit}}$)	323
7.3	CARBONATAÇÃO ACELERADA	324
7.3.1	Profundidade carbonatada	324
7.3.2	Coefficiente de carbonatação (kc)	324
7.3.3	Vida útil estimada	325
7.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	325
7.4.1	DRX na camada carbonatada (CS)	325
7.4.2	DRX na camada não carbonatada (CN)	325
7.5	TERMOGRAVIMETRIA ANALÍTICA E DIFERENCIAL (TG/DTG)	326
7.5.1	TG/DTG na camada carbonatada (CS)	326
7.5.2	TG/DTG na camada não carbonatada (CN)	326
7.6	ESTUDO DA SUSTENTABILIDADE – ACV E CCV	326
7.6.1	Unidade funcional metro cúbico de concreto	326
7.6.2	Unidade funcional pilar estrutural de concreto	327
7.6.3	Análise integrada da ACV e CCV das unidades funcionais	327
7.6.4	Análise integrada – intensidade de clínquer, de ligante e emissão de CO_{2eq}	327
7.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	328
7.8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	329
	REFERÊNCIAS	331
	APÊNDICES	361
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS DE PROJETO	363
	APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA NO SIMAPRO	367

APÊNDICE C – PLANILHAS DE CUSTOS UNITÁRIOS	372
APÊNDICE D – CURVAS DE EMPACOTAMENTO (EMMA)	381
APÊNDICE E – GRÁFICOS TG/DTG	384
ANEXO	391
ANEXO A – INVENTÁRIO DE EMISSÕES	393

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade vive, pelo menos, dois dilemas cruciais: primeiro, o geopolítico sobre o domínio territorial e de poder em zonas conflagradas, especialmente guerras, rebeliões e terrorismo disseminados por regiões do mundo ocidental e oriental; segundo, o da sobrevivência do homem no planeta Terra que se torna cada vez mais ameaçada por não comportar o “*modus vivendi* do *homo sapiens*” na pós-modernidade e da biodiversidade que o envolve. Os resultados da 21ª Conferência do Clima (COP 21) – Acordo de Paris (2015) são um retrato sobre as dificuldades apresentadas por alguns governos participantes, mais interessados em proteger interesses próprios, políticos ou econômicos, do que o da comunidade mundial.

O Quinto Informe de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Especialistas em Mudanças Climáticas (IPCC) fornece avaliação sobre o rumo que o planeta seguirá se, hoje, não forem modificadas as práticas habituais de produção, consumo e hábitos de vida, que não são nada promissoras (IPCC, 2014). O Acordo de Paris prevê um projeto para frear as mudanças climáticas e garantir um aumento da temperatura média global inferior a 2°C em relação aos níveis pré-industriais e perseguir o limite de aumento da temperatura em 1,5°C até 2030 (ONU, 2015).

Temas como proteção do meio ambiente, poluição, geração e deposição de resíduos, conservação dos recursos naturais, saúde pública, emissões de gases do efeito estufa, energias renováveis e muitos outros tem sido a preocupação de muitos pesquisadores para minimizar estes efeitos danosos com que a sociedade moderna convive.

Entretanto, o aumento da população mundial, que hoje se aproxima de 8 bilhões de habitantes (WORLDMETERS, 2020), a elevação do padrão de consumo da sociedade pós-moderna e dos avanços tecnológicos atuais, por um lado, e o declínio na disponibilidade de recursos naturais e seu impacto sobre os ecossistemas por outro, tornam pequena a margem de ação dos agentes envolvidos na solução do desenvolvimento sustentável.

A manutenção e o aumento do padrão de vida da população têm demandado quantidades cada vez maiores de matérias-primas, da ordem de 10 ton.hab⁻¹.ano⁻¹, podendo chegar até a 80 ton.hab⁻¹.ano⁻¹ em algumas sociedades mais avançadas. Certamente que esta taxa não pode ser mantida por muito tempo porque a humanidade vive em um sistema fechado: a Terra. Algumas matérias-primas já são escassas, devendo ser exploradas em jazidas cada vez mais distantes ou menos nobres (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Na Indústria da Construção Civil este panorama é mais dramático pela amplitude mundial e necessidade crescente de novas edificações e obras de infraestrutura. Segundo

Agopyan (2014) a construção civil é responsável pelo consumo de 40% a 75% da matéria-prima produzida no planeta, sendo produzidos, anualmente, cerca de 500 kg de entulhos por pessoa.ano⁻¹, equivalentes 3,75 bilhões de toneladas, fazendo deste segmento industrial o mais poluente do planeta.

Sabe-se que a indústria da construção não prescinde do cimento Portland (*CP*) para a execução de obras e serviços, seja na utilização de argamassa, concreto e outros derivados, tornando assim esse material, individualmente, o mais consumido pelo homem em suas diversas formas. A produção mundial de *CP* era de 3,27.10⁶ ton.ano⁻¹ em 2010 sendo esperada a produção de 4,83.10⁶ ton.ano⁻¹ em 2030 cerca de 625 kg.hab⁻¹.ano⁻¹ (STATISTA, 2020; VISEDO; PECCHIO, 2019). A produção de *CP* supera o consumo de alimentos, segundo Agopyan e John (2011), o que confere a dimensão e importância deste material de construção.

Depois da água, o concreto e seus derivados constituem-se no material mais utilizado no mundo, correspondendo a 11,4 bilhões de ton_{eq}.ano⁻¹ (4,85 bilhões de m_{eq}³.ano⁻¹) ou 3.750 kg_{eq}.hab⁻¹.ano⁻¹ (1,6 m_{eq}³.hab⁻¹.ano⁻¹), sendo este valor 10 vezes maior do que qualquer outro material usado pelo homem ou 2 vezes a soma total de todos os demais materiais de construção. Para a produção desta enorme quantidade de concreto são necessários, aproximadamente, por ano, 5 bilhões de toneladas de agregado graúdo (≈ 4 bilhões de m³), 3,8 bilhões de toneladas de agregado miúdo (≈ 3 bilhões de m³) e ainda, pelo menos, 1,2 bilhões de m³ de água incluindo-se todas as etapas e operações. Acresce-se ainda emissão potencial de 1 bilhão de ton.ano⁻¹ de gases de efeito estufa (*GEE*) (VISEDO; PECCHIO, 2019).

O grande consumo de matérias-primas no concreto é resultado da sua preferência como material estrutural na construção de edificações, pavimentações, pontes, viadutos, túneis, obras hidráulicas, saneamento e muitas outras. Praticamente não há setor da construção civil no qual o concreto, sob suas diversas formas e tipos, não seja utilizado. Essa preferência de escolha decorre da boa durabilidade, segurança aos agentes naturais, resistência ao fogo, podendo ainda ter parte do *CP* substituído por adições minerais (*AM*), resíduos agroindustriais de origem sílico-aluminosa ou outro tipo de aglomerante. Também os agregados naturais podem ser substituídos por resíduos industriais como de construção e demolição (*RCD*), e de demolição de concreto (*RDC*).

Apesar do concreto armado ser um material estrutural relativamente novo (≈ 140 anos), os insumos empregados continuam praticamente os mesmos desde os primórdios, com as modificações tecnológicas decorrentes do tempo, a não ser os aditivos especiais que apresentaram avanço relevante nos últimos anos. Entretanto, sua tecnologia evoluiu bastante nos últimos 50 anos com o avanço do conhecimento da microestrutura da

pasta cimentícia e da zona de transição pasta/agregado. Nos anos 1970 surgiu o concreto de alta resistência (*50-80 MPa*), nos anos 1990 o concreto de alto desempenho (*80-120 MPa*) e, por último, nos anos 2000 o concreto de pós-reativos ou de ultra alto desempenho (*150-250 MPa ou mais*).

Durante este período, muitos avanços foram observados no campo da ciência e engenharia dos materiais, especialmente nos materiais cimentícios, com auxílio de equipamentos mais sofisticados de pesquisa para observação das propriedades em escala nano/micrométrica da pasta, o que levou ao desenvolvimento de novos tipos de concretos submetidos a condições ambientais mais severas. Além disso, o espectro de uso dos materiais suplementares (*AM e outros aglomerantes*) foi ampliado, não só de resíduos agroindustriais como, também, de agregados reciclados das mais diversas origens, que modificaram de sobremaneira a nano/microestrutura do concreto, melhorando o seu desempenho, vida útil e, em consequência, a sustentabilidade dos recursos naturais por ele utilizados.

O clínquer Portland, o mais importante componente do concreto, é, também, o material que mais colabora para a emissão dos GEE porque cerca de 2/3 da sua composição são Carbonatos Cálcicos que são descarbonatados no forno de queima que, somados à combustão de fontes energéticas, geralmente de origem fóssil, são as fontes primárias da poluição atmosférica.

Além disso, por ser o maior produto manufaturado no mundo, em massa, fornece a dimensão da relação antagônica entre desenvolvimento econômico requerido pela sociedade atual e a sustentabilidade global do planeta, pelo declínio das condições atmosféricas adversas e pelo consumo de recursos naturais não renováveis.

Entre as adições inertes as mais empregadas são os fileres carbonáticos ou silicosos moídos juntamente com o clínquer, porque são encontrados em quase todos os lugares do mundo, tendo em vista que conferem boas características reológicas aos concretos frescos e, principalmente, diminuem o custo por serem produtos baratos e de baixa emissão de Carbono.

Na produção de CP, normas internacionais limitam o uso dos fileres entre 5% e 35%, dependendo do continente e da cultura tecnológica, como AM inertes em moagem conjunta com o clínquer nas plantas industriais. Pesquisas atuais direcionam para o aumento do uso do Filer Calcário (*FC*) em substituição ao CP em teores maiores que os previstos em normas, inclusive em misturas ternárias e quaternárias com pozolanas, bem como com o uso de outros tipos de aglomerantes, com o intuito de se obter concretos mais resistentes, sustentáveis e de custo unitário mais barato, sem perda de suas características de durabilidade.

Sob o ponto de vista da sustentabilidade, a incorporação do FC no CP possui grande relevância em relação a outras AM ou pozolanas, porque é inerte, isto é, pouco contribui para

as emissões GEE, possui baixo custo e, geralmente, estão disponíveis em jazidas próximas às fábricas de CP. O uso conjunto de uma AM inerte e outra ativa juntamente com outros tipos de aglomerantes pode trazer benefícios não só para as propriedades do concreto como para a sustentabilidade, em especial quando se realizam comparações em bases unitárias, kg.m^{-3} , MPa^{-1} , por exemplo.

Em vista do exposto, o presente trabalho teve por escopo estudar a inclusão de níveis mais elevados de FC, em substituições binárias com o CP, ternárias com CV e/ou CH e quaternária com CV e CH, porque são produtos regionais disponíveis em escala industrial para aproveitamento junto com o clínquer Portland.

Pretendeu-se investigar, algumas características microestruturais, propriedades mecânicas e durabilidade, especialmente quanto as propriedades que influem na corrosão das armaduras, como a carbonatação, e as transformações ocorridas quando são empregados FC, CV e CH, comparados à mistura de referência de CP, sem substituições. A possibilidade de elevação do teor de FC em concreto estrutural é um objetivo que veio ao encontro do aumento da sustentabilidade deste material, contribuindo para diminuição dos GEE no meio ambiente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi formular misturas contendo teores elevados de substituição de clínquer Portland, iguais ou maiores de 50%, em massa, através de misturas binárias, ternárias e quaternária de AM (*FC e CV*) e CH, com estudo da vida útil provável de um metro cúbico de concreto e de um pilar de concreto estrutural de concreto, sob a ação da carbonatação e da sustentabilidade por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (*ACV*) e do Custo do Ciclo de Vida (*CCV*).

1.1.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral deste trabalho, dividiu-se o mesmo nos seguintes tópicos específicos:

- Formular misturas por intermédio de métodos de empacotamentos de partículas para obtenção do menor teor possível de vazios, com o emprego de FC em substituição ao

clínquer Portland, através de teores de pelo menos o dobro (50%) permitido pela norma brasileira;

- Estudar as principais modificações físico-químicas da microestrutura que influem nas propriedades relacionadas com a carbonatação dos concretos com altos teores de FC, na camada carbonatada e não carbonatada;
- Estudar as relações entre intensidade de clínquer, de ligantes e de emissão dos gases de efeito estufa para as misturas formuladas;
- Realizar estudo da sustentabilidade das misturas formuladas, com respeito aos aspectos ambientais e econômicos, por meio da ACV e do CCV, de duas unidades funcionais: um metro cúbico de concreto (*do berço ao portão*) e um pilar estrutural de concreto (*do berço ao tûmulo*).

1.2 JUSTIFICATIVA

A produção mundial de CP tende a crescer rapidamente com a urbanização crescente da população, sua produção em 2040 pode se situar entre 6 e 12 bilhões de toneladas.ano⁻¹, conforme cenário de crescimento lento ou rápido (EDWARDS, 2015). Atualmente, em números globais, o fator clínquer no CP é de aproximadamente 75%, ou seja, cada tonelada possui $\frac{3}{4}$ partes de clínquer, em média mundial, e $\frac{1}{4}$ de adições inertes ou ativas, inclusive o gesso (ERYANTO; AMRINA, 2015).

A mitigação dos GEE causados pela fabricação do CP é proporcional à redução do teor de clínquer e aumento das AM ou outros tipos de aglomerantes seja de qualquer fonte mineral ativa ou inerte, convencional ou não convencional, experimentalmente comprovada (JOHN et al., 2018). A escolha da AM e outros aglomerantes a serem adicionados ao CP ou em substituição ao mesmo devem atender a critérios de disponibilidade e economicidade e, de preferência, serem resíduos, subprodutos, coprodutos de outros processos industriais ou produtos, que apresentem baixa emissão de GEE, e que possuam menor balanço de emissão de CO₂.

Existem vários resíduos e subprodutos agrícolas e industriais que podem ser considerados AM ativas ou inertes, como os fileres dos mais diversos tipos de acordo com a rocha matriz da qual provém, assim como pozolanas de biomassa, conforme é extensamente citado por Calmon (2017). Na presente tese foram empregados FC e CV por serem AM de fácil disponibilidade no RS, principalmente, na região central do Estado, apresentando baixo custo e distâncias de transporte reduzidas.

As AM e a CH, utilizadas separada ou conjuntamente em substituição/adição ao CP podem agregar maior valor tecnológico, econômico e ambiental na produção dos produtos finais da construção civil como nas argamassas e concretos. Estes benefícios, no contexto do conceito de sustentabilidade, são proporcionais ao teor de substituição/adição no CP, isto é, quanto maior a substituição das AM nas misturas ou adição de aglomerante, mais elevado será o retorno econômico, ambiental e social.

Nas últimas décadas muitos esforços foram realizados para que as emissões do CP declinassem de valores acima de uma tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer produzido, para valores atuais médios mundiais de 0,8 ton. Segundo Scrivener et al. (2018), para diminuir, ainda mais, essa relação restam duas grandes áreas de pesquisa que podem ser desenvolvidas para reduções adicionais nas emissões totais de CO₂ relacionadas com o CP e o concreto, quais sejam:

- Aumento do uso de AM de baixa emissão de CO₂ como substitutos parciais do clínquer Portland. As principais substituições são realizadas com AM ativas como escória de alto forno (EAF), CV e outras pozolanas, em proporção entre 15-25%, enquanto que as adições inertes como os FC não ultrapassam, em média, a 6%, quando existe possibilidade de aumentar o seu uso em teores iguais ou acima de 50%, em algumas aplicações. Poderiam ser evitadas emissões de 400 milhões de toneladas anuais de CO₂ se o nível de substituição de clínquer por AM alcançasse o teor de 40% (EDWARDS, 2015);
- Uso mais eficiente do clínquer Portland em argamassas e concretos, bem como a otimização na dosagem dos materiais utilizados, em termos de CO₂.m-3.MPa-1, poderia reduzir por um fator de quatro, comparando-se as boas práticas com as más. O emprego de métodos de empacotamento de partículas entre as frações finas dos materiais cimentícios com as mais grossas dos agregados, com uso de superplastificantes adequados, FC e reduzido conteúdo de água, podem diminuir o teor de clínquer com a manutenção e/ou aumento do desempenho requerido para o concreto. Outra modalidade complementar é aumentar o nível de resistência característica à compressão do projeto estrutural com a correspondente redução do consumo total de concreto oportunizando maior sustentabilidade global para as estruturas, por meio da desmaterialização.

Este trabalho contemplou o conteúdo dos dois tópicos anteriores, ou seja, estudou a substituição de clínquer Portland por teores elevados de FC, em misturas binárias, ternárias e quaternária com CV e CH, com o propósito de diminuir, ao menor teor possível, as

emanações de CO₂ decorrentes da sua produção, ao ser reduzido o teor de clínquer na mistura. Também foram estudados o comportamento da resistência à compressão das misturas pesquisadas e as modificações das principais propriedades da microestrutura relacionadas com a durabilidade do concreto com vistas à corrosão das armaduras, como a carbonatação. Também foram calculadas as quantidades das emanações dos gases do efeito estufa por meio de estudo da ACV e CCV, de duas unidades funcionais: um metro cúbico de concreto (*do berço ao portão*) e um pilar estrutural de concreto (*do berço ao túmulo*).

1.3 ORIGINALIDADE DA PESQUISA

Entre as AM inertes as mais empregadas nas fábricas de CP estão os FC moídos juntamente com o clínquer, porque são encontrados em quase todos os lugares do mundo, tendo em vista conferirem boas características reológicas aos concretos frescos e, principalmente, por diminuir o custo tendo em vista serem produtos baratos e de baixa emissão de Carbono.

Na produção do CP, normas internacionais limitam o uso do FC entre 5% e 35%, dependendo do continente e da cultura tecnológica, como AM inertes em moagem conjunta com o clínquer. Com o advento do concreto auto adensável os FC foram incorporados ao concreto como adição ao clínquer e não em substituição, por causa da quantidade mínima de finos necessários para promover a coesão e espalhamento do concreto sem a ocorrência de segregação ou de exsudação.

Pesquisas atuais direcionam para o aumento do uso de FC em substituição/adição ao CP em teores maiores que os previstos em normas, inclusive em misturas ternárias e quaternárias com pozolanas e/ou CH, no intuito de se obter concretos mais resistentes, sustentáveis e de custo unitário mais barato, sem perda de suas características de durabilidade e vida útil.

Sob o ponto de vista da sustentabilidade, a incorporação de FC no CP possui grande relevância em relação a outras AM ou pozolanas, porque é inerte e pouco contribui para as emanações de GEE, possui baixo custo e, geralmente, estão disponíveis em jazidas próximas às fábricas de CP.

O FC e a CV são duas AM, utilizadas separadas ou conjuntamente em substituição ao CP, que podem agregar maior valor tecnológico, econômico e ambiental na produção dos produtos finais da construção civil como nas argamassas e concretos. Estes benefícios, no contexto do conceito de sustentabilidade são proporcionais ao teor de substituição no CP.

O teor de FC no CP comum é bastante variável de acordo com a normalização de cada país ou região, conforme o nível ou cultura tecnológica. Assim, existem permissões para emprego do teor máximo, de 5% na Índia, de 25% no Brasil, de 15% no Canadá, Estados Unidos e China, de 20% na Austrália, de 25% na Argentina e de 35% na Europa e África do Sul. Observa-se que esses limites são elásticos, fazendo que, na média global de todos os tipos de CP internacionais, o teor seja de, apenas, 7% (WBCSD, 2017), mostrando muitas disparidades entre países e continentes, devido às visões distintas de pensar o CP do ponto de vista técnico ou sociocultural.

São poucos os trabalhos publicados nos últimos anos sobre misturas ternárias de FC com pozolana. Silva e Brito (2016) constataram bom desempenho quanto à durabilidade em misturas binárias com substituição de até 70% (*em volume*) de clínquer por FC e ternárias de 40% de CV com 20% de FC, com exceção de misturas com 60% e 70% de FC e CV em traços binárias e ternárias, que apresentaram maior carbonatação devido ao consumo da reserva alcalina.

Estudo similar foi realizado por Githachuri e Alexander (2013) com 3 tipos distintos de CP com FC, em misturas binárias com escória de alto forno e CV; em que as misturas com escória não apresentaram efeito adverso nas propriedades estudadas como permeabilidade a gases e resistência mecânica, entretanto com a CV reduziu essa última devido a sua menor reatividade pozolânica. A utilização de FC e metacaulim em misturas ternárias com substituição de CP proporcionou aumento de resistência à compressão até o nível de 45% da massa de CP, e perda de, apenas, 7% para 60% de substituição, segundo estudo de Antoni et al. (2012).

Assim, o presente trabalho sobre o uso do FC juntamente com a CV e a CH em misturas binárias, ternárias e quaternária, em níveis de substituição de até 80%, adquire caráter de relevância e originalidade pelos poucos estudos existentes, com a finalidade de melhor conhecer as características macro e microestruturais das pastas cimentícias, quando se substitui teores elevados de FC para o uso em concreto estrutural. A relevância é sobrevalorizada porque se trata do uso de três AM regionais, com ampla utilização não só na construção civil como em outras áreas industriais.

1.4 A ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o intuito de atingir os objetivos propostos o presente trabalho foi dividido em 7 capítulos, sendo os três primeiros compostos por revisão de literatura a qual se propõe a

uma seleção do que já foi publicado, relacionando o tema proposto aos objetivos, sendo os demais capítulos destinados à metodologia, apresentação dos resultados e conclusões.

O Capítulo 1 constitui-se na introdução ao tema proposto, onde são apresentados: a) introdução; b) objetivo geral; c) objetivos específicos; d) justificativa; e) originalidade da pesquisa; f) estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se a abordagem geral sobre o tema proposto relacionando o efeito estufa com: a) o aquecimento global; b) a indústria da construção; c) a produção de CP e concreto; d) as AM (*FC e CV*) e a CH sob a ótica da sustentabilidade.

O Capítulo 3 aborda: a) as AM utilizadas na tese (*FC e CV*); b) o aglomerante CH; c) os aspectos relacionados com a carbonatação das estruturas de concreto; d) as teorias sobre o empacotamento de partículas; e) a sustentabilidade das misturas formuladas, com respeito aos aspectos ambiental e econômico, por meio da ACV e CCV.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos relacionados ao programa experimental, descrevem-se os procedimentos experimentais para a caracterização dos materiais e métodos utilizados na execução da pesquisa. Os materiais são detalhados, as técnicas descritas e um breve histórico da pesquisa é apresentado, sendo que alguns dados são analisados e discutidos.

No Capítulo 5 é apresentada a análise e discussão dos resultados colhidos nos ensaios realizados, como resistência à compressão, carbonatação acelerada, análises termogravimétricas e difração de raios-X. Sobre estes resultados são feitos comentários para explicar, de forma lógica, os comportamentos observados.

No capítulo 6 apresenta-se o estudo da sustentabilidade das misturas formuladas, com respeito aos aspectos ambiental e econômico, por meio da ACV e CCV, sobre duas unidades funcionais: um metro cúbico de concreto (*do berço ao portão*) e um pilar estrutural de concreto (*do berço ao túmulo*).

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais obtidas da observação dos comportamentos e dos dados colhidos nos ensaios da pesquisa.

2 O EFEITO ESTUFA E AS AM NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

A construção civil representada pelo seu principal insumo industrializado, o CP, desempenha um papel primordial na mitigação dos impactos ambientais advindos de sua produção, porque é o setor industrial que mais utiliza recursos naturais. Com isso, o entendimento de como utilizar o CP sem, no entanto, contribuir de forma impactante para o aquecimento global, por meio do emprego de AM e outros tipos de aglomerantes, pode ser a chave para produtos mais amigáveis com o meio ambiente.

2.1 O EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

O efeito estufa consiste no mecanismo pelo qual a temperatura da atmosfera é autorregulada. O Carbono presente na atmosfera por meio dos gases CO₂, CH₄, NO_x e CFC (*GEE*) são os principais agentes no mecanismo de controle da temperatura da atmosfera terrestre. O mecanismo de atuação destes gases consiste na absorção da radiação infravermelha emitida pela terra, fazendo com que o calor fique retido (KASTING; CASTLING, 2003).

Em média, 50% da radiação solar que atinge a terra é refletida para o espaço, enquanto que os outros 50% são absorvidos pelo planeta, de maneira menos intensa. A presença dos GEE atua como um fator impeditivo para que a radiação de comprimento de onda mais longo, a infravermelha, saia para além da atmosfera, reemitindo boa parte desta energia em várias direções aquecendo, conseqüentemente, a superfície do planeta (DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013).

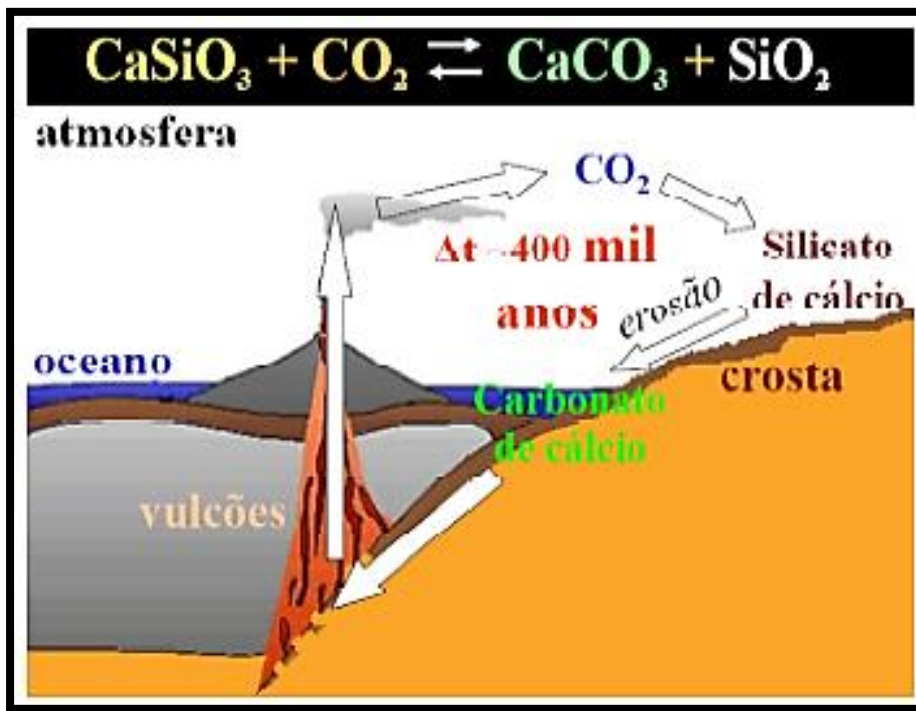
O efeito estufa é o mecanismo pelo qual a vida na terra é viabilizada, pois, sem ele, a temperatura seria de -18°C (DAMINELI, 2013). Entre os ciclos biogeoquímicos naturais que equalizam a concentração de CO₂ na atmosfera, de modo a fixá-lo na crosta terrestre, pode-se citar os mais relevantes: o ciclo Carbonato Silicato (Figura 2.1), a fotossíntese e absorção pelos oceanos.

Desde que o homem descobriu o fogo, contribuiu-se de forma direta para a elevação da temperatura do planeta, naquele momento o incremento era quase desprezível, no entanto, houve uma mudança drástica com o advento da revolução industrial, a partir de meados do século XVIII.

A revolução industrial trouxe um grande avanço tecnológico que propiciou, entre outras coisas, uma melhor qualidade de vida e, conseqüentemente, um aumento relevante na

população mundial. Com isso, a população crescente demandou novos produtos e serviços que, por sua vez, causaram impactos ambientais cada vez mais relevantes. Entre os impactos gerados destaca-se o aumento na temperatura do planeta.

Figura 2.1 – Ciclo do Carbonato Silicato - simplificação



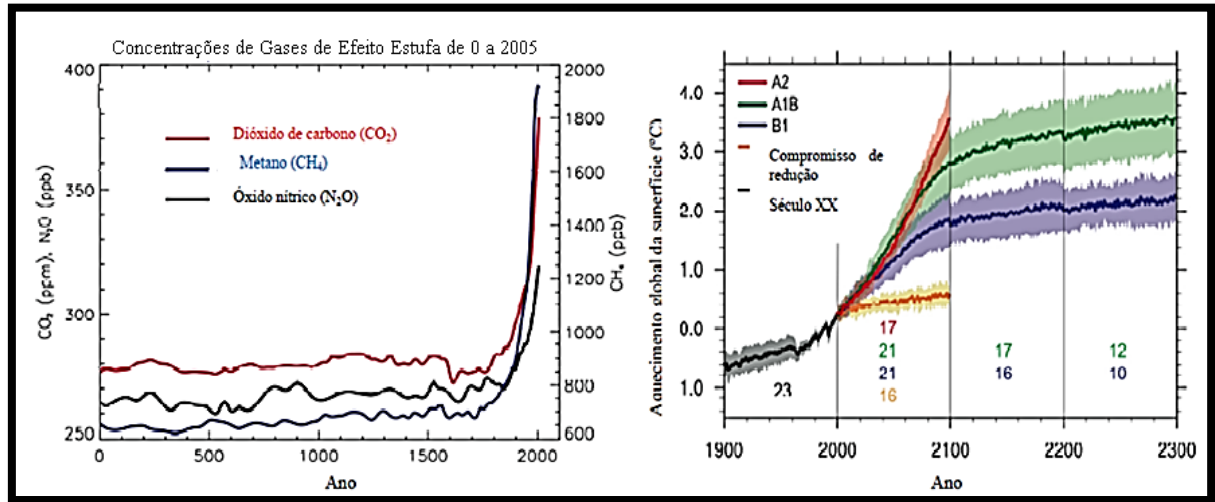
Fonte: Daminieli (2013).

Ao considerar que o calor emitido pelo sol (*radiação infravermelha*) pode ser considerado um valor constante na escala de tempo humana e, levando-se em conta o aumento da concentração dos GEE na atmosfera, ocorrerá um aumento na temperatura do planeta devido à ação antrópica.

Este aumento na temperatura do planeta tem-se intensificado ao longo das últimas décadas. Somente no século XX a temperatura média da terra teve um incremento de $0,8^\circ\text{C}$ e os prognósticos para o presente século são de uma elevação entre $1,4^\circ\text{C}$ e 4°C a depender do aumento ou diminuição da concentração dos GEE na atmosfera do planeta (DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013).

Na Figura 2.2a pode-se observar a evolução da concentração de CO_2 , CH_4 e N_2O nos últimos 2000 anos o que leva ao aumento da temperatura da superfície do planeta, mostrada na Figura 2.2b no período desde o ano 1900 até 2300, para diferentes cenários de medidas mitigadoras.

Figura 2.2 – a) evolução histórica da concentração dos GEE e b) aquecimento global ocorrido no último século e 3 diferentes estimativas para sua evolução no século XXI – cenários A2, A1B e B1



Fonte: IPCC (2007).

A partir do aumento da temperatura do planeta, muitos impactos podem ocorrer, tais como: a) aumento do nível dos oceanos; b) alteração no regime de chuvas e secas; c) derretimento das geleiras; d) desertificações, entre outros (DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013).

Outro importante fator para a ação dos gases de efeito estufa diz respeito à força radioativa ($w.m^{-2}$) que consiste num sistema que altera a relação entre a energia recebida pelo sol e a saída da terra. Por ocasião do aquecimento da superfície terrestre pode-se dizer que a força radioativa é positiva, por outro lado negativa quando levar ao resfriamento (OLIVEIRA; VECCHIA, 2013).

Esta força radioativa possui uma correlação direta com a concentração dos GEE (CO_2 , CH_4 , N_2O), pois eles possuem a capacidade de aprisionar a radiação solar que incide no planeta. No que diz respeito ao Dióxido de Carbono (CO_2) sua concentração atual é da ordem de 415 ppm (HARVEY, 2019; JOHNSON, 2019), sendo este valor 50% superior ao verificado antes do período pré-industrial que era de 280 ppm. Como parâmetro de comparação, a concentração atual é maior que a verificada nos últimos 800.000 anos quando variou entre 180 e 300 ppm (USEPA, 2020).

Assim como o CO_2 , o CH_4 é encontrado na atmosfera do planeta pela emissão de fontes naturais e não naturais (*antrópicas*) sendo esta última responsável por mais de 60% das emissões. Dentre os maiores contribuintes para a emissão de CH_4 de origem antrópica

destacam-se: a) a decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, b) a criação de gado; c) a indústria carbonífera; d) a queima de combustíveis fósseis como gás natural, petróleo e carvão mineral (USEPA, 2020).

O N_2O possui seu principal foco de emissão nas atividades agrícolas, por meio do uso de fertilizantes. Outros gases de efeito estufa podem ser relacionados, tais como os halo Carbonos (*gases que possuem Flúor, Cloro e Bromo ou Clorofluorcarbonos*) os quais são emitidos em processos industriais, refrigeração, entre outros (USEPA, 2020).

Os GEE's não possuem a mesma influência no que diz respeito às mudanças climáticas, pois seus potenciais de aquecimento global são distintos. O potencial de aquecimento global de um dado GEE é determinado pela energia que o mesmo pode absorver durante certo período de tempo, usualmente 100 anos, em comparação com o CO_2 (USEPA, 2020).

Desta forma, devem ser considerados os diferentes potenciais de aquecimento global dos GEE's, sendo que este tipo de emissão é normalmente expressa em CO_2 equivalente (CO_{2eq}) que representa a quantidade necessária deste gás para causar a mesma força radioativa emitida por uma dada mistura de GEE (LIMA, 2010). A Tabela 2.1 mostra o potencial de aquecimento dos principais GEE's.

Tabela 2.1 – Potencial de aquecimento global dos GEE's

GEE	Fonte de emissão	Tempo médio de vida da atmosfera (anos)	Potencial de aquecimento global (100 anos)
CO_2	Queima de combustíveis fósseis, de resíduos de biomassa e mudança no uso do solo e desmatamento	*	1
CH_4	Produção e transporte do carvão, queima de combustíveis como gás natural, carvão, petróleo, etc., criação de animais em atividades agrícolas e em aterros de resíduos sólidos urbanos	12	21
N_2O	Atividades agrícolas, indústrias e na queima de combustíveis e resíduos sólidos	114	310

Fonte: USEPA (2020).

Nos últimos anos várias conferências e encontros multilaterais têm ocorrido com o intuito de reduzir a emissão de GEE. Estas conferências constituem-se em uma esperança na redução das mudanças climáticas, dentre elas pode-se destacar o Acordo de Paris ($COP21$) e os acordos de Ruanda e Marrakesh ($COP22$).

2.2 AQUECIMENTO GLOBAL E A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

Tendo em vista que a temperatura do planeta pode aumentar entre 1,4°C e 4°C se a concentração de GEE não diminuir, tem-se um cenário bastante desafiador para as novas gerações. Assim fica clara a necessidade de modificações nas práticas correntes da sociedade, no que diz respeito a seus hábitos e padrões de consumo.

A implementação do conceito de desenvolvimento sustentável faz-se cada vez mais premente, ou seja, o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras (ONU, 1987). Caso este conceito básico não seja seguido, a curto ou médio prazo, o clima do planeta poderá ser transformado com extremos de precipitação pluviométrica de um lado e secas drásticas de outro, ou ainda, com ondas de calor severas em dada região e frio intenso em outra.

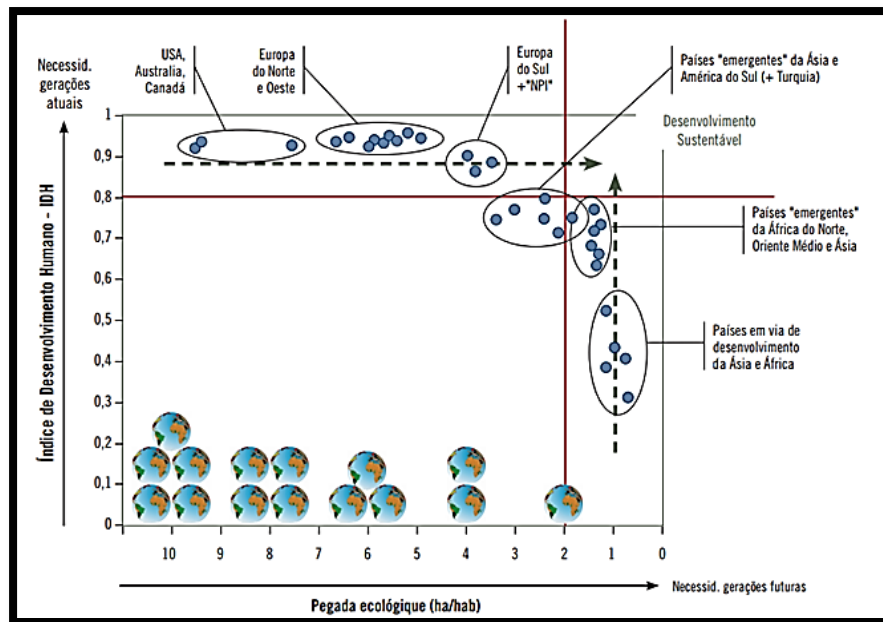
Um dos principais aspectos que contribuem para o modelo de desenvolvimento insustentável constitui-se na queima de combustíveis fósseis como motor da atual economia, o que gera um incremento cada vez maior na concentração de GEE. Aliado a isto se tem uma população planetária em crescimento constante, atualmente com quase 8 bilhões de habitantes (WORLDMETERS, 2020) e que continua em crescimento, sem conscientização dos danos ambientais causados pela sua expansão.

A cadeia da construção civil (*construbusiness ou negócios da construção*) é um setor da economia que está intimamente relacionado com qualquer atividade humana, porque é imprescindível para satisfação das necessidades da sociedade. Está presente em todas as regiões da Terra, é uma atividade econômica responsável por parcela considerável do produto interno bruto (*PIB*) das nações e, também, produz impacto ambiental proporcional ao avanço social de um país. Segundo a UNEP (2007) as construções utilizam aproximadamente 40% da energia global, 25% da água, 40% dos recursos naturais e emitem cerca de 1/3 dos GEE, sendo o maior setor da economia responsável por essas emissões.

A indústria da construção civil é um dos maiores setores da economia porque supre as demandas da sociedade com obras de edificações e a infraestrutura necessária para a melhoria da qualidade de vida, da educação, da saúde, do saneamento básico, enfim, das condições globais do desenvolvimento humano, medido pelo IDH (*Índice de Desenvolvimento Humano*). As nações mais desenvolvidas atendem as necessidades da população com maior facilidade tanto no aspecto econômico como no sociocultural, enquanto que, as mais pobres, lutam para atender o mínimo necessário, e muitas vezes não conseguem suprir o atendimento básico de seus habitantes.

O IDH está atrelado diretamente com a pegada ecológica porque traduz todos os recursos que determinado país ou região retiram da Terra para suprir as demandas do padrão de vida da população, assim como as reservas de áreas protegidas para preservar a qualidade ambiental. A Figura 2.3 ilustra com propriedade essa relação.

Figura 2.3 – Índice de desenvolvimento humano e a pegada ecológica



Fonte: Louette (2007).

Desta forma, a indústria da construção possui um papel preponderante na busca pelo desenvolvimento sustentável tendo em vista que é uma das principais responsáveis pela geração de GEE, bem como resíduos sólidos. Para Agopyan e John (2011), ela pode ser apontada como o “vilão da natureza”, pois tem um crescimento previsto de 2,5 em nível mundial entre 2010 e 2050. Segundo o Department of Business Innovation and Skills - DBIS (2010) a construção civil representava 47% de todas as emissões no Reino Unido e 39% nos Estados Unidos. A Global Alliance for Buildings and Construction, GABC (2019) estima que aproximadamente 25% dos GEE são emitidos pela indústria da construção, em todo o planeta.

2.3 AQUECIMENTO GLOBAL E A PRODUÇÃO DE CP E CONCRETO

O carro-chefe da construção civil é o CP porque, praticamente, não há obra que, em alguma de suas fases, não o utilize seja como concreto em suas variadas formas: a) concreto

convencional ou especial; b) argamassas de assentamento; c) de revestimentos; d) de pavimentações ou outros produtos derivados.

A sociedade moderna não pode se desenvolver sem esse aglomerante vital. Tomando-se a produção mundial de CP, 4,1 bilhões de toneladas (STATISTA, 2020) e a população do planeta, aproximadamente, 8 bilhões de habitantes (WORLDMETERS, 2020), correspondendo a cerca de 525 kg de CP por habitante.ano⁻¹ ou 1,44 kg.dia⁻¹, quase o dobro da produção mundial de alimentos (ALVES, 2013).

A emissão mundial de CO₂ originado pela fabricação do CP é, aproximadamente, de 850 kg.ton⁻¹ enquanto que as fábricas brasileiras, por serem mais modernas e eficientes, esse valor reduz-se para 600 kg.ton⁻¹ ou mesmo abaixo em algumas unidades mais modernas.

A indústria cimenteira produz entre 5% e 7% de todas as emissões de CO₂ que contribuem para os GEE, representando um número relevante frente à grandeza mundial da sua produção, com os respectivos efeitos no aumento da temperatura do globo terrestre pelo efeito estufa, derretimento de geleiras, furacões, maremotos e outros desastres naturais. (GCCA, 2017).

Os agregados que compõe o concreto representam próximo de 80% da sua massa total, ficando a cargo do CP e demais ligantes uma parcela ao redor de 20%. Apesar da contribuição do CP não ser tão relevante na massa total do concreto o mesmo contribui com 70% das emissões de NO_x e 80% das emissões de CO₂. As emissões são aumentadas para 75% e 85% no caso de concretos não armados (VARES; HAKKINEM, 1998).

Outros autores indicam que o clínquer é responsável por mais de 91% das emissões de CO₂ do concreto (KJELLEN et al., 2005). A disparidade apresentada nos números reflete o fato de que a produção de uma tonelada de clínquer emite teores variados entre as diversas unidades de fabricação ao redor do mundo (GARTNER, 2004; HUMPHREY; MAHASENAN, 2002; YAMAMOTO et al., 1997), conforme pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Variações das emissões de CO₂, relacionadas à produção de clínquer

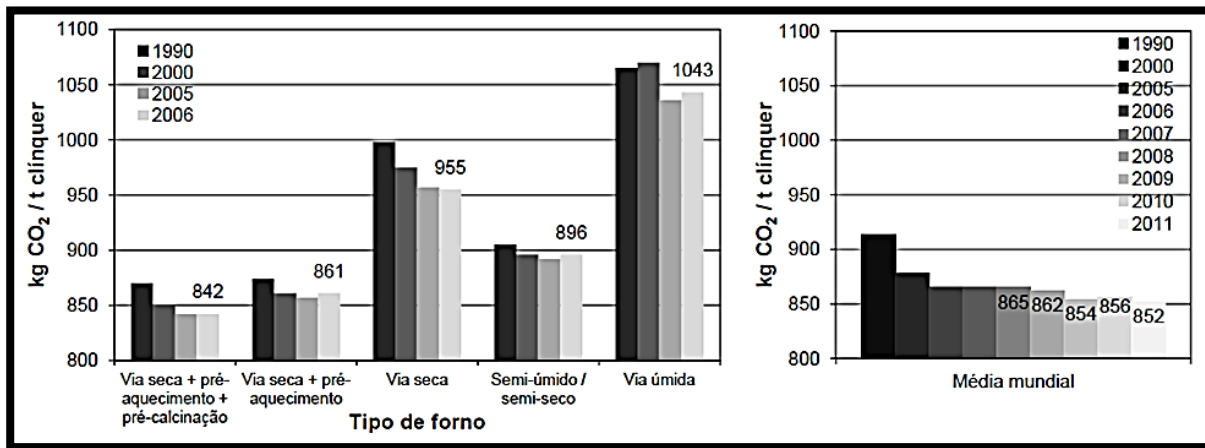
Autor	Kg CO ₂ por ton de clínquer produzida
Yamamoto et al. (1997)	824 a 1152
Humphrey e Mahasenan (2002)	870
Gartner (2004)	859

Fonte: Daminieli (2013).

Grande parte dos produtores de CP, inclusive no Brasil, tem migrado o sistema de produção para métodos mais eficientes como a via seca com pré-aquecimento e pré-calcinação.

Estima-se que mais de 68% das empresas cimenteiras já optou pela via seca com pré-aquecimento e pré-calcinação. Tomando como base estes dados, na atualidade, já existe pouco espaço de manobra para a diminuição das emissões de CO₂ como mostrado na Figura 2.4 (VISED0; PECCHIO, 2019).

Figura 2.4 – Medida das emissões de CO₂.ton⁻¹ de clínquer: a) divididas por forno e ano e b) média mundial

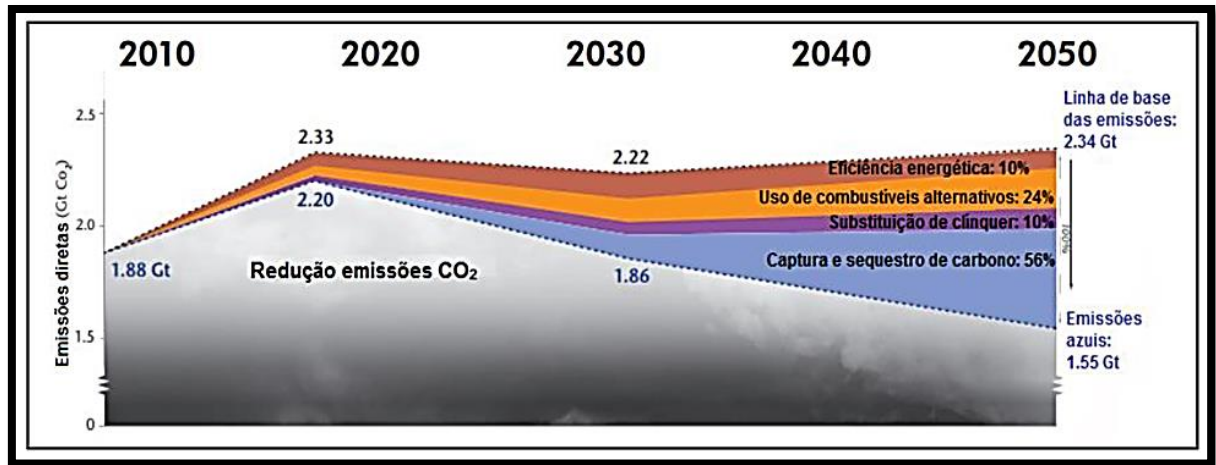


Fonte: WBCSD (2017).

Com o passar do tempo, novas tecnologias para produção de clínquer tem apontado para a redução das emissões de CO₂. Com isso, a margem para novos ganhos na redução das emissões de CO₂ na produção de CP vão diminuindo, o que leva a busca de outros meios para minimizar seu impacto na cadeia produtiva do CP, em especial na substituição do clínquer por outros materiais cimentícios ou AM inertes.

Conforme pode ser visto na Figura 2.5, entre as diversas opções para a redução das emissões de CO₂, no âmbito da indústria cimenteira, destaca-se a eficiência energética, combustíveis alternativos, substituição do clínquer por AM e captura e sequestro de Carbono (IEA, 2020).

Tanto a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos bem como a substituição do clínquer, já vem sendo utilizados como uma maneira de diminuir as emissões de CO₂, de modo mais ou menos relevante dependendo da disponibilidade de recursos e tecnologias de cada produtor.

Figura 2.5 – Opções para a redução de CO₂ na indústria cimenteira

Fonte: Adaptado de IEA (2020).

Quanto à captura e sequestro de Carbono (CSC), apesar de sua eficácia, seu impacto nos custos de produção seria elevado, algo em torno de USD 40 a 250 por tonelada de CO₂ capturado (ANDERSON; NEWELL, 2003; HOENIG et al., 2007).

Como consequência o custo final do CP seria impactado em valores não compatíveis para os países em desenvolvimento, os quais necessitam de um custo adequado para financiar a expansão de sua infraestrutura. Outro aspecto importante da diminuição relativa das emissões de CO₂ do CP, levando-se em conta o cenário da necessidade de expansão da sua produção, pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Emissões de CO₂ por tonelada de clínquer

Ano	2012	2015	2020	2025	2030	2050
Teor de clínquer	0,77	0,76	0,74	0,735	0,73	0,71
kg CO ₂ .t ⁻¹ CP	750	660	620	590	560	420
kg CO ₂ .t ⁻¹ clínquer	974	868	837	802	767	591

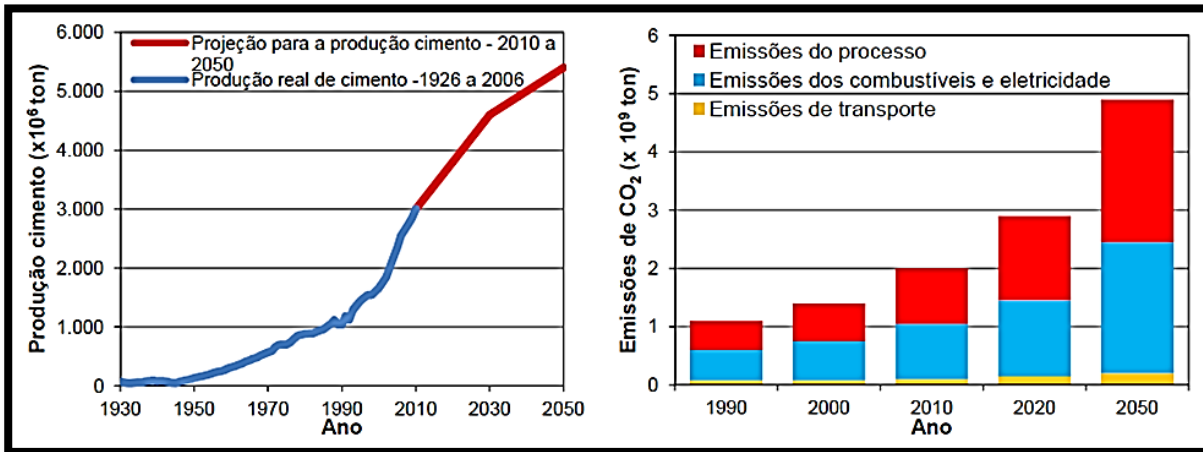
Fonte: IEA (2020).

A tendência atual é de diminuição do teor médio global de clínquer no CP, pelo uso de outras AM ou aglomerantes como, também, a emissão de CO₂ por tonelada de clínquer produzido, pelo uso de equipamentos mais eficientes no processo de produção.

Conforme Tabela 2.3 a diminuição na emissão de CO₂ na produção de CP deverá ser confrontada com o aumento da produção a qual deverá ocorrer, principalmente, devido à

necessidade do aumento da infraestrutura básica nos países em desenvolvimento como pode ser observado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – a) histórico de produção de CP mundial e estiva de evolução até 2050 e b) estimativa de emissões de GEE da produção de CP – 1990 a 2050



Fonte: WBCSD (2017).

As questões de emissões de CO₂ relacionadas à cadeia produtiva do CP não podem ser reduzidas a simples busca de uma produção com menos emissão, mas sim a procura por soluções integradas em toda a cadeia.

A necessidade, em especial dos países em desenvolvimento, requer a procura de soluções que possam satisfazer a demanda pelo uso do CP sem comprometer aumento de sua infraestrutura.

2.4 AQUECIMENTO GLOBAL E AS AM NA PRODUÇÃO DE CP

O CP é um ligante hidráulico composto de clínquer Portland, produto da calcinação, em forno rotativo, de Calcário, Argila e minério de Ferro a temperatura de $\approx 1.450^{\circ}\text{C}$ que, após o resfriamento, é moído com Sulfato de Cálcio e eventuais adições ativas ou inertes. As fontes de emissão de CO₂ provêm da calcinação do Calcário, da Argila, do combustível e da energia elétrica, enquanto as adições ativas (*pozolanas, escórias ou outros aglomerantes*) ou inertes (*fileres*) proporcionam características específicas aos diversos tipos de CP diminuindo, o efeito danoso dos GEE na atmosfera. Quanto maiores os teores de AM no CP, menores serão os teores de clínquer, tornando-o mais sustentável pelo menor consumo de recursos

naturais, de energia, e, em contrapartida, mais elevada será a incorporação de coprodutos e a minoração das emissões de CO₂.

O FC, EAF e a CV constituem cerca de 20% das AM que substituem o clínquer de CP na atualidade. Existe uma limitação na oferta de EAF e CV de qualidade adequada. Estudos apontam para uma disponibilidade de 15% a 25% do consumo em CP e, provavelmente, não aumentarão. Recentemente, foi proposto à utilização combinada e otimizada de argilas calcinadas com pedra calcária moída como sendo um novo sistema alternativo para utilização de AM.

A nova proposta baseia-se na ampla disponibilidade dos materiais constituintes os quais são relativamente baratos e possibilitam combinações adequadas de AM. Possuem capacidade de substituição de 50% do clínquer mantendo o desempenho similar ao dos CPs existentes. Outro aspecto a ser destacado, nesta nova tecnologia, diz respeito à possibilidade de substituição de AM relevantemente maiores do que a média adotada atualmente (6%).

Aliado a tudo isto obtém-se um concreto com baixa demanda de água tendo em vista o controle do tamanho das partículas e a mistura de dispersantes. Para algumas aplicações é possível substituições de clínquer acima dos 50% oferecendo um desempenho satisfatório. Como exemplo, do ponto de vista da sustentabilidade, a substituição do clínquer por 40% de AM, nesta nova tecnologia, poderia evitar, até, 400 milhões de toneladas de emissões de CO₂ anualmente.

Não há como negar que seja considerável o impacto ambiental da indústria do CP, contudo uma redução nas emissões globais de CO₂ é possível com o uso de AM ou outro tipo de aglomerante. Um estudo envolvendo líderes empresariais e acadêmicos destacou os materiais de construção como uma das sete tecnologias mais promissoras para investimentos (*juntamente com energia eólica, biocombustíveis, energia fotovoltaica, concentração de energia solar, nuclear e eficiência de construção*) (GIGATON THROWDOWN, 2009).

O estudo concluiu que a maior oportunidade de redução de CO₂ consiste em um CP de baixo Carbono. Esta oportunidade poderia gerar uma economia anual de 1 bilhão de toneladas de CO₂. Para tanto haveria a necessidade de substituição de 50% do CP nos concretos por uma alternativa de baixo Carbono (CELIK et al., 2015).

Contudo, para que se possa alcançar o nível de redução de CO₂ proposto à indústria deve adotar uma nova abordagem. Ela deverá ser inovadora, abrangente e integrada e necessariamente deverá envolver: a) o uso de menos concreto para novas estruturas; b) consumo de menos CP em misturas de concreto; c) uso de menos clínquer na fabricação de CP.

De acordo com a USGS (2020) seriam necessárias cerca de 1,7 bilhão de toneladas de AM para a substituição de metade do CP. Por muito tempo o concreto com incorporação de CV tem sido utilizado com sucesso. Entre seus inúmeros benefícios, em relação ao concreto convencional (*sem CV*), destacam-se as vantagens técnicas e ambientais (MEHTA, 2010).

Contudo tem-se uma disponibilidade global de CV de, aproximadamente, 800 milhões de toneladas, significando menos de 50% do total de AM necessárias. Desta maneira, devem ser introduzidos no “*sistema*”, de forma cada vez mais frequente, outros materiais como o FC e a CH. Desta forma, os FC têm sido cada vez mais empregados nas fábricas de CP sendo moídos juntamente com o clínquer, tendo em vista que são encontrados em quase todos os lugares do mundo, conferindo boas características reológicas aos concretos frescos e, principalmente, diminuindo o custo por serem produtos baratos e de baixa emissão de Carbono.

A produção mundial de FC em 2016 foi de 350 milhões de toneladas (USGS, 2017) e, no Brasil, 32,5 milhões de toneladas de reservas lavráveis (*3,6 milhões no RS*), sendo a indústria do CP e a agricultura os maiores destinos deste mineral moído sob a forma de FC.

Pesquisas atuais direcionam para o aumento do uso do FC em substituição ao CP em teores maiores que os previstos em normas, inclusive em misturas ternárias e quaternárias com pozolanas e/ou CH, com o intuito de se obter concretos mais resistentes, sustentáveis e de custo unitário mais barato, sem perda de suas características de durabilidade. Sob o ponto de vista da sustentabilidade, a incorporação do FC no CP possui grande relevância em relação às outras AM ou pozolanas, porque é inerte, pouco contribui para as emissões de GEE, possui baixo custo e, geralmente, estão disponíveis em jazidas próximas às fábricas de CP.

De outro lado, as adições ativas (*pozolanas e escórias*) têm seu uso difundido no mercado de CP atual por meio dos CPIII (*com EAF*) e CPIV (*com CV*), ou mesmo com adição no CPV-ARI por parte de empresas de concreto pré-misturado.

Em se tratando de mercado regional (*RS*) a principal substituição do clínquer ocorre pela CV (*CPIV*). No RS a CV provém da queima do carvão em usinas termoelétricas como a de Candiota que produz aproximadamente $976.920 \text{ toneladas.ano}^{-1}$ conforme Rhode e Machado (2016). Desta forma, a utilização da CV incorporada no CP pode ser considerada uma boa solução, do ponto de vista ambiental, pois fornece utilização para um resíduo tóxico que pode causar tanto a poluição do solo como da água.

Pelo exposto, a disponibilidade conjunta de FC, CV e CH é um grande atrativo para que esses materiais minerais sejam utilizados em substituição/adição ao clínquer no CP, visto

que o emprego dessas misturas ternárias e quaternárias, em concretos ou seus derivados, melhoram as propriedades mecânicas, de durabilidade e diminuem as emissões dos GEE.

2.4.1 A sustentabilidade do FC

Entre as AM observa-se a limitação da oferta de CV e EAF que irão representar menos de 20% da demanda global de CP até 2050. A partir da crise do petróleo na década de 1970 iniciaram os estudos para a utilização do FC como substituto do clínquer e, a partir da década de 1990, foi padronizado como substituição parcial (KIEGER; HOOTON, 1990; MAYFIELD, 1988).

As taxas de redução de CO₂ na produção do CP são proporcionais à substituição de FC, tendo em vista que não requer calcinação. Com a utilização do FC, há uma redução na energia térmica consumida, bem como uma diminuição nas emissões de CO₂ e, também, um aumento da vida útil das jazidas de matérias-primas. Também se destaca o fato que a diminuição na emissão de CO₂, tornou-se uma parte comercial do produto CP.

Com a utilização do FC, menos clínquer deve ser produzido, assim sua utilização constitui-se em uma solução que agrega aspectos técnicos e de sustentabilidade. Com isso, para uma dada quantidade de CP há um consumo menor de energia, bem como são mitigadas parte das emissões de GEE. Duas são as principais fontes de emissões de CO₂ na indústria cimenteira. A primeira é a calcinação do Calcário, principal ingrediente bruto para a fabricação do clínquer e, a segunda, o consumo de combustível fóssil para aquecer as matérias-primas até a temperatura necessária para a formação do clínquer.

O Calcário possui cerca de 50% em massa de CO₂, sendo a liberação deste gás, no processo de calcinação, o responsável por 60% das emissões CO₂ produzidas em uma fábrica de CP as quais são mitigadas, em parte, por ocasião da utilização de FC. É fato que esta diminuição, também, pode ser obtida com o uso de CV e EAF, embora a utilização do FC possua um “*bônus ambiental*”, pois está prontamente disponível em todas as fábricas de CP do mundo, quando comparada com outras AM.

Outro impacto ambiental positivo, na substituição do clínquer por FC, é a menor demanda de matéria-prima, reduzindo conseqüentemente o consumo de recursos naturais. Em média, são necessárias de 1,3 a 1,4 toneladas de matérias-primas para a produção de 1 tonelada de CP, enquanto que, com a utilização do FC, há uma redução de, pelo menos, 10% no consumo de matérias-primas.

Desde o início da década de 1990 a utilização de CP contendo FC na Europa teve um aumento de 4 vezes, entre os fatores que explicam o incremento na demanda, destacam-se os suprimentos limitados de materiais cimentícios tradicionais, como CV e EAF e o custo relativo do FC (DAMTOFT et al., 2008).

As sinergias entre clínquer, FC, CV e CH devem ser amplamente exploradas para maximizar os níveis de substituição. Estudos apontam que a média atual de utilização de clínquer em relação ao CP na União Europeia é de 73,7%. Estima-se que o limite teórico para a substituição de clínquer usando combinações de FC e AM tradicionais seja de 40% antes que o desempenho do concreto seja afetado. Para que isso seja alcançado, globalmente, provavelmente o nível de substituição por FC precisará ser aumentado em 20%, na média (HERFORT, 2008).

O relatório da IEA (2020) mostra que a disponibilidade de EAF ou CV para suprir a produção de CP em 2050, superior a 5 bilhões de toneladas, representará menos de 20% da demanda por AM em substituição ao clínquer. O FC tem sido a solução mais utilizada por apresentar grande disponibilidade, estando seu uso regulamentado por normas internacionais, por ser inerte participando pouco nas reações químicas, não requerendo custos adicionais de energia. O seu efeito adverso é diminuir, proporcionalmente, o teor de ligante e, mesmo que o teor de água permaneça constante, promove um decréscimo na resistência mecânica que, atualmente, é resolvido com a produção de CPs com finura mais elevada.

O FC encontra-se sob a forma de: a) Calcita, Carbonato de Cálcio, com moléculas arranjadas com geometria cristalina trigonal-romboédrica, b) Dolomita, Carbonato de Cálcio e Magnésio, com sistema predominante de cristais romboédricos; c) Aragonita, Carbonato de Cálcio sob a forma de cristais ortorrômbicos metaestáveis. Os mais utilizados são os dois primeiros, sendo que para uso como AM, estudos revelam que a Calcita apresenta melhor desempenho, seguida da Dolomita, nas características reológicas e propriedades mecânicas.

Há ainda grande disponibilidade para aumentar a aplicação do FC em moagem conjunta com o clínquer, porque a média mundial de, apenas, 7%, tem potencialidade para aumentar, dos atuais 5% empregada nos países em desenvolvimento, para até 35% como na União Europeia.

À medida que aumenta o teor de FC, em substituição ao clínquer, sem tomar as devidas providências técnicas, os produtos de hidratação do CP decrescem e um CP do tipo CP40 cai para o tipo CP32. Entretanto, existe a possibilidade, até um dado limite, de aumentar o teor de FC sem perda das propriedades físicas e mecânicas por meio de inter moagem

conjunta por maior tempo, para aumentar a finura e, assim, compensar a diminuição do aglutinante na mistura.

Também há a possibilidade da moagem em separado do FC, o que pode resultar em partículas mais finas que as do CP. Caso a substituição seja em igualdade de massa, há pequeno aumento no volume de pasta devido à maior massa específica do CP, melhorando o seu comportamento reológico, o que permite reduzir, em parte, o fator a/ag e, por meio do efeito de nucleação, aumentar o teor de hidratação nas idades iniciais (JOHN et al., 2018). Esse comportamento pode acarretar benefícios ou pequena redução de desempenho, para teores de FC que não superem 20% de substituição do CP (DE WEERDT, 2007).

A literatura cita níveis de substituição entre 10% e 20% de FC em concretos, porque neste intervalo há um desempenho técnico adequado, semelhante as características das misturas elaboradas somente com CP. É relatada melhora da eficiência do FC na fase de ligação pasta/agregado, devido ao tamanho de partículas mais finas.

2.4.2 A sustentabilidade da CV

A transformação de resíduos industriais em coprodutos úteis à sociedade tem como um bom exemplo à utilização da CV, oriunda da queima do carvão mineral em termelétricas, como substituição do clínquer. A produção mundial de cinzas provenientes da queima do carvão ultrapassa os 800 milhões de toneladas, sendo no Brasil, 1,7 milhões de toneladas. Deste total, 80% constituem em cinza leve ou volante e 20% em cinza pesada ou de fundo. As usinas termelétricas são responsáveis por 90% desta geração, enquanto que o restante é produzido por empresas de pequeno e grande porte (*indústria de celulose e petroquímica*) (ROHDE et al., 2006).

Apesar da grande produção de CV, 30% tem uma destinação útil, principalmente ao considerar sua utilização na produção de CP como substituto do clínquer. O restante das CV, não utilizadas, são dispostas em bacias de rejeitos ou utilizadas para recompor minas de carvão desativadas. Considerando que apenas 30% das CV são reaproveitadas, são necessárias constantes investigações de caráter técnico-científico no intuito de desenvolver tecnologias inovadoras para o reaproveitamento, em maior escala, deste resíduo (PAPROCKI et al., 2008). A disposição inadequada da CV acarreta um impacto ambiental em relação: a) a poluição do ar com os particulados leves e emissão de CO₂; b) a poluição do solo e água, no caso de uma disposição final inadequada dos resíduos sólidos gerados. Desta maneira, as CV são consideradas materiais antropogênicos de alta complexidade (RAM; MASTO, 2014).

Outro aspecto a ser considerado, diz respeito à sua composição química. A CV contém 26 elementos que são considerados de interesse ambiental, entre eles: Arsênio (*As*), Cádmio (*Cd*), Mercúrio (*Hg*), Chumbo (*Pb*) e Selênio (*Se*), que estão entre os maiores causadores de impactos ambientais (SWAMY, 1990). Além do Alumínio (*Al*), com toxicidade para plantas e mamíferos e que está associado a doenças neurológicas como Alzheimer (HUHEEY et al., 2008). Entre os responsáveis pelo potencial tóxico da CV estão os elementos traço tais como: Zinco (*Zn*), Cobre (*Cu*), Chumbo (*Pb*), Cromo (*Cr*), Mercúrio (*Hg*) e Fósforo (*P*).

A utilização da CV traz um benefício ao meio ambiente, pois é mitigada a degradação ambiental e os custos energéticos associados à mineração das matérias primas virgens. Estudo realizado por Siqueira (2011), constatou que para cada tonelada de CV usadas no lugar do CP, cerca de uma tonelada de CO₂ é impedida de entrar em contato com a atmosfera. Logo, a utilização da CV, como parte integrante da cadeia produtiva do CP, propicia sustentabilidade ambiental, tendo em vista uma redução na concentração de poluentes.

Com respeito aos aspectos econômico-ambientais a utilização da CV integrada à cadeia produtiva do CP constitui uma maneira de diminuir custos e incrementar a eficiência da produção. Outro aspecto a ser considerado diz respeito à substituição parcial do clínquer na produção do CP o que diminui as emissões de CO₂ podendo gerar créditos de Carbono que são certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa que possuem um determinado valor monetário e um mercado específico para comércio (SEBRAE, 2019). O Protocolo de Kyoto, assinado pelo Brasil, em 1997, estabeleceu mecanismos de valoração da poluição (*créditos de Carbono*) em relação à diminuição das emissões de CO₂ (BRASIL, 2020a).

Mehta e Monteiro (2014) discorrem sobre as vantagens econômico-ambientais da substituição do clínquer pela CV. Do ponto de vista econômico há a troca de um produto nobre (*clínquer*), por um subproduto (*CV*). Do ponto de vista ambiental há um ganho, na medida em que se utiliza a CV que de outra maneira seria descartada no meio ambiente. Assim, ocorre uma diminuição no consumo de energia, um incremento na proteção do meio ambiente e a conservação dos recursos naturais, bem como um aumento da estanqueidade e durabilidade da estrutura de concreto, devido ao refinamento dos poros (ISAIA, 1995).

Pode-se considerar que a emissão de CO₂ na moagem, transporte e secagem da CV, por ocasião da substituição no CP, é bastante reduzida. Desta forma, a alocação de CO₂ da CV na produção de CP pode ser considerada muito pequena, sendo esta hipótese a mais aceita segundo as técnicas de ACV (BRASIL, 2010; DAMINELI et al., 2010).

2.4.3 A sustentabilidade da CH

Conforme John et al. (2014) o processo de produção da CH, como um todo, libera 547 kg de CO₂ por tonelada de produto e consome cerca de 0,5 GJ de energia, sendo que o CP emite, em média, no caso brasileiro, 600 kg de CO₂ por tonelada de CP e consome 2,5 GJ de energia (VISED; PECCHIO, 2019). Assim sendo, pode-se constatar que a CH emite, em média, 10% menos CO₂ e consome 80% menos de energia quando comparada ao CP.

Do ponto de vista da sustentabilidade a utilização da CH no concreto pode diminuir a emissão de CO₂ e o consumo de energia quanto comparado ao CP. Todavia os números, por si só, demonstram que a CH, quando comparada ao FC e CV, possui uma sustentabilidade reduzida. Por outro lado, a incorporação de CH em concretos com AM propiciam um significativo incremento na durabilidade (MIRA et al., 2002).

O aumento de durabilidade proporcionado pela adição de CH no concreto pode e deve ser considerado do ponto de vista da sustentabilidade, pois, sabe-se que construções mais duráveis implicam em um consumo menor de recursos naturais. A CH por ser um produto acessível e de custo adequado constitui-se em uma boa solução para os problemas técnicos advindos da utilização de elevados teores de AM no concreto, tendo em vista que estes materiais constituem-se em subprodutos (*CV, EAF, entre outros*), os quais são potencialmente poluidores do meio ambiente devido à dificuldade da sua adequada deposição no solo, em locais seguros que protejam os mananciais aquíferos.

A CH propicia efeitos físicos e químicos que resultam em uma microestrutura mais compacta da pasta cimentícia, diminuindo os mecanismos de transporte de fluidos através da rede de poros o que acarreta em aumento da durabilidade e desempenho global do concreto. Mira et al. (2002) observaram que a incorporação de CH em concretos com elevados teores de AM leva a um incremento na durabilidade e a formação de uma estrutura mais densa, resultando na minoração da carbonatação o que leva a um aumento da durabilidade.

Diante do exposto é possível constatar que a incorporação da CH em concretos com elevados teores de AM não se constitui por si só em um elemento que agregue uma elevada sustentabilidade as estruturas de concreto. Seu enfoque ambiental consiste em um meio para que as AM possam ser incorporadas ao concreto em teores mais elevados, garantindo, ao mesmo, aspectos técnicos e de durabilidade em níveis mais altos. Este efeito é decorrente do aumento da reserva alcalina da pasta cimentícia, com incremento na relação C/S, além de propiciar reações pozolânicas mais completas, com a formação de CSH secundário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AS ATIVIDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO FC

3.1.1 O efeito filer

O FC, por ser praticamente inerte e, geralmente, possuir alta superfície específica, exerce pouca interferência direta sobre as reações de hidratação do clínquer, entretanto, apresenta papel na microestrutura dos materiais cimentícios, por meio de efeitos físicos, especialmente quando moídos conjuntamente nas fábricas de CP resultando em aumento da sua finura. De acordo com Courard et al. (2018) o FC pode ser denominado de AM ou material cimentício suplementar quando apresentar superfície específica maior do que $400 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$.

Considera-se efeito físico quando a mera presença de material cimentício, ou mesmo AM inerte, interfere nas reações de hidratação do clínquer por meio do potencial elétrico superficial (BERODIER; SCRIVENER, 2015; SCRIVENER et al., 2015), também denominado potencial zeta.

Segundo os autores, este efeito apresenta dois componentes: a) o efeito diluição, para um mesmo fator a/ag, provocando mais espaços para a formação de compostos Hidratados e, portanto, maior grau de hidratação do que nas misturas sem substituição; b) maior quantidade de locais de nucleação provocada pela maior superfície específica dos materiais cimentícios, para a formação dos compostos Hidratados.

Embora este segundo efeito seja menor que o primeiro, para AM muito finas como a sílica ativa entre outras, verifica-se, nestes casos uma aceleração relevante na hidratação do clínquer.

3.1.2 O efeito diluição

A diluição acontece por ocasião da substituição de partículas de um material mais reativo, por outras de menor reatividade e/ou inerte, podendo causar efeitos negativos sobre a durabilidade e resistência mecânica (IRASSAR, 2009) devido à diminuição no teor de CP, levando a um aumento no fator água/cimento efetivo (IRASSAR et al., 2014).

Em consequência ocorre a diminuição dos produtos de hidratação, resultando na diminuição da resistência à compressão do concreto em todas as idades. Com isso, há redução

das vantagens oriundas das contribuições de natureza física do FC por ocasião de substituições acima dos 5% (AQEL; PANESAR, 2016). Abaixo de 5%, via de regra, não causam diminuição no desempenho do concreto conforme Hawkins et al. (2005).

Dentro de certos limites o aumento da finura do clínquer pode compensar o efeito de diluição porque o FC possui densidades entre 2,6 - 2,7 g.cm⁻³ e, sua substituição, em igualdade de massa, contribui para o incremento do volume de pasta, bem como para a distância de separação entre partículas.

Assim, parcialmente, são explicadas as melhorias no comportamento reológico do concreto, o que contribui para redução do fator *a/ag* para uma trabalhabilidade constante, ajudando a compensar os efeitos negativos da diluição (HAWKINS et al., 2005).

3.1.3 O efeito da nucleação heterogênea

A presença do FC modifica a cinética das reações dos grãos de CP, contribuindo para o aumento do grau de hidratação (KADRI; DUVAL, 2002). Com isso a nucleação heterogênea ocorre pela presença do FC, causada pelo menor tamanho das partículas que, ao preencherem os vazios, tendem a aumentar a densidade da mistura e contribuem para formação de pontos de nucleação para os produtos de hidratação.

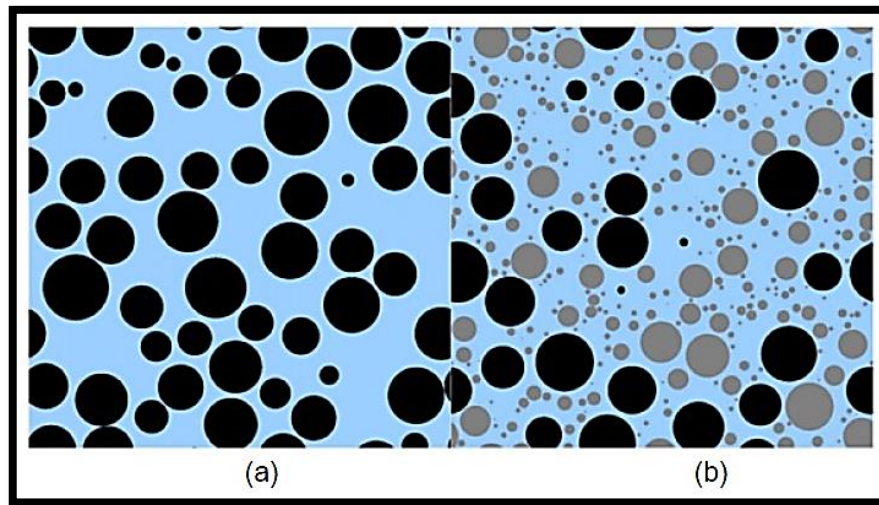
Desta forma o crescimento dos cristais ocorre não somente a partir da superfície dos grãos de CP mas, também, na superfície do FC, resultando em aumento nas reações e modificando a tipologia dos produtos de hidratação formados.

A partir da diminuição dos espaços, ocorre a formação de um grande número de cristais menores ao invés de reduzido número de cristais de tamanho grande (HEMALATHA; SANTHANAM, 2018; MEHDIPOUR et al., 2017).

A nucleação heterogênea baseia-se em dois fatores principais: a) maior espaço para alojar a formação de produtos de hidratação advindos da troca dos grãos de CP por FC que possuem tamanhos menores de partículas (Figura 3.1); b) disponibilização da superfície dos grãos de FC como local onde ocorre a precipitação, crescimento e desenvolvimento dos Hidratos.

A nucleação heterogênea constitui um processo, basicamente, físico que conduz a ativação química da hidratação do CP, que ocorre pela precipitação dos Hidratos sob as partículas de CP, catalisando, assim, o processo de hidratação (nucleação), pois reduz a barreira energética necessária para a ocorrência das reações de hidratação (LAWRENCE et al., 2003).

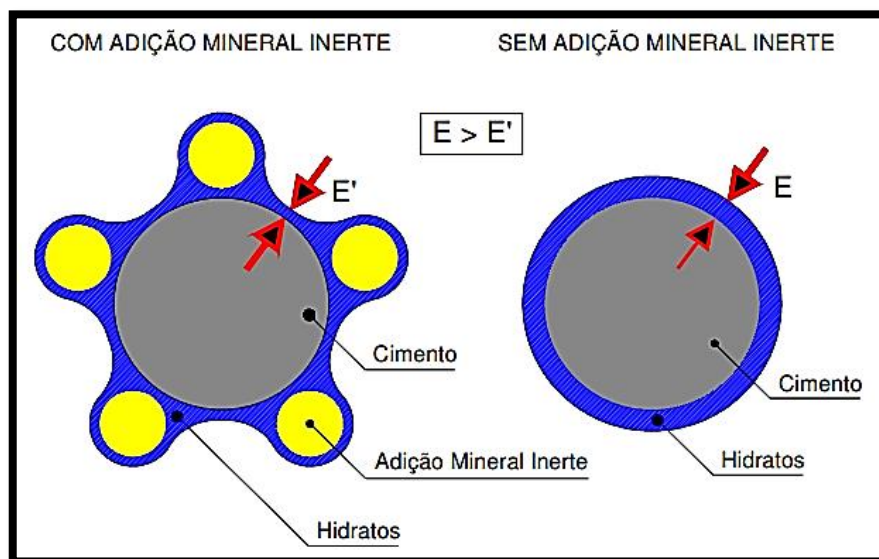
Figura 3.1 – Esquema da distribuição de partículas de um sistema contendo 100% de CP (a) e o sistema com 40% do CP substituído por uma AM (b)



Fonte: Scrivener et al. (2015).

O mecanismo da nucleação heterogênea, estudado por Lawrence et al. (2003) é visualizado na Figura 3.2, onde a menor espessura das películas formadas ao redor dos grãos de CP anidro, facilita a hidratação da camada subjacente (anidra). Desta forma, devido à menor espessura das partículas de FC, bem como a proximidade das mesmas com as partículas de CP, resulta no aumento na taxa de hidratação.

Figura 3.2 – Representação esquemática da hipótese sobre a majoração da hidratação do CP nas primeiras idades: (esq.) com AM inerte; (dir.) sem AM inerte

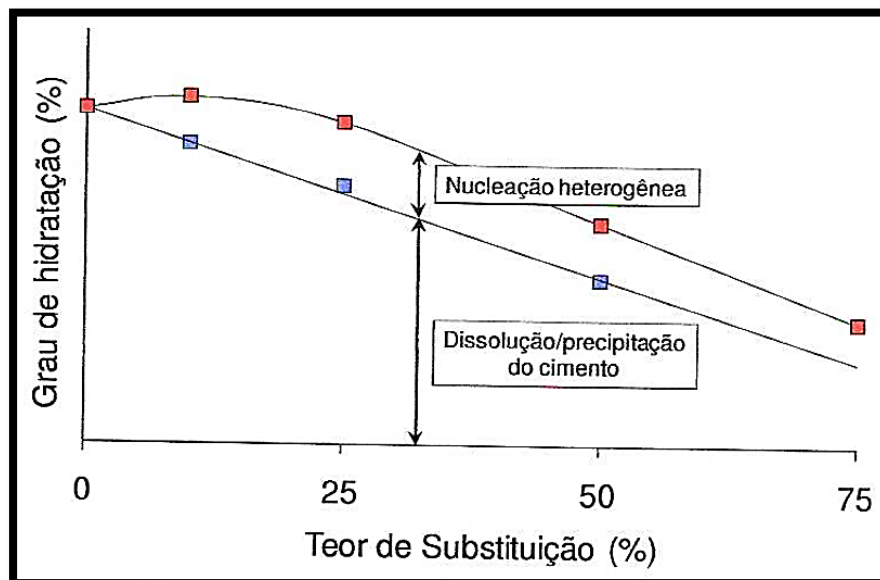


Fonte: Lawrence et al. (2003).

O estudo de Lawrence et al. (2003), apesar de coerente, constitui-se em um modelo que simplifica o fenômeno, visto que não considera, entre outros aspectos, a maior ou menor afinidade entre os grãos de CP e as partículas de FC. Além do aspecto relacionado com afinidade química e cristalográfica entre os dois tipos de partículas, o modelo não considera a tensão superficial inicial gerada na interface dos grãos de CP que se relacionam com as características do meio aquoso como densidade, pH, teor de álcalis, entre outros.

No trabalho de Lawrence et al. (2003) é possível observar as distintas contribuições relacionadas ao grau de hidratação tendo como premissa o teor de substituição do CP por FC. Deste modo é possível constatar o teor mais adequado de substituição para a obtenção da melhor eficiência, afim de que a cinética de hidratação seja alcançada em sua plenitude. Na Figura 3.3 pode-se constatar a tendência no incremento do grau de hidratação, a partir do teor de substituição do CP por FC. Entre os 25% e 30% no teor de substituição é possível observar o incremento máximo no grau de hidratação. Neste caso deve-se salientar que a área específica BET do FC constitui-se na responsável por determinar a amplitude do incremento, ou seja, quanto maior a finura do FC maior será o aumento no grau de hidratação (KADRI; DUVAL, 2002).

Figura 3.3 – Hidratos formados devido à nucleação heterogênea



Fonte: Lawrence et al. (2003).

Ao analisar a Figura 3.3 constata-se que valores acima de 30% implicam em diminuição do incremento marginal da hidratação. Com isso a nucleação heterogênea pode

levar a um aumento na resistência à compressão em idades iniciais, que pode ser semelhante e/ou maior do que aqueles concretos sem a substituição de FC (KRISHNAN et al., 2018; MEDJIGBODO et al., 2018).

3.1.4 As reações de hidratação

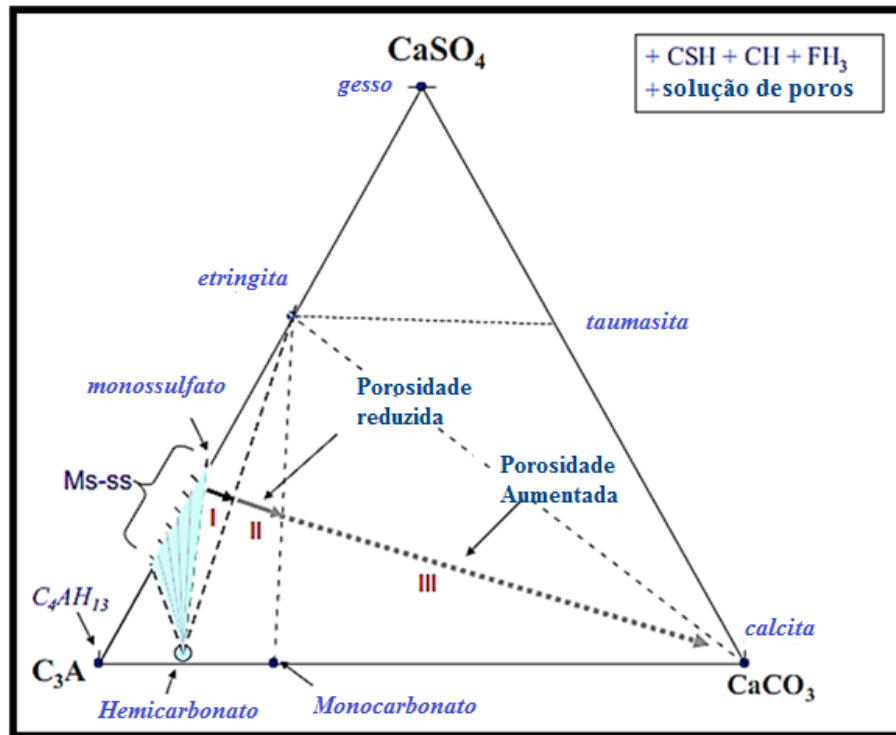
No caso do FC, diferente das pozolanas, o efeito químico não decorre de atividade pozolânica, mas sim pela interação entre o FC ($CaCO_3$) e a alumina do CP presente, principalmente, no C_3A . Desta interação decorre a formação de uma nova fase denominada de Monocarboaluminato Hidratado. Bonavetti et al. (2003) explicam que, apesar do FC ser um material que, preponderantemente, interage de maneira física com o CP, apresenta, também, certa reatividade química ao participar da reação para a formação de Monocarboaluminatos ao substituir a gipsita. Bentz (2006) cita que a formação do Monocarboaluminato ocorre pela diminuição na formação do Monosulfoaluminato (*fase AFm*) que se constitui na fase normalmente formada na hidratação do CP.

Nos demais aspectos, as reações de hidratação do CP ocorrem de maneira normal, ou seja, a hidratação dos Silicatos para formação do CSH e da Portlandita. Contudo há uma aceleração na formação da Etringita por ocasião da presença do FC, sendo que formação da fase AFm (*Monosulfoaluminato*) passa a ser adiada ou não ocorrer, tendo em vista a grande concentração de Carbonato de Cálcio presente no sistema cimentício (BONAVETTI et al., 2001). A cinética desta mudança em relação aos CPs sem adição ocorre em função da troca de alguns íons sulfato por íons Carbonato quando da hidratação do C_3A conforme Vernet e Noworyta (1992).

As reações químicas mencionadas são descritas segundo a sequência a seguir: a) formação de Etringita por consumo do Monosulfato; b) quando o Monosulfato é exaurido forma-se Monocarboaluminato pelo consumo do Hemicarboaluminato; c) quando a fase Hemicarboaluminato é esgotada por Carbonato de Cálcio adicional, não reage embora permaneça como uma fase estável. As reações a) e b) resultam em preenchimento dos poros e redução da porosidade, enquanto quantidades adicionais de Carbonatos da reação aumentam a porosidade.

CPs que possuem maior quantidade de C_3A resultam na formação de mais Monocarboaluminato, possibilitando o consumo de maiores teores de Carbonato de Cálcio, antes de se atingir o limite necessário para que este aumente a porosidade da pasta cimentícia (COURARD et al., 2018) (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Sistema das fases hidratadas no subsistema ternário de $\text{CaSO}_4\text{-C}_3\text{A-CaCO}_3$



Fonte: Courard et al. (2018).

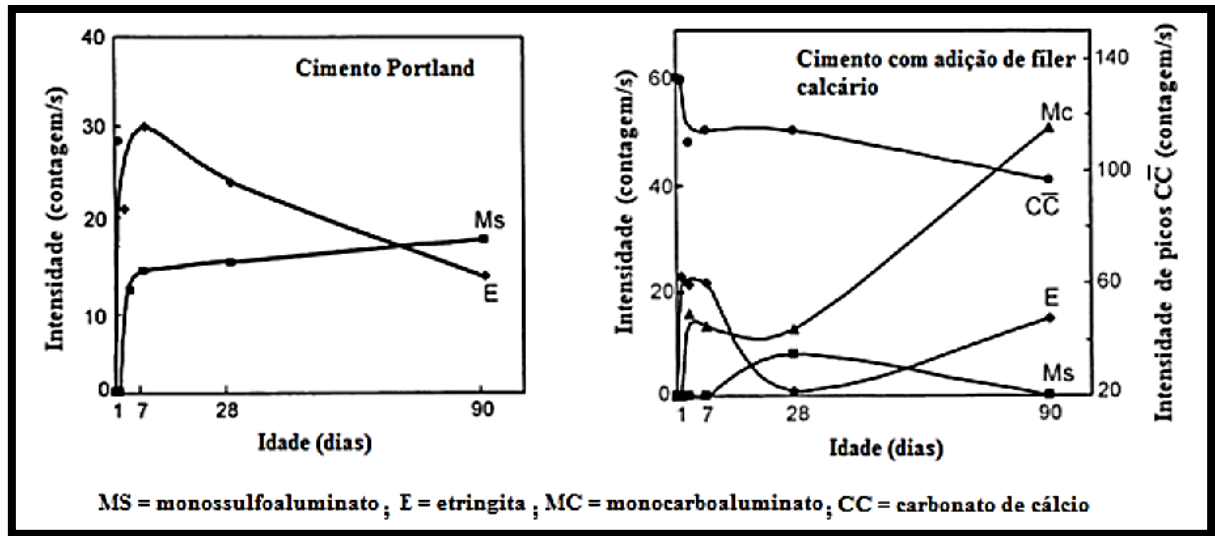
A Figura 3.4 mostra o sistema ternário $\text{C}_3\text{A-CaSO}_4\text{-CaCO}_3$ para o CP com FC, onde as fases neste subsistema estão em itálico e as regiões de estabilidade estão indicadas pelas três fases nas quais a composição de qualquer sistema de dados plotados dentro do diagrama. As fases excedentes são mostradas externas ao diagrama acima à direita.

Para melhor entendimento sobre as mudanças decorrentes da incorporação de FC na cinética da hidratação, Bonavetti et al. (2001) realizaram um experimento que consistiu na avaliação dos compostos em pastas de CP, por um período de 90 dias. Foram elaboradas duas pastas, a primeira somente de CP, e a segunda com 20% de substituição por FC. As pastas foram avaliadas por DRX, onde analisou-se a evolução da hidratação, Figura 3.5.

Em relação à pasta sem incorporação de FC foram constatados os produtos normalmente encontrados na hidratação do CP, ou seja, Etringita e Portlandita oriundos da hidratação dos Aluminatos e dos Silicatos. Foi observado aos 3 dias a transformação da Etringita em Monosulfoaluminato, o qual teve um progressivo incremento na concentração até os 90 dias.

Em relação à pasta com 20% de FC, observou-se uma estabilidade da Etringita até os 7 dias e, ato contínuo, a transformação em Monosulfoaluminato ocorrendo de maneira tardia; sendo que o Monocarboaluminato teve sua presença detectada já aos 3 dias de idade.

Figura 3.5 – Formação de compostos pela hidratação de CP com e sem substituição de FC



Fonte: Bonavetti et al. (2001).

Contudo somente aos 28 dias de idade, houve um incremento substantivo na concentração de Monocarboaluminato, o qual se deu, conjuntamente, por uma redução do Monossulfoaluminato. Os autores explicam que o incremento na concentração do composto Monocarboaluminato deveu-se a maior disponibilidade de íons Carbonato no sistema, sendo que os mesmos foram fornecidos pelo FC gerando, assim, a transformação de Monossulfoaluminato em Monocarboaluminato, tendo em vista que o segundo é mais estável que o primeiro. Com isso há uma reconversão do Monossulfoaluminato em Etringita, tendo em vista os íons sulfato liberados da decomposição do Monossulfoaluminato (BONAVETTI et al., 2001).

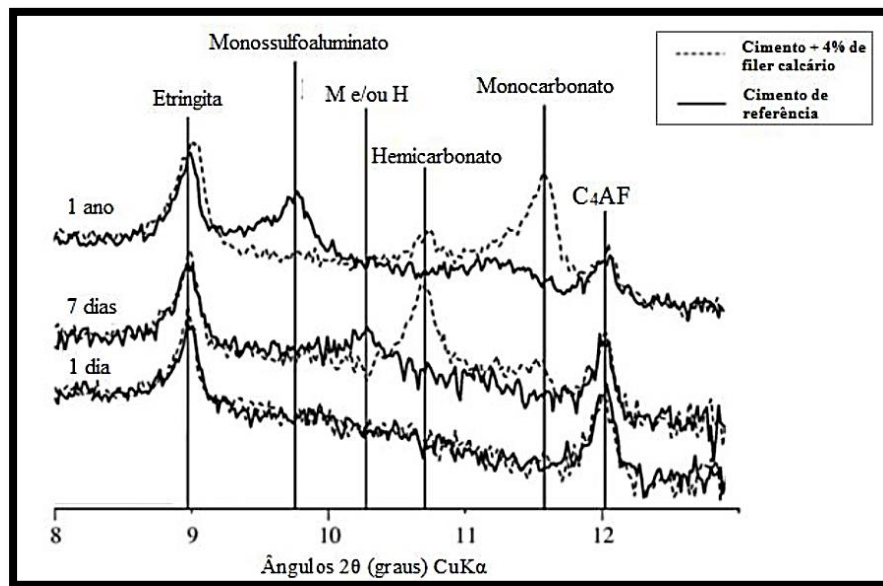
Na mesma linha dos autores citados anteriormente, Lothenbach et al. (2008) realizaram uma avaliação semelhante. Neste caso foi analisada a formação de novos compostos a partir da DRX, onde foram comparados um CP de referência denominado “PC” (sem FC) e outro denominado “PC4” com incorporação de 4% de FC.

Também neste estudo foi constatada a diminuição na concentração de Monossulfoaluminato em detrimento do Monocarboaluminato em virtude da presença de FC, conforme pode ser observado na Figura 3.6.

Além da formação do Monocarboaluminato, é possível observar a formação de outro composto denominado de Hemicarboaluminato. Conforme Antoni (2013) o surgimento desta nova fase ocorre devido a uma reduzida concentração de CaCO_3 no sistema.

Contudo Ipavec et al. (2011), colocam que o composto possui a característica de se tornar instável na presença de elevadas concentrações de CaCO_3 , sendo possível constatá-lo em idades iniciais onde o teor de Calcita é elevado, sendo que, a posteriori, é convertido em Monocarboaluminato na medida em que a reação de hidratação progride.

Figura 3.6 – Difratometria de raios-X para avaliação dos compostos formados a partir da hidratação de CP com e sem substituição de FC



Fonte: Lothenbach et al. (2008).

Pode-se dizer que as fases Carboaluminato Hidratado (*Mono e Hemi*) são devidas a fatores que se relacionam com a quantidade de alumina no sistema cimentício, bem como pela finura do material carbonático. É possível observar, neste tipo de sistema (*com incorporação de FC*), que a quantidade de Monocarboaluminato possui um viés de alta em todas as idades, isto ocorre devido ao elevado teor de alumina no CP (BARKER; CORY, 1991). Tanto Hawkins et al. (2005) como Stark et al. (1999), constataram que o potencial reativo do FC neste tipo de reação ocorreu em finuras mais elevadas.

No caso da contribuição química do FC, as vantagens não se dão apenas pela formação de novos compostos Hidratados como Carboaluminatos (*Mono e Hemi*), todavia pelo incremento que é dado ao volume final dos produtos Hidratados.

Este incremento está relacionado com a estabilização da Etringita a partir da formação do Monocarboaluminato, gerando com isso uma majoração do volume total da fase hidrata e por consequência uma diminuição da porosidade do sistema (LOTHENBACH et al., 2008).

3.1.5 A granulometria

As dimensões dos grãos e sua estrutura, caracterizados pela granulometria e superfície BET são uma das principais propriedades físicas que rege a reatividade do FC em misturas binárias, ternárias ou quaternárias em pastas cimentícias ou concretos. Estudos de Espining (2008) apontam para o destaque desta propriedade, cujas principais conclusões foram: a) a natureza física do melhor empacotamento, pela incorporação de FC, não só irá governar a fluidez do concreto mas, também, a resistência à compressão devido à matriz mais densa e melhor dispersão dos grãos de CP; b) o efeito da nucleação na resistência à compressão depende da afinidade do FC com os Hidratos do CP, e aumenta com a finura e a área superficial específica do FC; c) o FC com maior área BET tende a diminuir a fluidez do concreto, aumentando a retração autógena, diminuindo a evaporação e, conseqüentemente, diminuindo a tendência à fissuração plástica o que propicia uma maior resistência à compressão; d) um aumento da área BET, da ordem de $1.000 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$, implica na necessidade de inclusão de água adicional na ordem de 0,8% em massa para que a trabalhabilidade seja mantida, além de resultar em uma diminuição de 20% na retração plástica; f) a inclusão de água a fim de compensar um aumento da área BET (*Item b*), traz um aumento na fissuração e uma diminuição na resistência mecânica.

Pode-se dizer que existe uma correlação entre a finura e a potencialização dos efeitos físicos relacionados ao FC. Neste sentido Madani et al. (2016) constataram a influência positiva da utilização de FC ultrafinos na resistência à compressão dos concretos, sendo que, também, outras propriedades como durabilidade, permeabilidade aos cloretos e resistividade elétrica foram contempladas.

Estudos apontam para o papel de destaque da granulometria do FC (KUMAR et al., 2013; SUN et al., 2013) indicando que, à medida que a finura do FC aumenta, melhoram as propriedades do concreto; no entanto, outros estudos, indicam que há ganho na faixa de 5% a 10% de incorporação e em idades precoces (TSIVILIS et al., 1999). Nesta mesma direção pode-se citar o trabalho de Lawrence et al. (2005), onde foi comparada a resistência à compressão de CPs com substituição por FC e filer de quartzo com equivalência de tamanho nas partículas, sendo verificado que, a origem mineralógica, não constituiu um parâmetro relevante. Também foi verificada a obtenção de resistências à compressão muito próximas nas diversas idades de estudo (1, 2, 7, 28, 90 e 180 dias), sendo que houve correlação entre aumento da finura e aumento da resistência à compressão.

O trabalho de Tsivilis e Asprogerakas (2010) sugere uma relação entre o FC e a interface pasta/agregado de uma mistura, através da melhora na eficiência de empacotamento das partículas tendo em vista o grau da finura (*efeito filer*). Este fenômeno leva a uma redução na demanda de água, reduzindo assim a exsudação no concreto, ajudando no bloqueio dos poros capilares e contribuindo para a redução da penetrabilidade de fluidos.

3.2 AS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO COM FC

3.2.1 A trabalhabilidade

Um fator primordial na concepção de concretos com teores mais elevados de FC diz respeito à quantidade de água necessária para conferir uma consistência normal, com baixo fator a/ag (PROSKE et al., 2013). Para obter-se boa trabalhabilidade, com um reduzido fator a/ag, é necessário o uso de superplastificante de alto desempenho que, aliado a um empacotamento de partículas otimizado, contribui para a diminuição da demanda de água, acarretando minoração no teor de clínquer (PROSKE et al., 2014).

A adoção de fatores a/ag entorno de 0,35 constituem-se na chave para a confecção de concretos com substituição de FC, de até 50%, conforme Palm et al. (2016). Os autores concluem que baixos fatores a/ag constituem no mecanismo primordial para a viabilização de concretos com altos teores de substituição de CP por FC. Todavia os autores alertam que muitas propriedades do concreto fresco e endurecido dependem fortemente das propriedades físicas, ou seja, da área superficial específica BET e da composição química do FC.

É fundamental que seja propiciada ao concreto adequada trabalhabilidade, dependente do tipo e quantidade das AM utilizadas, no caso da incorporação de até 15% de FC, há possibilidade de aumentar a viscosidade, todavia com diminuição do atrito do fluxo de escoamento.

Assim a redução do fator a/ag será sempre condicionada pelas propriedades reológicas do concreto porque, com a diminuição da água, a viscosidade do concreto aumentará. Contudo um projeto de empacotamento otimizado pode reduzir a viscosidade plástica do concreto em um nível adequado, mesmo com baixo teor de água a alto teor de FC (PROSKE et al., 2013). El Barrak et al. (2009) demonstram que, a depender do fator a/ag, o FC possui menos influência na trabalhabilidade e age mais como agente lubrificante.

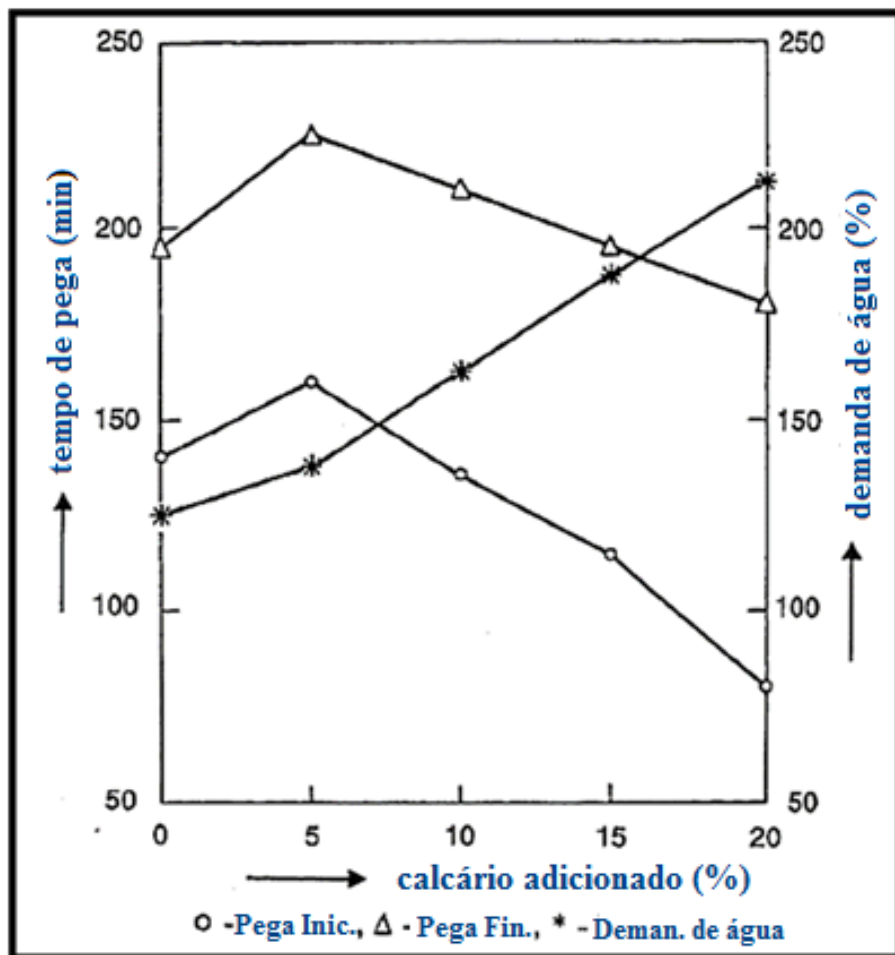
No trabalho de Bonavetti et al. (2003) foi realizada análise do grau de hidratação em pastas correlacionando-as com a resistência à compressão por ocasião da utilização de

reduzidos fatores a/ag (0,3 a 0,34). Conclui-se que, para a obtenção de uma mesma qualidade de pasta deve haver um aumento no percentual de FC, junto com diminuição do fator a/ag.

3.2.2 O tempo de pega

Hooton et al. (2007) apontam que a substituição do CP por FC pode trazer uma pequena modificação no tempo de pega para taxas normais de substituição (*até 15%*). Neste caso, dois são os fatores preponderantes na alteração do tempo de pega; a finura e a taxa de substituição, porque, à medida que a finura aumenta, a reatividade das reações de hidratação propiciam uma diminuição no tempo de pega.

Figura 3.7 – Demanda de água e configuração de pastas de CP com FC



Fonte: El-Didamony et al. (1995).

Quanto à taxa de substituição de CP por FC, Sahmaran et al. (2006) relatam um pequeno aumento no tempo de pega para substituições correntes (*até 15%*), enquanto que,

para taxas entre 15% e 30%, há diminuição no tempo de pega. El-Didamony et al. (1995) mostram que o aumento da substituição de FC diminuiu o tempo de pega em pastas de CP como pode ser observado na Figura 3.7.

Encontra-se na literatura uma opinião dominante de que a finura do FC influencia o tempo de pega das pastas de CP, contudo a extensão desta contribuição difere em vários estudos.

Vuk et al. (2001) estudaram pastas de CP com diferentes tipos e conteúdos de C_3S entre 0% e 5% de substituição por FC, sendo constatado uma diminuição nos tempos de pega inicial e final a partir do aumento da finura do FC, enquanto uma diminuição ocorreu, de maneira mais pronunciada, em CPs com baixa concentração de C_3S .

Tsivilis et al. (1999) chegaram à conclusão que o FC afetou o conjunto inicial e final do tempo de pega em menor grau, geralmente diminuindo à medida que a finura aumentava. Em outra direção Moir e Kelham (1999) constataram um aumento nos tempos iniciais de pega (*com 20% de substituição de FC*) com o aumento da finura.

3.2.3 O calor de hidratação

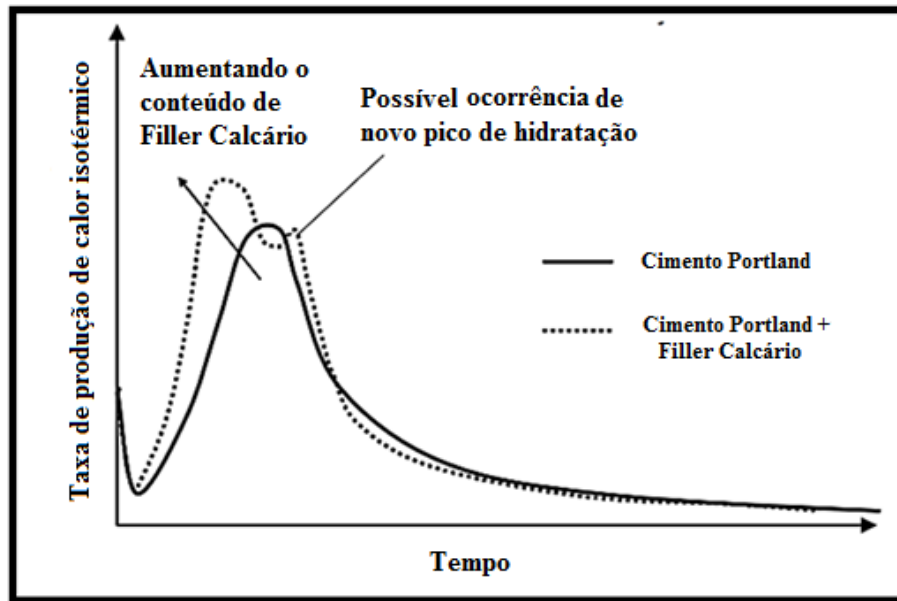
Por um lado, o aumento da taxa de substituição do clínquer faz com que haja diminuição em compostos importantes para a geração do calor de hidratação como C_3A e C_2S .

Por outro, o aumento da finura atua como local para a nucleação de Hidratos de CP, aumentando, assim, o calor de hidratação em idades precoces (STARK, 2004). Esta constatação foi demonstrada por Lothenbach et al. (2008) onde um cimento PC (*sem FC*) foi comparado com um cimento PC4 (*com 4% de substituição de FC*).

As amostras foram ensaiadas por calorimetria de condução isotérmica, sendo que o pico de evolução térmica foi verificado após 10h para o PC4 e 11h para o PC. Tal diferença nos picos de evolução térmica indica uma ligeira aceleração na hidratação do CP a partir da presença do FC.

O mesmo efeito, também, foi verificado por Schutter (2011), onde foi possível observar o efeito do FC sobre a hidratação do CP. Na Figura 3.8 é possível observar a taxa de produção de calor durante a hidratação em condições isotérmicas em concretos contendo FC. Com a incorporação de FC constata-se um aumento da nucleação e uma diminuição no período de indução, sendo que, neste caso, as reações de hidratação são aceleradas devido a presença da AM.

Figura 3.8 – Efeito do FC na hidratação do CP



Fonte: Schutter (2011).

Observa-se maior valor na taxa de produção de calor isotérmico no segundo pico, o qual aumenta por ocasião da diminuição da relação CP/FC, ou seja, quando há a presença de mais FC e menos CP. Também pode ser observado um terceiro pico de hidratação que pode ocorrer em algumas combinações de CP (*rico em C₃A*) e FC.

3.3 AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM FC

A porosidade dos materiais cimentícios depende da distribuição do tamanho dos poros, tortuosidade, superfície específica, microfissuras, conectividade dos poros, os quais são controlados pelo fator a/ag , distribuição de tamanho de partícula, idade da amostra e tipo de materiais constituintes, entre outros.

Conforme Duan et al. (2013) AM como o FC podem propiciar uma diminuição na porosidade dos concretos por meio do refinamento dos poros, em especial em fases posteriores a cura. O FC, por meio do efeito físico, propicia uma diminuição substancial no volume de poros trazendo deslocamento na distribuição dos seus tamanhos na direção dos pequenos diâmetros. Ocorre, então, a colmatação dos espaços entre as partículas de CP o que confere à pasta maior densidade com aumento de resistência mecânica.

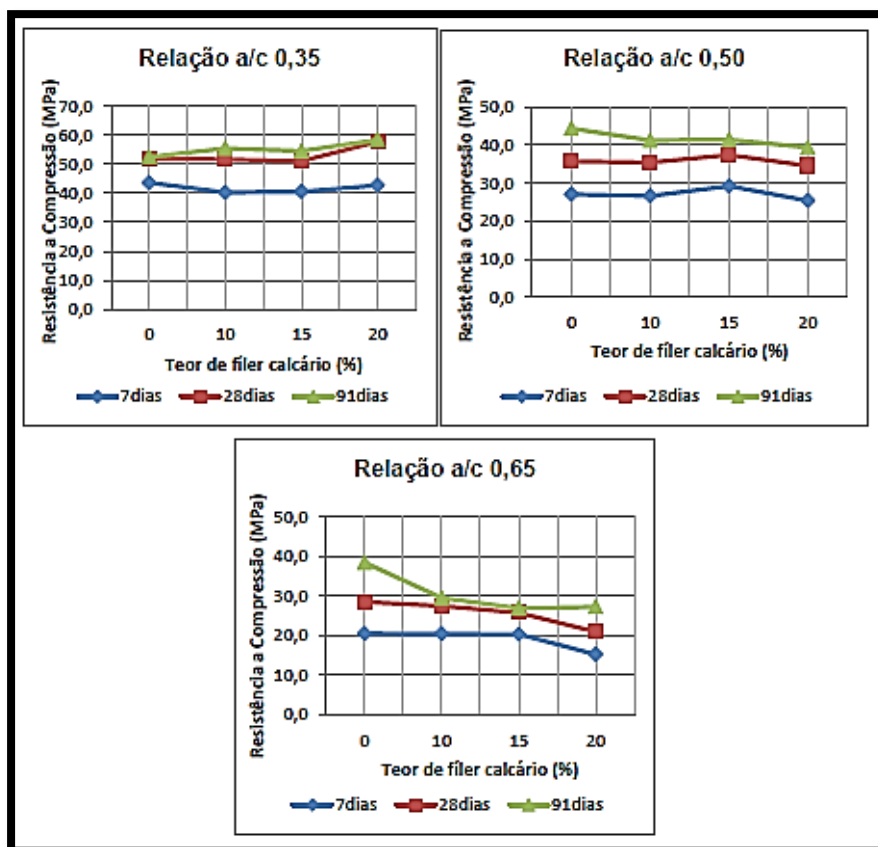
Nos estudos de Barbhuiya et al. (2015) que trabalharam com partículas muito finas de AM por meio da incorporação de metacaulim em pastas de CP, foi constatado menor

porosidade quando comparado com pastas sem metacaulim. O estudo destaca o efeito físico de empacotamento do metacaulim devido sua finura em relação ao CP da mesma forma que o FC. Outro aspecto levantado pelos autores diz respeito ao efeito bloqueador dos poros advindo do metacaulim que potencializa a redução da interconexão dos mesmos.

Ensaio de Lothenbach et al. (2008) atestam a contribuição do efeito físico/químico do FC na resistência do concreto por meio da diminuição da porosidade. Afirmam que a presença do FC contribui para a formação de Monocarboaluminatos que estabilizam a Etringita proporcionando um aumento de volume das fases hidratadas levando a redução da porosidade como um todo.

Soroka e Setter (1977) apontaram um incremento da resistência à compressão mesmo com o aumento da substituição de FC na massa de CP, devido ao efeito físico, ou seja, por um aumento na densidade da mistura. Da mesma forma Palm et al. (2016) concluíram que o FC não é um componente totalmente inerte e que a sua contribuição para a resistência à compressão também é notável sendo proporcional a quantidade de clínquer substituída.

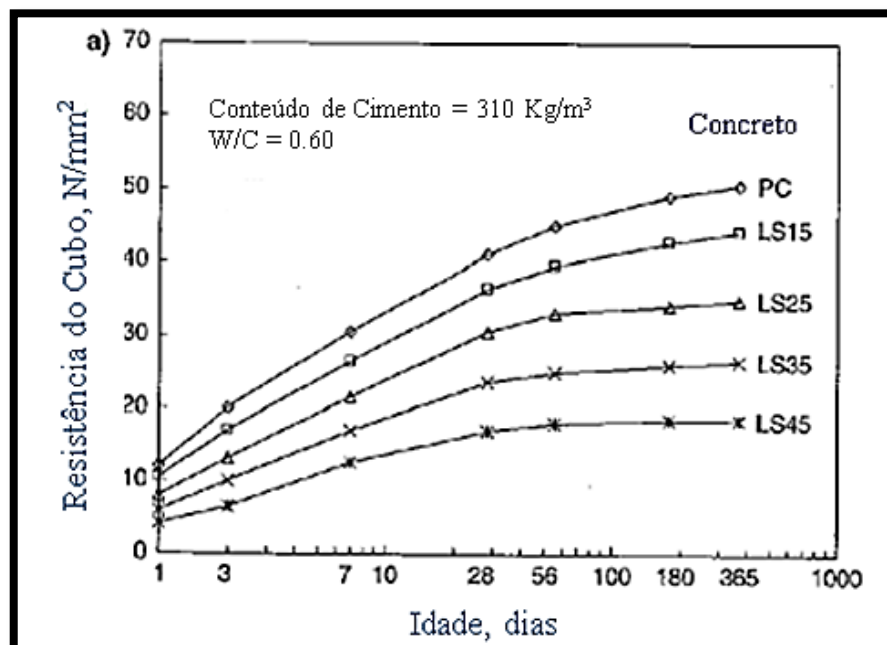
Figura 3.9 – Efeito do FC na resistência à compressão



Bonavetti et al. (2003) relacionaram o fator a/ag com a amplitude do efeito físico, ou seja, há aumento da resistência à compressão na medida em que o fator a/ag diminui. O trabalho de Feltrin et al. (2016), Figura 3.9, representa a relação proposta pelo autor anterior, ou seja, à medida que o fator a/ag diminui para 0,35 a resistência à compressão aumenta, juntamente com o aumento do teor de FC. Enquanto que, para um fator a/ag 0,50, há equivalência e, para 0,65, diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de FC.

Em sentido oposto Dhir et al. (2007) mostraram que a resistência à compressão diminuiu com o teor de FC com níveis de substituição na faixa de 15% a 45%. Nota-se que no estudo de Dhir a resistência à compressão é reduzida em todas as idades com o aumento do teor de FC, conforme pode ser visto na Figura 3.10. A redução de resistência com 15% de FC é relativamente pequena, mas em níveis mais altos a redução está relacionada à diminuição no teor de CP. Desta forma, concretos com substituição acima de 15% por FC deveriam ter uma redução do fator a/ag de 0,08 para cada 10% de substituição a fim de se obter resistências à compressão equivalentes aos 28 dias.

Figura 3.10 – Efeito da substituição de CP por 15% a 45% de FC na resistência à compressão



Fonte: Dhir et al. (2007).

Em trabalho similar Madani et al. (2016) concluíram que a utilização de FC ultrafinos não trouxe um incremento na resistência à compressão. Todavia, o reflexo da substituição por

FC na durabilidade mostrou-se positiva, em especial na permeabilidade aos cloretos e a resistividade elétrica. A diferença nas conclusões dos trabalhos citados deve-se ao tipo de FC, sua granulometria, bem como na maneira com que o empacotamento de partículas foi realizado e do fator a/ag empregado em cada mistura.

3.4 O FC E OS ALTOS TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

Estudos realizados nas últimas três décadas para investigar o desempenho do FC no CP mostram que os teores de substituição estão aumentando, embora existam controvérsias com respeito ao comportamento reológico, mecânico e à durabilidade, com resultados discrepantes (LOLLINI et al., 2014). Alguns estudos demonstram que, concretos com baixo fator a/ag ($< 0,4$), boa parte do CP continua sem hidratação, pois não há espaço para alojar os compostos Hidratados, especialmente a Portlandita, desta forma o CP pode ser substituído por partículas mais econômicas como o FC (BENTZ, 2006; BONAVETTI et al., 2003).

À medida que o teor de FC aumenta na pasta de CP, sem controle granulométrico e de quantidade de água, o fator a/ag aumenta e o desempenho diminui. Para melhorar esse comportamento é preciso diminuir a água, aumentar a mobilidade das misturas com superplastificantes e, principalmente, controlar arranjo entre partículas para diminuir os vazios pelo aumento da compacidade da pasta, ou da interface pasta/agregados. Segundo Fennis e Walraven (2012) é possível conceber concreto com baixa emissão de CO_2 , onde 50% do CP é substituído por AM, usando tecnologia de empacotamento de partículas na otimização das misturas.

John et al. (2018) apresentam uma nova visão a respeito da diminuição dos teores de clínquer ao proporem uma inovadora tecnologia. Ela se baseia em uma metodologia que propõe a utilização de baixos teores de clínquer e altos teores de FC, combinando o uso de dispersantes com a finalidade de redução do teor de água para assim compensar a diluição. O método já foi comprovado em áreas relevantes do concreto como na indústria de pré-fabricados, pré-moldados e concretos de ultra alto desempenho.

Com a implementação desta tecnologia, os altos teores de FC são compensados por meio da diminuição no consumo de água, do empacotamento de partículas e da dispersão. Assim, obtêm-se intensidades de CO_2 resultantes àquelas obtidas pela substituição do clínquer por outras AM mais reativas como a CV e a EAF, as quais são classificadas como neutras em relação à emissão de CO_2 por serem consideradas resíduos.

Destacam-se, entre as formulações apresentadas, algumas que utilizam clínquer e altos teores de FC, as quais possuem impacto de CO₂ que equivalem aos concretos produzidos com tecnologia atual e que possuem uma relação clínquer/FC entre 0,3 e 0,4. Entretanto, as contribuições desta tecnologia não poderão trazer todos os benefícios esperados, tendo em vista que, ainda, vigora na maioria das normalizações, um conteúdo mínimo de CP, a despeito da literatura colocar em cheque a necessidade desse limite. Por outro lado, em alguns países, esta limitação poderá ser superada por meio de uma abordagem de desempenho equivalente (JOHN et al., 2018).

Outro ponto a destacar é a necessidade de pesquisa em grande escala, bem como esforços para minimizar as implicações advindas da diminuição do clínquer e água. Para tanto deverá ocorrer um esforço de pesquisa em âmbito mundial, a fim de conduzir a redução de custos e aceleração do desempenho. As necessidades neste sentido incluem: a) durabilidade em longo prazo, incluindo aspectos como carbonatação, difusão de cloreto, permeabilidade ao Oxigênio, resistência à abrasão, reação álcali-sílica, ação de gelo e risco de reação química de vários minerais em relação ao FC; b) efeito sobre a cinética da corrosão do concreto atacado com CO₂ e cloreto em vários ambientes relevantes, incluindo ambientes internos secos (JOHN et al., 2018).

Neste sentido a redução do fator a/ag (necessária para concretos com alto teor de FC) é limitada pelos requisitos das propriedades reológicas. Se o teor de água for reduzido, a viscosidade plástica do concreto geralmente aumentará. Proske et al. (2013) concluíram que a modificação na distribuição granulométrica do CP e, conseqüentemente, do concreto pode reduzir a viscosidade plástica em uma extensão aceitável, mesmo para concretos com baixo teor de água e alto teor de FC. Ainda no que tange a quantidade de água em concretos com elevados teores de FC, Proske et al. (2013) observaram, em seu estudo, que todos os concretos Elaboradas com substituição de 50% de FC, em massa, tinham trabalhabilidade aceitável.

Em relação à carbonatação de concretos com elevados teores de FC, Barker e Matthews (1994) concluíram que, independentemente do concreto, a resistência à carbonatação está diretamente relacionada à resistência à compressão. Esse comportamento também foi relatado por Dhir et al. (2007) para concretos com substituição de até 50% em massa de FC. Em estudos semelhantes, observou-se que, considerando a mesma resistência à compressão, foi observada resistência um pouco menor para amostras de concreto elaboradas com altos teores de FC quando comparadas com os traços de referência (*sem FC*) (DHIR et al., 2007; PROSKE et al., 2013).

Palm et al. (2016) realizaram pesquisa sobre a utilização de altos teores de FC (>50%) em substituição ao CP. Nesse caso os autores estudaram as propriedades mecânicas, de durabilidade e características ecológicas dos concretos, chegando às seguintes conclusões:

a) Concretos com CP contendo até 50% em massa de FC e fator a/ag 0,35 podem ter propriedades suficientes para aplicação prática se uma supervisão rigorosa for assegurada. Além disso, podem exibir propriedades mecânicas e de durabilidade comparáveis aos concretos tradicionais;

b) A relação a/ag é o principal parâmetro para este tipo de concreto, sendo as propriedades mecânicas e de durabilidade dependentes quase que exclusivamente deste fator. No entanto, muitas propriedades de concreto no estado fresco e endurecido dependem fortemente das propriedades físicas, isto é, da classificação granulométrica, da área superficial específica BET e da composição química do FC;

c) Os resultados mostraram que o FC parece não ser totalmente inerte. A contribuição do FC para a resistência à compressão também é notável quando quantidade maior de clínquer de CP é substituída por FC;

d) Partes do FC devem ser moídas mais finas que o clínquer para servir como locais de nucleação e, portanto, melhorar o progresso da hidratação. Outras partes do FC devem ser mais grosseiras do que o clínquer para fornecer uma distribuição mais ampla do tamanho de partícula e, portanto, uma melhor densidade de empacotamento e menor demanda de água;

e) Todos os concretos com 50% em massa de FC e fator a/ag 0,35 tinham, pelo menos, uma resistência à compressão igual ou superior à das misturas de referência com fator a/ag 0,50. Constatou-se que, para os concretos de proporção água/clínquer constantes com maior teor de FC, ocorreu sistematicamente uma resistência à compressão mais alta;

f) Para concretos com 50% de FC em massa a resistência à carbonatação foi semelhante ao concreto de referência, obtida quando o fator a/ag foi reduzido para 0,35;

g) Concretos com fator a/ag 0,35 apresentaram coeficientes de migração em relação aos cloretos inferiores a $20 \cdot 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, comparáveis com as duas misturas de referência;

h) A taxa de retração dos concretos com 50% em massa de FC é altamente dependente da qualidade do FC. A comparação das deformações por retração após 112 dias revela que a mistura com 50% de FC apresentava um valor de retração comparável aos dos concretos de referência;

i) O comportamento em relação à fluência dos concretos com 50% em massa de FC, foi semelhante à da retração.

3.5 AS MISTURAS DE FC E CV

Quando são utilizadas misturas ternárias de CP com AM (*FC e CV*), deve ser levada em conta a sinergia, porque não se pode considerar somente a existência dos efeitos físicos e químicos das AM de forma separada. O efeito sinérgico foi discutido por Isaia (1995) onde foram estudadas várias misturas com AM, concluindo que a reatividade das AM não ficam circunscritas somente a questões de amorfismo e/ou cristalinidade, mas por meio da associação dos seus efeitos físicos e químicos junto com os de outras adições inertes ou ativas, presentes na mistura.

Assim, há sinergia entre ambas de modo que os efeitos individuais, em misturas binárias, não são meramente a soma algébrica e, sim, um valor maior ou menor ao conjunto das duas adições em misturas ternárias. Ao resultado global dessas interações ternárias denomina-se efeito sinérgico, derivado de todas as ações físico-químicas quando as AM estão em contato com o CP.

Deschener et al. (2012) e De Weerd et al. (2011) estudaram a sinergia que ocorre entre o material carbonático do FC com a CV. no qual os autores atribuíram tal efeito à interação do FC com os Aluminatos da hidratação do CP, levando a formação de Carboaluminatos, sendo que os Aluminatos adicionais trazidos para o sistema pela CV durante sua reação pozolânica, amplificaram o efeito mencionado do FC, sendo que a reação deste com o aluminato e a CV, contribui para redução na porosidade do concreto.

A este respeito, as reações propostas por De Weerd et al. (2011) são apresentadas na sequência. À medida que a CV reage, os Aluminatos são liberados pela dissolução da CV, diminuindo assim a razão sulfato/aluminato. Portanto, mais Etringita se decompõe após a depleção do sulfato e reage com os Aluminatos adicionais para formar hidrato de Monossulfato de Cálcio. A presença de FC terá um impacto maior, pois estabilizará a Etringita reagindo com os Aluminatos adicionais fornecido pela CV para formar Hidratos de Carboaluminato de Cálcio. O resultado líquido é mais Etringita, mais água ligada quimicamente e um volume maior de Hidratos levando a menor porosidade e, portanto, maior resistência, isto é, existe um efeito suplementar verdadeiro, denominado de efeito sinérgico.

Outra demonstração da interação entre CV e FC foi observada por De Weerd et Justnes (2008), quando foram estudadas misturas destes dois materiais preparadas com uma solução alcalina alta ($pH = 13,2$). Mais água foi ligada em relação ao teor de CV e os produtos de hidratação formados foram alterados quando o FC foi incluído no sistema. Os

Hidratos de Aluminato de Cálcio formados durante a reação pozolânica reagiram com o Carbonato de Cálcio do FC e formaram Hidratos de Carboaluminato de Cálcio.

Yilmaz e Olgun (2008) realizaram um trabalho no qual foi comparado o nível de desempenho entre misturas binárias (*CV de baixo teor de Cálcio – 20% de substituição em massa*) com ternárias (*15% CV e 5% de FC*), em misturas de argamassas, nas quais foi mantido constante o fator a/ag em 0,5. Entre os resultados obtidos destaca-se que a incorporação de FC (*Calcítico e Dolomítico*), resultou em resistências à compressão maiores quando comparadas à misturas com somente CV. Tendo por base ensaios realizados de DRX e FTIR, constatou-se a ocorrência de um consumo maior de Portlandita nas misturas binárias de CV.

Ainda em relação ao tópico consumo de Portlandita, Gao et al. (2015), verificaram maior teor de água quimicamente combinada em misturas ternárias de FC e CV, mesmo sem maior consumo de Portlandita do que as respectivas misturas binárias. Desta forma concluíram, a partir dos ensaios de DRX, que a incorporação de FC tende a levar a formação de produtos de hidratação adicionais.

A explicação para a ocorrência do aumento do CSH decorre da incorporação de novos pontos de nucleação a partir das partículas de FC, as quais promovem a formação de géis Hidratados que resultam no refinamento da estrutura de poros. Thongsanitgarn et al. (2014) comprovaram, por meio de análise de TG/DTG, a reação do FC com o CP ou CV resultando em uma diminuição no teor de Carbonato de Cálcio.

Em relação à durabilidade Silva e Brito (2016) constataram bom desempenho em misturas binárias com substituição até 70% de FC e ternárias de 40% de CV e 20% de FC. Os resultados mostraram que, com exceção das misturas com 60% e 70% de FC e CV em misturas binárias e ternárias, houve maior carbonatação devido ao consumo da reserva alcalina.

Estudo similar foi realizado por Githachuri e Alexander (2013) com 3 tipos distintos de CP com FC, em misturas binárias com EAF e CV, em que as misturas com EAF não apresentaram efeito adverso nas propriedades estudadas como permeabilidade a gases e resistência mecânica, entretanto a CV reduziu essa última propriedade devido a sua menor reatividade pozolânica.

Investigação comparativa dos efeitos sinérgicos é descrita por Isaia et al. (2000), entre misturas binárias de FC, CV e Cinza de Casca de Arroz (CCA). As principais conclusões do trabalho foram: a) dada uma mesma idade, o efeito químico foi mais relevante para os concretos convencionais (*de resistências menores do que < 50 MPa*); b) o efeito físico foi

maior nos concretos com resistências mais elevadas (*acima de >50 MPa*); c) traços com pozolanas mais reativas (*CCA*) tiveram resistências mais elevadas devido ao refinamento dos poros e dos grãos; d) para um mesmo teor de substituição a *CCA* apresentou resistência maior em relação a *CV* e ao *FC*, devido a maior intensidade dos efeitos físicos e pozolânicos simultâneos; e) o efeito físico aumenta com níveis mais altos de resistência; f) a atuação dos efeitos físicos e pozolânico está relacionada à quantidade de pozolana na mistura, onde as maiores resistências obtidas ocorreram nas misturas ternárias, com maior teores de adições, em relação às binárias.

Nesta mesma linha Isaia et al. (2003) pesquisaram os efeitos sinérgicos em misturas binárias com 12,5%, 25% e 50% de *FC* e *CV* para determinar os efeitos físicos e químicos sobre a resistência mecânica. As principais conclusões do trabalho foram: a) para resistências mais elevadas de 65 MPa, o efeito físico do *FC* cresceu mais do que o efeito pozolânico da *CCA*. Esta diferença deve-se ao efeito físico das partículas finas que promovem a defloculação dos grãos de *CP* propiciando novos locais de nucleação para o *CSH*; b) quando parte do *CP* é substituída por *CV*, *CCA* ou *FC*, cada uma dessas *AM* opera de maneira diferente, mas cooperativa, de acordo com o tamanho da partícula e atividade química ou física, em relação às suas interações com a pasta cimentícia; c) os resultados desta pesquisa evidenciaram a existência de uma ação híbrida, combinada e sinérgica entre o efeito de hidratação do *CP* (*concreto de referência*), a ação pozolânica (*efeito químico*) e, principalmente, o efeito físico sobre o comportamento da resistência à compressão unitária ($MPa.kg^{-1}$ de *CP*) quando comparado a misturas de *CP* sem *AM*.

Outro aspecto importante associado à atividade de uma pozolana é a superfície específica das partículas (*finura*), haja vista que em misturas ternárias o efeito sinérgico depende muito da ação física dada pela granulometria. Celik et al. (2015) realizaram um estudo sobre a composição e propriedades de misturas de concreto auto adensável (*CAA*) com grande fluidez, elaboradas com altos teores de *AM* (*CV* e *FC*) em substituição ao *CP*, as principais conclusões foram: a) uma mistura ternária de *FC* e *CV* possui a capacidade de conferir uma maior resistência à penetração de agentes agressivos quando comparada com a mistura de referência ou somente com *FC*; b) em relação à absorção de água as misturas binárias com *CV* apresentaram melhores resultados do que as ternárias de *FC* e *CV*; c) constatou-se que substituição até 55% de *CP* por *CV* ou *CV* e *FC*, produz um concreto com alta resistência aos 28 dias e uma boa resistência à penetração de cloretos; d) a fixação do fator *a/ag* com o aumento do teor de *CV* levou a resistências iniciais relativamente mais baixas, mas a um ganho constante de resistência ao longo do tempo; e) quantidades maiores

de substituição de CP por CV diminuem a permeabilidade ao gás nas misturas binárias e ternárias; g) observou-se que, aos 28 dias, a mistura com 20% de CV excedeu a resistência da mistura de controle contendo apenas 25% de FC.

Diamantonis et al. (2010) também observaram efeito sinérgico em mistura com 20% de FC e 20% de CV. Os autores concluíram que a sinergia entre os materiais pode levar a uma maior densidade de empacotamento que, por sua vez, resulta em uma microestrutura mais densa, hipótese também apoiada por Liu e Yan (2010).

No caso de misturas binárias, por vezes, o efeito físico se sobressai em relação ao efeito químico, mesmo em se tratando de pozolanas. Em outros casos o efeito químico é o dominante. No caso de misturas ternárias a melhora das propriedades mecânicas e de durabilidade pode ser debitada ao efeito sinérgico que se sobressai em relação aos efeitos físicos e químicos das respectivas misturas binárias.

A revisão da literatura demonstra que a ocorrência do efeito físico, em parte, ocorre por meio do “efeito *filer*” de empacotamento, mas a principal componente deste efeito está relacionada ao efeito de superfície (*nucleação*), o qual promove pontos adicionais para os produtos de hidratação do CP, entretanto o efeito químico está relacionado preponderantemente com a reação pozolânica. Contudo vários autores concordam que há uma preeminência do efeito físico nas primeiras idades (*até 7 dias*) e que somente após os 28 dias a sinergia entre efeitos físicos e químicos se tornam relevantes (DETWILER; MEHTA, 1989). Junto com a finura dos grãos, o fator *a/ag* reforça, em maior grau, o efeito físico em relação ao químico (ISAIA et al., 2003).

Normalmente os efeitos sinérgicos possuem uma base de cálculo por meio da diferença entre a resistência à compressão unitária da mistura com AM pela resistência da mistura de referência para uma mesma idade, fator *a/ag* e teor de substituição como mostrado nos trabalhos de Antiohos et al. (2007), Goldman e Bentur (1993) e Isaia et al. (2003). Observa-se na literatura que grande parte dos aumentos de resistência do concreto com pozolanas ocorrem devido ao efeito físico, o que leva a uma densificação da zona de transição, levando os agregados a contribuir de forma mais ativa na resistência, elevando a resistência do concreto em relação à da pasta de CP.

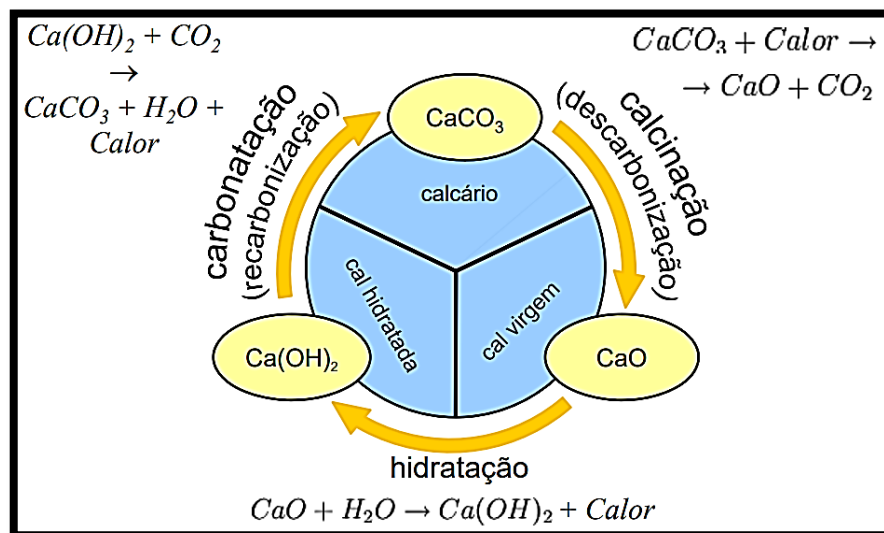
3.6 A CAL HIDRATADA

A Cal é resultante da calcinação de rochas Calcárias e/ou Dolomíticas, a partir da queima em fornos, sendo o produto resultante Cal virgem e o CO₂. As Cales podem ser

Magnesianas, Calcíticas ou Dolomíticas, conforme o teor de Óxido de Cálcio nelas contidos. Se o teor de Óxido de Cálcio estiver entre 58% e 65% é denominada de Cal Dolomítica, magnesiana entre 65% e 90% e as que superam 90% são denominadas Calcíticas (BOCK, 2012).

A CH é obtida da Cal virgem a partir de processos industriais que visam sua hidratação para utilização na construção civil, conforme observado na Figura 3.11. Os tipos de Cales Hidratadas dividem-se em CH-I, CH-II e CH-III, onde a primeira é uma Cal mais pura (*Óxidos totais > 96,8% na base não volátil e no máximo 5% de CO₂*), a segunda uma Cal intermediária (*Óxidos totais > 88% na base não volátil e no máximo 5% de CO₂*), e a terceira com maior concentração de impurezas de rocha e materiais não calcinados (*Óxidos totais > 88% na base não volátil e no máximo 13% de CO₂*) (CINCOTTO et al., 2017).

Figura 3.11 – Ciclo da Cal



Fonte: Cincotto et al. (2017).

Conforme Guimarães (2002) as Cales, com alto teor de Cálcio, possuem massa específica entre 2,3 e 2,4 $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, sendo que, quando em pasta, apresentam aumento de volume devido à capacidade de absorver e reter água além da estequiometricamente combinada. A capacidade de retenção de água constitui-se em uma medida indireta da plasticidade sendo indicador desta propriedade do material. Com a evaporação da água ocorre o endurecimento das partículas delgadas de Hidróxidos que se cristalizam aumentando em quantidade e dimensões, cujo entrelaçamento confere uma malha resistente ao material.

A utilização da CH em argamassa é bastante conhecida na indústria da construção civil, contudo sua utilização no concreto não é usual, não obstante, nos últimos anos, tem sido objeto de estudo principalmente no que se refere a sua atuação nas reações pozolânicas das AM, em especial, seu efeito sobre a carbonatação em concretos com baixo consumo de CP (ANJOS et al., 2015; HOPPE FILHO, 2008).

A CH possui uma área BET, em média, 10 vezes maior que a do CP, sendo composta por Hidróxido de Cálcio (*fração aglomerante*), Carbonato de Cálcio (*fração inerte*) e uma fração residual inerte (*impurezas*). A CH adicionada em compostos cimentícios possui a propriedade de intervir física e quimicamente nas misturas (HOPPE FILHO, 2008).

Do ponto de vista físico a atuação da CH ocorre através da fração inerte funcionando como agente de nucleação para a precipitação dos Hidratos de CP, enquanto que a atuação química se dá a partir das reações pozolânicas (CV). O mecanismo de atuação química da CH ocorre devido ao teor remanescente de Portlandita originado pelas reações de hidratação do CP ou, ainda, devido sua adição (CH) aumentando o grau da reação com os Silicatos e incrementando os compostos hidráulicos formados (HOPPE FILHO, 2008).

Por ser um ativador químico, a contribuição da CH, nas misturas cimentícias, tanto do ponto de vista químico quanto físico, possibilita um aumento em várias propriedades do concreto no estado endurecido dentre elas o aumento da resistência à compressão, a diminuição do processo de carbonatação, entre outras. Este benefício nas propriedades do concreto no estado endurecido advém do fechamento dos vazios da estrutura de poros da matriz cimentícia decorrente do refinamento ocasionado pela produção de CSH secundário.

Em um estudo desenvolvido por Anjos et al. (2015) foram Elaboradas concretos com substituição do CP por CV e metacaulim na proporção de 60% a 70% com incorporação de 5% de CH sobre os finos da mistura. Foi verificado que a resistência à compressão dos concretos com CH foi maior em relação à referência sem adição. O autores concluíram que a reação da CH com as pozolanas contribuiu para a formação de CSH secundário constatando redução na absorção por capilaridade e na difusão de íons cloreto, tendo em vista a relação destas propriedades com a estrutura de poros mais fina.

Na mesma linha está o estudo desenvolvido por Dal Ri (2002) onde foi estudada a influência da CH em concretos com altos teores de AM no que concerne à resistência à compressão e a penetração de cloretos. No estudo foram utilizadas CV, CCA e EAF em teores entre 50% a 90% de substituição ao CP com adição de CH em teores de 15% e 18% sobre o total de aglomerantes. Foi observado que nas misturas com CH ocorreu um incremento na resistência à compressão, contudo houve um aumento na permeabilidade a cloretos.

Hoppe Filho (2008) realizou um estudo onde o CP foi substituído por 50% de CV com e sem adição de CH na proporção de 20%. Foi constatado que a adição de CH aumentou o grau de reação da fase vítrea da CV, e que o teor de substituição do CP consumiu toda a Portlandita produzida, restando um teor residual que garantiu a manutenção da alcalinidade na solução dos poros. No entanto não ocorreu uma melhora relevante na resistência à compressão, sendo constatado apenas um refinamento na estrutura de poros em idades mais avançadas.

3.7 A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Um dos principais fatores que contribuem para o decréscimo da durabilidade e a perda da vida útil das estruturas de concreto é a corrosão das armaduras, seja pela ação da carbonatação ou de cloretos. Este último agente agressivo atua somente na presença de íons Cl^- presentes no ar ou água, em ambientes marinhos, industriais e outros locais específicos onde seja formado.

A carbonatação dos concretos é um processo de transformação dos compostos alcalinos da pasta endurecida sob a ação do Dióxido de Carbono (CO_2) em ambiente com umidade, originando diversos tipos de sais, geralmente o Carbonato de Cálcio. É o tipo de reação química mais usual em concretos expostos ao meio ambiente aéreo, porque a presença de CO_2 é constante no microclima da interface ar/superfície externa. Para complementar as interações físico-químicas, entre os principais compostos resultantes da hidratação do CP, ocorre a geração do Hidróxido de Cálcio que constitui no subproduto da formação dos Silicatos e Aluminatos de Cálcio, entre outros, principais componentes da microestrutura das pastas endurecidas.

Entre os principais resultados do ataque do CO_2 , com a conseqüente formação do Carbonato de Cálcio e de outros compostos, está o rebaixamento do pH da solução dos poros, resultando em modificações das propriedades do concreto, especialmente à possibilidade de despassivação da armadura, com deflagração da corrosão do aço, caso as condições específicas para tal estejam presentes.

Para Andrade et al. (2018) a ocorrência do processo de carbonatação não pode ser evitado, contudo aspectos positivos podem ser elencados como a diminuição da porosidade que dificulta a entrada de agentes agressivos. Um outro aspecto deletério relaciona-se com aparecimento de fissuras, derivadas da lixiviação de material solúvel para fora da matriz cimentícia (SAVIJA; LUKOVIC, 2016).

3.7.1 Mecanismos da carbonatação

A carbonatação é um processo continuado de transformação da Portlandita em Carbonato de Cálcio, ao longo da vida útil do concreto, com recorrência da transição do pH de aproximadamente 12,5 a 13,5 devido à presença de compostos alcalinos, para 8 a 9 pela formação gradativa de CaCO_3 e outros sais (BAROGHEL-BOUNY et al., 2014; FÉLIX et al., 2017). O fenômeno ocorre da superfície exposta ao ar da peça estrutural para o seu interior com reações bastante lentas, podendo levar alguns anos para trespassar a camada de cobrimento e atingir a armadura, quando será despassivada. Fernández Bertos et al. (2004) detalham o mecanismo de carbonatação dos materiais cimentícios por meio da seguinte sequência:

- a) Difusão de CO_2 no ar;
- b) Permeação do CO_2 através do sólido;
- c) Solubilização do CO_2 gasoso [$\text{CO}_2 (g)$] em CO_2 aquoso [$\text{CO}_2 (aq)$];
- d) Hidratação do [$\text{CO}_2 (aq)$] em H_2CO_3 (reação lenta);
- e) Ionização do H_2CO_3 em H^+ , HCO_3^- e CO_3^{2-} . Esta etapa ocorre quase instantaneamente, fazendo o pH cair aproximadamente 3 unidades;
- f) Dissolução das fases cimentícias C_3S e C_2S . Como o processo é cíclico, esta etapa é rápida e exotérmica. As partículas de Silicato Cálcico são recobertas por um filme de gel de CSH, que é rapidamente dissolvido, liberando Ca^{2+} e SiO_4^{4-} ;
- g) Nucleação de CaCO_3 e CSH;
- h) Precipitação de fases sólidas: Carbonato de Cálcio;
- i) Carbonatação secundária. Gel de CSH é formado e progressivamente descalcificado, sendo convertido em SiO_2 , H_2O e CaCO_3 .

Observa-se que as reações requerem a presença da água que está aderida às paredes dos poros, a qual dissolve o CO_2 formando o Ácido Carbônico, precipitando após, o Carbonato de Cálcio, preenchendo os vazios, aumentando a compacidade da pasta. Inicialmente os cristais de CaCO_3 são precipitados sob a forma de vaterita e aragonita, fracamente cristalizados, transformando-se posteriormente em Calcita (PARIS, 1973). O consumo dos álcalis e outros compostos alcalinos da solução dos poros resulta no que, convencionalmente, é denominado de rebaixamento da “*reserva alcalina*”, evidenciado pelo decréscimo do pH.

À medida que há difusão do CO_2 , a partir da superfície para camadas mais profundas, ocorre a diminuição progressiva do pH, em direção da armadura, formando o que se denomina deslocamento da “*frente de carbonatação*” (BAKKER, 1988). Enquanto esta frente não atingir a armadura, a camada passivante que encobre o aço a protegerá contra a corrosão, sendo estável para valores de $\text{pH} > 11,5$ (BENTUR et al., 1997).

Os compostos Anidros ou Hidratados do CP também são atacados pela carbonatação, como os Silicatos Hidratados e não Hidratados que, pela retirada do Ca^{2+} , se transformam em CaCO_3 sob a forma de Calcita e sílica hidratada (MORANDEAU et al., 2014; MORANDEAU; WHITE, 2015). A Etringita também carbonata junto com a Portlandita, formando aragonita e gesso (PARIS, 1973).

A velocidade de propagação das reações de carbonatação, é decrescente com o tempo porque a difusão do CO_2 é dificultada com o aumento do seu percurso à medida que a frente de carbonatação se desloca na camada de cobertura em direção à armadura. Assim, o processo de carbonatação de estruturas de concreto possui um viés assintótico, onde a sua frente tende a uma profundidade limite, sem nunca atingi-la. Com efeito, Benítez et al. (2019) colocam que, em função do tempo, a taxa de carbonatação progride de maneira assintótica a zero, tendo em vista a redução gradativa da difusão do CO_2 .

Logo, a carbonatação constitui-se em um processo dinâmico, onde o avanço da frente de carbonatação promove modificações substanciais na microestrutura da pasta cimentícia, modificando a porosidade do material e dificultando a difusão do CO_2 , a qual depende de muitos fatores intervenientes tanto internos quanto ambientais à estrutura de concreto.

3.7.2 Fatores intervenientes

A velocidade das reações de carbonatação dependem da quantidade dos compostos reagentes existentes, isto é, os compostos alcalinos carbonatáveis da pasta cimentícia e o teor de CO_2 que difundirá na unidade de tempo pela estrutura dos poros (BAKKER, 1988). Pode-se acrescentar ainda, além das condições internas, as externas relacionadas com o meio ambiente.

3.7.2.1 Tipo e quantidade de CP

O tipo de CP utilizado no concreto determina o teor de clínquer e os seus componentes principais, C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF que, após as reações de hidratação, resultarão nos compostos Cálculos Hidratados, Hidróxido de Cálcio, entre outros. Os CP com maior teor de

clínquer como CPI e CPV formarão maior quantidade de Portlandita do que os com AM, como os CPII, CPIII e CPIV. A maior concentração de Hidróxidos alcalinos na solução dos poros induz a difusão mais lenta do CO_2 , porque este precisa rebaixar primeiro o pH e reagir com a Portlandita presente neste local, para então prosseguir na sua penetração e precipitação do Hidróxido de Cálcio, resultando em progressão da frente de carbonatação em ritmo mais lento.

A quantidade do CP no traço de concreto também afeta a velocidade de neutralização da reserva alcalina, porque proporções com menor relação pasta x agregado também apresentam teor de álcalis totais menores, aumentando a velocidade de difusão do CO_2 , porque consomem mais rápido a Portlandita em dado local, de modo que um menor teor deste gás é necessário para rebaixar o pH e acelerar as reações de carbonatação (NEVILLE, 2016).

3.7.2.2 *Relação água x cimento*

A conhecida Lei de Abrams cita que a resistência mecânica da pasta de CP é inversamente proporcional à relação a/c, em massa ou volume, para o mesmo grau de hidratação (*idade e tempo de cura*). Este comportamento proporciona variações na porosidade da estrutura dos poros, no sentido de majoração à medida que a relação a/c também aumenta. A difusão do CO_2 dependerá não só da quantidade e continuidade dos poros como também do seu grau de saturação, desde que é dificultada à medida que aumenta o grau de umidade dos poros.

O aumento da relação a/c propicia incremento da porosidade interna, minoração da resistência mecânica e majoração da velocidade de carbonatação. Mehta e Monteiro (2014) relatam que, ao aumentar-se a relação a/c de 0,4 para 0,8 o volume de poros cresce cinco vezes. Nas relações a/c mais baixas a estrutura dos poros é mais densa com formação de matriz mais compacta, conduzindo a velocidade de neutralização dos componentes alcalinos mais baixa.

Observa-se, então, que as propriedades mecânicas e de durabilidade de uma estrutura de concreto está condicionada ao uso de relações a/c mais baixas, contribuindo com a sustentabilidade, porque aumenta a vida útil e diminui o consumo de matéria prima, em determinado lapso de tempo.

3.7.2.3 *Teor de Umidade*

As reações de carbonatação iniciam-se com a dissolução do Hidróxido de Cálcio em íons CO_3^{2-} e água, reagindo posteriormente com esta para formar o Carbonato de Cálcio

($CaCO_3$), como também com as fases cálcicas dos compostos Aluminatos ou com as da descalcificação dos Silicatos (CSH).

Ocorre, também, a neutralização dos Hidróxidos Alcalinos de Sódio e Potássio existentes nos poros da pasta, entretanto, a maior velocidade acontece com dissolução da Portlandita. A continuidade das reações de carbonatação progridem por difusão do Ácido Carbônico, HCO_3^- , após o rebaixamento do pH no local, por meio da película de água existente nos poros e canais capilares (TAYLOR, 1997).

Quando a Portlandita se transforma em $CaCO_3$ há aumento de massa de 35%, o que ocasiona diminuição gradual da velocidade de neutralização da camada de revestimento da armadura, em função da colmatação parcial dos poros e vazios.

Se estes estiverem totalmente vazios ou cheios de água as reações de carbonatação não ocorrerão. Segundo Vénuat (1977) a neutralização máxima ocorrerá na faixa de umidades entre 50 e 70% porque o CO_2 estará em maiores concentrações entre o exterior e o interior, que ocasionará carbonatação mais rápida e intensa.

A velocidade de propagação tenderá para um limite porque a equalização entre a umidade externa e interna tenderá a valores menores devido ao depósito de $CaCO_3$ nos vazios e poros, aumentando o percurso percorrido pela água a profundidades cada vez maiores em relação à superfície externa da peça estrutural.

Conforme Gjorv (2015) os compostos alcalinos podem ser lixiviados por meio da percolação de água ou mesmo pela neutralização depois da carbonatação, levando a uma redução do pH do concreto para valores de 8,5, aumentando a frente de carbonatação em deslocamento na direção da armadura.

3.7.2.4 Teor de pH

O processo de carbonatação tem início na superfície da peça estrutural e avança para o interior da mesma. Ela é constituída por duas camadas de pH distintas. Uma camada mais externa com pH inferior a 9 e outra, mais interna de maior alcalinidade.

Conforme Ribeiro e Cunha (2018) o gás Sulfídrico (H_2S), o Dióxido de Enxofre (SO_2) e o gás Carbônico (CO_2), estão entre os principais gases de ação ácida presentes no meio ambiente responsáveis pela carbonatação e redução do pH da solução intersticial nos poros do concreto.

Também contribuem para o valor do pH, todavia em menores proporções que a Portlandita, o KOH e o NaOH. Desta maneira é garantida uma alcalinidade adequada para o concreto proteger as armaduras (NEPOMUCENO; PESSOA, 2004).

3.7.2.5 Teor de Portlandita e porosidade da pasta

A solubilidade da Portlandita ($9,95 \times 10^4$ a 20°C) em relação ao Carbonato de Cálcio ($0,99 \times 10^8$ a 20°C) apresenta uma diferença de 4 ordens de grandeza, o que propicia uma rápida reação entre ambos formando o Carbonato de Cálcio, na presença de água. A concentração de cada íon está relacionada com o tipo de CP e a idade de hidratação da pasta cimentícia. Portanto percebe-se o papel relevante que estes compostos alcalinos desempenham na dissolução da Portlandita e na carbonatação das estruturas de concreto durante a difusão do CO_2 .

Quanto à cinética da reação de carbonatação Kari et al. (2014) discorrem a respeito da quantidade de Portlandita que mantém o pH em valores elevados enquanto a mesma estiver disponível. A descalcificação do CSH acontece depois do seu consumo, trazendo como consequência uma redução do pH e da concentração de íons Ca^{2+} , ocorrendo a decomposição de outras fases em compostos novos, como resultado ocorrem modificações profundas na microestrutura da pasta cimentícia. Baroghel-Bouny et al. (2014) concluíram que a diminuição no teor de Portlandita na pasta cimentícia colabora para aumento na difusividade do CO_2 e conseqüentemente da carbonatação. Com isso há uma difusão mais rápida do CO_2 tendo em vista o menor consumo de Portlandita.

Castellote et al. (2008) chegaram à conclusão que a transformação da Portlandita em Calcita traz consigo um incremento no volume da ordem de 35%. Com isso pode ser constatada uma majoração de massa na pasta cimentícia, acarretando um aumento na resistência à compressão dos concretos carbonatados (LEEMANN; MORO, 2017).

Muitos são os mecanismos de transporte que contribuem para a carbonatação do concreto. Nguyen et al. (2015), a partir do desenvolvimento de um modelo de predição da carbonatação e degradação as armaduras, chegaram à conclusão que a difusão da água no sistema poroso interconectado da matriz cimentícia constitui-se no fenômeno mais importante. Não obstante, os autores apontam que, não menos relevante, está a percolação do CO_2 em sua fase aquosa.

Também Houst e Wittmann (1994) discorrem sobre os momentos iniciais da cinética de difusão do CO_2 no sistema cimentício, para eles o fenômeno acontece da seguinte maneira: a) contato do CO_2 com o sistema poroso; b) penetração imediata do CO_2 no sistema poroso

por meio dos grandes poros; c) nos primeiros instantes somente as paredes dos poros sofrem o processo de carbonatação; d) em um segundo momento ocorre à difusão do CO₂ pela rede secundária de poros menores, que possuem uma taxa de difusão menor.

Assim segundo os autores pode-se dizer que o processo de carbonatação constitui-se no resultado da percolação do CO₂ nas duas modalidades da rede de poros, sendo denominada de “*ilhotas atrás da frente de carbonatação*” a diferença de velocidade na difusão do CO₂ nos dois tipos de redes de poros.

Um aspecto importante a ser observado no processo de carbonatação diz respeito à alteração que ocorre na porosidade do material, à medida que são realizadas as reações químicas. Lilkov et al. (2014) colocam que há preenchimento dos espaços na rede de poros do concreto endurecido que ocorre pela precipitação dos produtos de carbonatação. Considerando a cinética da reação de formação do Carbonato de Cálcio, constata-se que sua rápida deposição acarreta em uma colmatação gradativa dos poros da pasta cimentícia (MUNTEAN et al., 2005).

É consenso na literatura que há um retardo no processo de difusão do CO₂ a partir da colmatação dos poros pelos produtos carbonatados, o que diminui a sua velocidade devido ao volume formado pelos compostos ser maior do que os dos Hidratos. Song et al. (2006) citam pesquisas onde foi possível observar diminuições entre 10% e 15%, podendo chegar, em alguns casos, a 40% na porosidade da pasta cimentícia. Compartilham da mesma opinião Lu et al. (2018) ao colocarem que a colmatação dos poros mais exteriores do concreto, por produtos da carbonatação, contribui na diminuição da difusão do CO₂. Na mesma direção Papadakis (2000) destaca que a dimensão e a interconexão dos poros são fatores determinantes na taxa de disseminação do CO₂ no interior do concreto.

Juntamente com o conceito de redução da porosidade a partir da colmatação parcial dos poros por produtos de carbonatação, deve-se levar em conta a redução da porosidade intrínseca que existe a partir da superfície da peça estrutural em direção ao seu interior. Conforme Basheer e Nolan (2001) há falta de homogeneidade do concreto próximo à superfície. Esta característica ocorre pela movimentação da pasta de CP e dos agregados durante a compactação do concreto fresco e à exsudação da água nas idades iniciais da hidratação do CP. De outro lado constata-se a presença de um gradiente de umidade interna no concreto que ocorre da superfície para o interior.

Desta maneira pode-se constatar que existe um efeito sinérgico que ocorre pela colmatação dos poros pelos produtos de carbonatação agregado à diminuição da porosidade a partir da superfície da peça estrutural. Todos estes fatores em conjunto irão contribuir para a diminuição da difusão do CO₂ na estrutura de concreto e na redução da taxa de carbonatação.

Também deve ser considerada, nesta situação, a contribuição dada pela diminuição da disponibilidade de produtos carbonatáveis por meio da reação de carbonatação, o que leva a uma diminuição na velocidade de carbonatação.

Sabe-se que a porosidade está intimamente relacionada com o fator a/ag , ou seja, com sua diminuição, há uma redução na porosidade da pasta. Em estudos realizados por Chaussadent et al. (2000) os autores chegaram à conclusão de que não somente a estrutura de poros, mas também o fator a/ag , possui influência na formação da área superficial da Portlandita.

3.7.2.6 Temperatura

De modo geral as reações químicas são catalisadas por meio da variação de temperatura, observando-se um incremento nas velocidades das reações com o seu aumento. A atuação do CO_2 no processo de carbonatação não é afetada de maneira relevante por ocasião de pequenas variações de temperatura, contudo temperaturas elevadas contribuem de forma importante para o aumento da velocidade do processo de carbonatação nas estruturas de concreto.

Com relação à influência da temperatura Figueiredo (2005) coloca que não há uma correlação entre velocidade de difusão do CO_2 e variações de temperatura. Estudos de Song et al. (2006) apontam que no intervalo entre $20^\circ C$ e $40^\circ C$ a reatividade do CO_2 não sofre variações enquanto Papadakis et al. (1992) concluem que a carbonatação não apresenta influencia para temperaturas nesta mesma faixa, devido a predomínio do controle do processo pela difusão. De acordo com Neville (2016), pequenas variações de temperatura resultam em poucas mudanças na profundidade de carbonatação.

3.7.2.7 Meio ambiente

Para fins de classificação e estudo, existem três tipos diferentes de ambientes relacionados à tipologia de exposição ao meio, no que se refere à carbonatação das estruturas de concreto. De maneira sucinta tem-se: ambiente externo exposto, ambiente externo abrigado e ambiente interno. Das três possibilidades a terceira situação, ambiente interno, é aquela que mais causa preocupação, por ser a mais favorável para o desenvolvimento das reações.

Neste caso deve-se levar em conta as seguintes características: a) concreto protegido da ação das intempéries, a menos da umidade relativa do ar; b) variações de temperatura inferiores ao do ambiente externo; c) umidade relativa e concentração de CO_2 praticamente

constantes na maioria do tempo. Assim o concreto apresentará uma microestrutura onde será improvável que os seus poros se apresentem saturados de água ou completamente secos, sendo estas duas condições ideais para a propagação da carbonatação.

Neste tipo de ambiente interno abrigado o processo de carbonatação não é acometido de grandes perturbações e possivelmente não irá sofrer com interrupções depois de iniciado. Nestas condições o único fator que se contrapõe ao desenvolvimento da carbonatação é a colmatação progressiva da rede de poros da pasta cimentícia que se dá pelos próprios produtos da carbonatação.

Apesar do processo de carbonatação ocorrer de forma natural, ele é intensificado por meio de agentes antrópicos. Segundo Gasparim (2007), o estudo da carbonatação é importante para concretos aplicados a situações onde ocorre grande incidência de CO_2 , como: túneis rodoviários e metroviários, estacionamentos no subsolo e em ambientes fechados.

Cascudo e Carasek (2011) reforçam que na mesma estrutura pode-se observar regiões específicas com carbonatação mais intensa que no restante, acontecendo principalmente em garagens de edifícios, pois costumam ser ambientes confinados, de pouca ventilação, o resultado é uma atmosfera geralmente com maiores concentrações de CO_2 em relação aos demais locais do edifício.

3.7.2.8 Concentração de CO_2

O incremento da velocidade de carbonatação é majorada com altas concentrações de CO_2 , segundo Neville (2016), os ambientes podem variar de regiões rurais para regiões urbanas da seguinte forma: a) meio rural com concentração de 0,03% em volume de CO_2 ; b) ambientes urbanos com 0,10% em volume de CO_2 ; c) densa ocupação urbana ou industrial com concentrações de 0,30% a 1,0% em volume de CO_2 . Em ambientes pouco ventilados com maior concentração de CO_2 , como em zonas urbanas, pode-se inferir que a velocidade de carbonatação é mais elevada, em uma faixa entre 0,03 a 1%.

Em regiões onde há uma concentração maior de CO_2 , como áreas urbanas e/ou industriais, o desenvolvimento do processo de carbonatação pode ocorrer em maior ou menor intensidade a depender de outros fatores ambientais que propiciam as condições necessárias para a carbonatação. De modo geral, na natureza, tem-se uma baixa difusão do CO_2 nas estruturas de concreto, tendo em vista as diminutas concentrações na atmosfera.

Desta forma, necessita-se de um período de exposição bastante longo afim de que possam ser atingidas pequenas profundidades de carbonatação (HELENE, 1993; PAPADAKIS et al., 1992). A concentração de CO_2 no meio em que uma estrutura de

concreto está inserida relaciona-se, de forma direta, com a velocidade de carbonatação, principalmente nos concretos em que o fator a/ag é elevado (FIGUEIREDO, 2005; NEVILLE, 2016).

Um gradiente maior de concentração entre o exterior e o interior de uma estrutura de concreto é promovido pelo aumento do teor de CO_2 , contribuindo assim com a elevação da taxa de difusão de CO_2 (DYER, 2015). Estudos de Cui et al. (2015) confirmam que amostras de concreto, de mesma idade, apresentam maior profundidade de carbonatação quando expostas a taxas de concentração de CO_2 maiores.

3.7.3 Influência das AM na carbonatação

As AM consomem a Portlandita que constitui na reserva alcalina, o que acarreta a despasseificação da armadura em um período de tempo inferior aos concretos que não as utilizam. Existem dois comportamentos distintos em relação ao concreto com AM em relação à carbonatação, sobre os quais Czarnecki et al. (2018) discorrem: a) inibição do processo de carbonatação (*por meio do aumento da compactidade do concreto*); b) aceleração do processo de carbonatação (*devido à diminuição da reserva alcalina*). A prevalência de um comportamento sobre o outro dependerá de aspectos externos e internos do concreto.

Jia et al. (2012) colocam que, em condições normais, o teor de AM constitui-se no fator mais importante quando se está trabalhando com a carbonatação. Neste caso, o consumo da reserva alcalina cria as condições para intensificação da carbonatação, apesar das AM contribuírem para a diminuição da porosidade.

Não há muitas dúvidas a respeito da relação existente entre a incorporação de AM e o consumo da reserva alcalina. Neste sentido cabe a discussão de como assegurar que o refinamento dos poros possa se dar de forma eficiente para que o processo de carbonatação seja reduzido. Atis (2003) demonstrou a possibilidade da produção de concretos com baixa sensibilidade à carbonatação com a incorporação de até 50% de CV. No entanto normas nacionais e internacionais continuam a anotar suas preocupações em relação à incorporação de teores mais elevados de AM, justificando seu posicionamento no rápido consumo da reserva alcalina.

Uma forma simples e prática para o controle do processo de carbonatação em concretos com AM diz respeito à diminuição do fator a/ag . Neste sentido, Basheer et al. (1999) evocam a lei de Abrams para afirmar que um determinado concreto concebido com AM pode ser especificado frente à carbonatação baseado unicamente nesta lei. A explicação da afirmação feita por Basheer et al. (1999) é dada por Isaia et al. (2003): ao diminuir o fator

a/ag a resistência do concreto é majorada, devido à densificação da microestrutura do concreto, o que leva a uma predominância das ações físicas de contato das partículas de maior finura sobre as ações químicas das reações pozolânicas. Complementado as considerações Aitcin (2000), continua: como a resistência da pasta hidratada de CP é derivada principalmente das forças de Van der Waals, segue-se que quanto mais compactos e menos cristalinos forem os produtos da hidratação, maior será a resistência.

As considerações apresentadas no parágrafo anterior podem ser constatadas na prática por meio do trabalho de Baroghel-Bouny e De Larrard (2000) onde o processo de carbonatação não é observado em concretos de alta resistência (CAR), ou seja, com o aumento da resistência ocorre uma diminuição da profundidade carbonatada. Isaia (1995) afirma que a principal causa da diminuição da profundidade carbonatada em concretos de alta resistência (*acima de 50 MPa*), diz respeito à compacidade das misturas. O aumento da compacidade e a desconectividade dos poros constituem nos fatores mais importantes para a redução da carbonatação e não necessariamente a redução do fator a/ag.

Em um estudo desenvolvido por Kulakowski et al. (2009) foram estudados a relação do fator a/ag e a porosidade da pasta cimentícia. Os autores concluíram que existe uma faixa de fator a/ag entre 0,45 e 0,50 onde acima da mesma, a carbonatação é mais acentuada. Abaixo desta faixa a porosidade diminui e a concentração de Portlandita e o pH possuem pouca influência. Possan et al. (2005) chegaram as mesmas conclusões, ou seja, a existência de um valor crítico para o fator a/ag 0,45. Abaixo deste valor os autores consideram a profundidade carbonatada muito reduzida. Acima deste valor a taxa de carbonatação possui uma influência direta das AM devido ao consumo da reserva alcalina.

Existe uma relação de causa e efeito entre o uso de AM e o desenvolvimento do processo de carbonatação nas estruturas de concreto. Todavia deve-se considerar a minimização dos impactos ambientais advindos da utilização de resíduos agroindustriais por meio do uso das AM. Atrelado ao benefício ambiental, além da diminuição do teor de clínquer na mistura, há o benefício técnico oriundo do refinamento dos poros da pasta cimentícia o que viabiliza a utilização destas adições em teores mais elevados.

3.7.3.1 Efeitos do FC

A medida que aumenta o teor de substituição de CP por AM, há alteração no teor de CSH formado. Se adição for ativa, há formação adicional de CSH secundário, se inerte, como o FC, o teor de CSH diminui e aumenta ligeiramente o de CASH, cujo balanço depende dos compostos formados, do empacotamento de partículas, da estrutura dos poros e do fator a/ag.

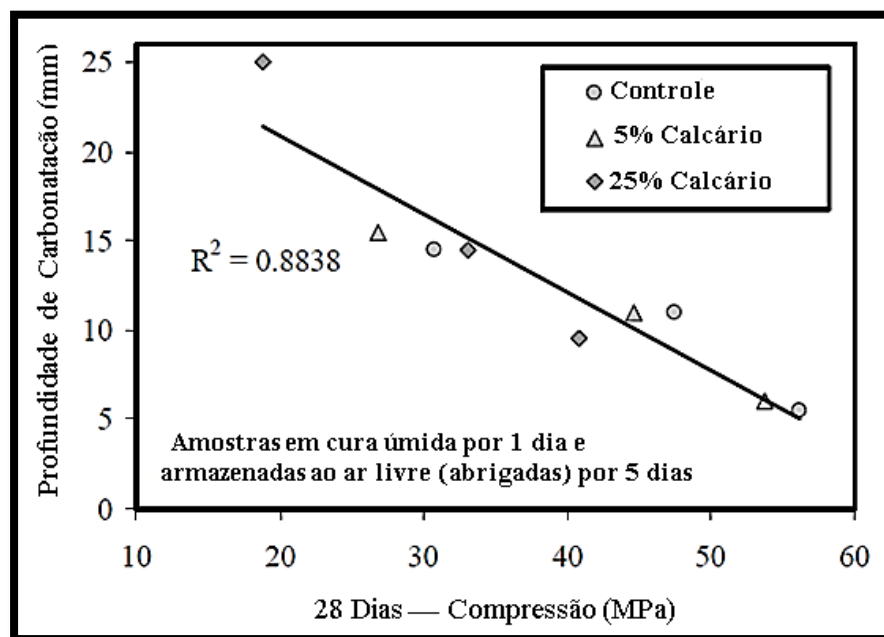
A quantidade de CSH resultante das reações de hidratação implica, em efeito diretamente proporcional, na formação de Portlandita, pois ambos compostos são participantes da mesma reação química, em proporções recíprocas. Assim, quanto maior a substituição de CP por FC haverá menor formação tanto de CSH quanto de Portlandita, que se reflete nas propriedades relacionadas com a durabilidade, de acordo com os mecanismos físico-químicos envolvidos.

Assim, quanto aos processos envolvidos na carbonatação de concretos, dois parâmetros básicos precisam ser levados em conta: a) a reserva alcalina, medida pelo teor de Portlandita remanescente; b) a estrutura dos poros, avaliada indiretamente pela resistência à compressão. Grande parte dos pesquisadores que estudam a incorporação de FC em concretos e argamassas concordam que a substituição de CP por FC diminui a reserva alcalina podendo acarretar maior carbonatação, dependendo do tipo, teor e granulometria desta adição.

Entretanto, a diminuição da reserva alcalina pode ser compensada por modificação da estrutura de poros com vistas à obtenção de uma microestrutura mais homogênea, pelo estudo de dosagem dos materiais finos através de um empacotamento de partículas mais fechado, resultando em menor teor de vazios e resistência à compressão mais alta.

Essa estratégia conduzirá à obstrução da percolação do CO_2 e de outros fluidos pela microestrutura mais compacta, dependendo do empacotamento das partículas, do teor do FC, do tipo e quantidade de aditivos utilizados e, principalmente, do fator a/ag .

Figura 3.12– Profundidade da carbonatação como função da resistência à compressão para o concreto produzido com CPs com níveis variáveis de FC



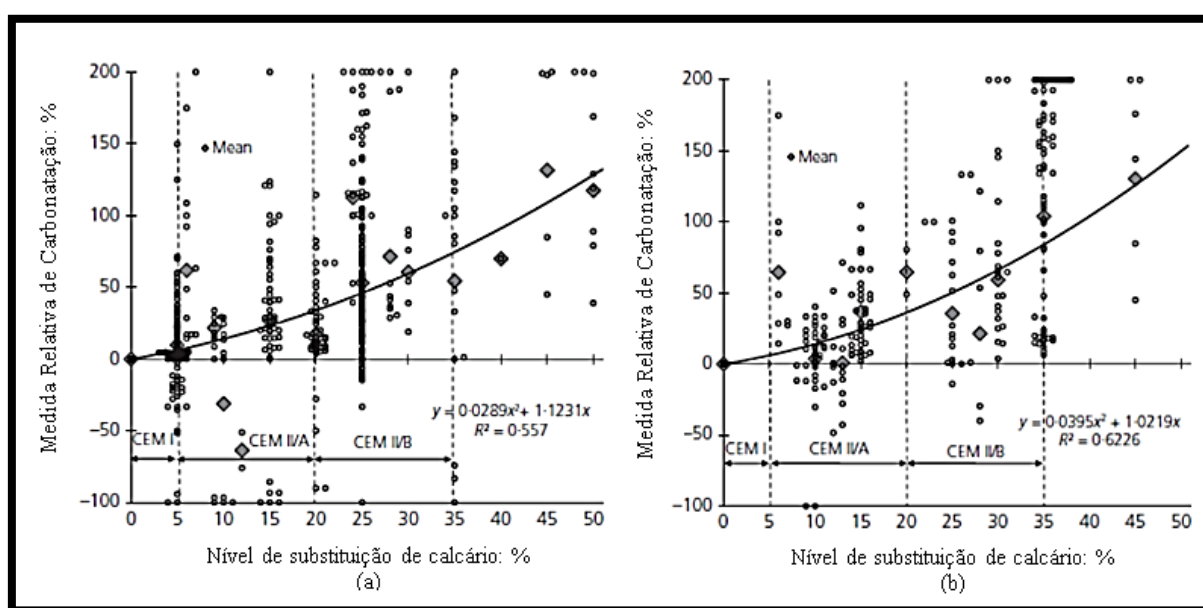
Vários estudos demonstram que a taxa de carbonatação é semelhante em concretos com a mesma resistência à compressão, independentemente da quantidade de FC que substitui o CP. Para que isto aconteça é necessária a diminuição do fator a/ag e aumento da quantidade de FC (BARKER; MATTHEWS, 1994; LIVESEY, 1991).

Tal comportamento pode ser observado na Figura 3.12 onde é possível verificar a profundidade de carbonatação aos 5 anos de idade em relação à resistência à compressão aos 28 dias de idade no concreto. É possível observar que, em concretos com a mesma resistência à compressão, a profundidade de carbonatação será praticamente a mesma independentemente da quantidade de FC substituído.

Pode-se dizer que a carbonatação não é, necessariamente, uma função da substituição de FC no CP porque, ao ajustar-se o fator a/ag mantendo-se a resistência constante é possível à obtenção de concretos com desempenho mecânico (*resistência à compressão*) e de durabilidade (*profundidade de carbonatação*) adequados.

Este raciocínio é válido para concretos normais com taxa de substituição de CP por FC até 15%. Nas misturas com altos teores de FC, empregando-se fatores a/ag mais reduzidos com aditivos super ou hiperplastificantes e adequado estudo de empacotamento das partículas, a resistência à compressão pode vir a ser majorada, levando a redução da taxa de carbonatação.

Figura 3.13 – Influência do teor de FC na carbonatação do concreto para o mesmo fator a/ag . a) Carbonatação natural e b) Carbonatação acelerada



A tendência apresentada não fica restrita a baixos teores de FC (5% a 10%), substituições de até 35% de FC mostram comportamento semelhante (TSIVILIS et al., 2002). Concreto produzido com 45% de FC mostrou resistência similar à carbonatação quando comparado ao sem substituição do mesmo grau de resistência (HOOTON et al., 2007). No estudo de Elgalhud et al. (2018) (Figura 3.13) pode ser observado a influência do teor de FC na carbonatação do concreto para um mesmo fator a/ag. Observa-se que há um aumento da carbonatação tanto natural quanto acelerada com o aumento de substituição de CP por FC, tendo em vista que o CP utilizado é o CEM IV que já apresenta substituição de clínquer por pozolana, o que resulta em carbonatação adicional com o aumento do conteúdo de FC.

3.7.3.2 Efeitos da CV

São vários os fatores que influenciam na profundidade de carbonatação dos concretos contendo CV, dentre eles pode-se destacar: a) a composição química e mineralógica; b) a finura; c) fator a/ag; d) o nível de substituição; e) o tipo de CP usado (*composição química e finura*); f) o período de cura das amostras.

Sideris et al. (2006) elaboraram 9 argamassas de CP com diferentes teores de substituição de CV até 60%. Com a finalidade de manter-se a fluidez constante, diferentes fatores a/ag foram utilizadas. Com relação à cura, todas as amostras foram curadas em água por 28 dias, sendo que após esta idade elas foram expostas ao ar em ambiente abrigado. Por um período de até 18 meses foram realizadas as medições de carbonatação. Os pesquisadores concluíram que as profundidades de carbonatação de todas as misturas com CV eram maiores que as da mistura de CP comum.

Papadakis et al. (1992) relataram o mesmo tipo de conclusão. Por outro lado, a taxa de carbonatação, ou seja, o aumento da profundidade carbonatada em idades posteriores, em comparação com a medição inicial (6 meses), foi maior com a mistura de CP (*referência*). A taxa de carbonatação geralmente diminuiu, à medida que o teor de CV aumentou. Os pesquisadores atribuíram esse comportamento ao fenômeno do refinamento dos poros.

Com relação ao fenômeno da carbonatação em CV de classe C e F, Papadakis (2000) realizou um estudo onde argamassas foram produzidas com substituição de CV de classe C e F em porcentagens de até 30%. As amostras foram armazenadas em um ambiente ao ar no laboratório por 28 dias. Depois deste período as amostras foram colocadas em uma câmara de carbonatação com uma concentração controlada de 3% de CO₂, temperatura de 25°C, umidade relativa de 61% por um período de 100 dias. O autor relata que ocorreu um aumento na

carbonatação em função do teor de substituição do CP por CV. A menor profundidade de carbonatação foi observada para CV de alto teor de Ca, depois para CV de baixo teor de Ca.

3.7.4 Carbonatação e a CH

Quando as AM são incorporadas na mistura em substituição ao CP amentam as probabilidades de ocorrência do processo de carbonatação devido à diminuição da reserva alcalina da matriz cimentícia, especialmente em composições com relações a/ag mais elevadas e nas idades iniciais. Assim a evolução do processo de carbonatação está relacionado com o tipo e o teor de substituição da AM, sendo tão maior quanto mais reativa e maior o teor na mistura, fatores ligados com o consumo de Hidróxido de Cálcio.

Com isso é possível afirmar que a profundidade de carbonatação é função do tipo e da quantidade de AM que é incorporada na matriz cimentícia. Neste sentido o trabalho de Isaia (1995) demonstra a ocorrência do aumento do coeficiente de carbonatação para traços com menor conteúdo de Portlandita, tendo sido maiores quanto mais elevados foram os teores de AM incorporadas.

Uma das maneiras de contornar o problema do aumento da carbonatação em traços com elevados teores de AM consiste na incorporação de CH na mistura, sob a forma de adição ao traço e não como substituição, porque tem por objetivo fornecer a mistura uma nova fonte de reserva alcalina. Assim o teor de Hidróxido de Cálcio na matriz cimentícia será majorado acarretando um aumento no tempo necessário para as reações de neutralização com o CO₂, freando a velocidade de carbonatação. Com isso é diminuída a possibilidade de despassivação da armadura que se constitui na condição necessária para início do processo de corrosão.

Anjos et al. (2015) estudaram composições de concretos com elevados teores de AM com adição de CH. Foram realizados ensaios de carbonatação acelerada (*teor de CO₂ de 4%*) e foi constatado que a incorporação de CH contribui para a diminuição da profundidade carbonatada, tendo em vista a reposição da alcalinidade da solução através da CH.

Também Cadore (2008) elaborou concretos com elevados teores de AM (*70% EAF + 20% CV*) com e sem adição de CH. As amostras foram submetidas à carbonatação acelerada (*teor de 5% de CO₂*) por períodos de 3 a 9 semanas. Foi constatado que os traços com adição de CH tiveram uma profundidade de carbonatação inferior aqueles sem adição de CH.

Na mesma linha Hoppe Filho (2008) analisou composições de concretos com substituição de 50% de CV, com e sem adição de CH no teor de 20%. Os traços estudados

foram submetidos à carbonatação acelerada em câmara climatizada com 5% de CO₂, por períodos de 4, 8, 12, 16 e 20 semanas. Conforme o autor, a CH proporcionou um teor residual de Hidróxido de Cálcio, todavia não reduziu relevantemente a profundidade de carbonatação. O autor concluiu que o teor remanescente de Portlandita na matriz cimentícia não constitui um fator determinante no avanço da frente de carbonatação.

Em outra direção Dalla Lana (2005) coloca que a substituição de CP por 50% de CV aumentou, em média, 100% da velocidade de carbonatação. Todavia com a adição de 20% de CH a velocidade de carbonatação foi reduzida para 20%. Stumpp (2003) coloca que a adição de CH em concretos com altos teores de AM é benéfica. Neste caso a CH age tanto na reposição da reserva alcalina quanto na redução da porosidade aberta e permeabilidade que são fatores importantes na velocidade da frente de carbonatação.

3.7.5 Película protetora

A corrosão do aço por carbonatação constitui em uma das causas mais frequentes de deterioração das estruturas de concreto armado. Embora esteja protegido contra a corrosão pela película passivadora, a mesma é vulnerável a ação do CO₂ que penetra no concreto. A maneira mais usual de prevenção consiste em garantir que a camada de revestimento possua a qualidade e espessura adequada para garantir a integridade da armadura.

Sejam por razões estéticas e/ou de durabilidade, muitas estruturas de concreto armado são pintadas. Esta situação altera as condições de exposição, tendo em vista a criação de uma nova barreira entre o CO₂ e a armadura. A pintura é formada por um filme contínuo e aderente ao concreto com 100 µm a 1 mm de espessura, podendo apresentar performance variável em função da qualidade da tinta, bem como o número de demãos de aplicação da mesma.

Rodrigues (1996) elenca como sendo importantes para a proteção das estruturas de concreto contra a entrada de agentes agressivos as seguintes propriedades: a) permeabilidade ao vapor de água; b) resistência à penetração do CO₂; c) permeação de água. Especificamente a água e o CO₂ constituem nos dois principais responsáveis pela carbonatação do concreto. Sendo assim é importante que as tintas destinadas a proteção das estruturas de concreto armado sejam caracterizadas pela sua resistência à difusão do CO₂ e o vapor de água. Estes valores são, regra geral, indicados em espessura de camada de ar de difusão equivalente.

Usualmente utiliza-se o ensaio de carbonatação acelerada sobre cps de concreto pintados e não pintados com o intuito de determinar a resistência à penetração de CO₂. Tendo

em vista a elevada resistência à difusão do CO₂ das tintas em especial das acrílicas, estas são as mais utilizadas como película protetora anticarbonatação do concreto. A aplicação de tintas acrílicas na superfície permite o aumento da vida útil, em especial em ambientes agressivos.

Este tipo de pintura não altera, substancialmente, o aspecto superficial do concreto sendo classificado como um revestimento impermeabilizante com a formação de película protetora. A aplicação de uma tinta do tipo acrílica forma uma película que tem por objetivo a proteção do concreto através da formação de uma barreira superficial que diminui e/ou impede a permeabilidade a líquidos e gases.

Devido à superfície lisa das estruturas de concreto a aplicação de tinta do tipo acrílica resulta em uma película contínua que favorece a proteção contra a carbonatação. Conforme Kazmierczak e Helene (1995), de maneira geral, deve-se considerar os seguintes aspectos por ocasião da aplicação da tinta na superfície do concreto: a) assegurar a proteção da estrutura de concreto contra a penetração de agentes agressivos; b) possuir resistência adequada à degradação, em especial ao ataque de microrganismos e ação de raios ultravioletas; c) manter a aparência superficial dentro dos níveis previstos para sua vida útil; d) ser de fácil aplicação e manutenção; e) possuir um custo adequado.

Em se tratando de estruturas de concreto compostas por elevados teores de substituição de CP por AM e que são mais susceptíveis a difusão do CO₂ devido à baixa reserva alcalina, a aplicação de tintas do tipo acrílica constitui em uma opção bastante adequada para conferir ao concreto armado à manutenção da sua vida útil projetada.

Em estudo conduzido por Kazmierczak e Helene (1995) foram utilizados diferentes sistemas baseados em pintura onde foi avaliado a carbonatação para uma vida útil da estrutura de 50 anos. Os parâmetros de exposição à carbonatação acelerada foram 20 + 2°C, 70 a 80% de UR em um ensaio acelerado de 20 minutos com concentração de 100% de CO₂. Neste caso o melhor desempenho ocorreu pela aplicação de uma resina à base de poliuretano. Todavia a aplicação deste tipo de produto não é usual em grandes superfícies de concreto seja do ponto de vista prático (*facilidade de aplicação*), seja do ponto de vista econômico (*custo*).

A utilização de um verniz acrílico mostrou que a estimativa de profundidade de carbonatação do concreto depois de 50 anos de exposição é 2 a 3 vezes menor do que o concreto de referência. Contudo os autores ressaltam que os resultados obtidos podem variar conforme o método de aplicação, tempo de repintura, número de demãos, espessura da película final de proteção, entre outros.

Em outro estudo semelhante, Moreira et al. (2006) aplicaram ao concreto verniz de silicone, pintura acrílica e resina do tipo epóxi com o intuito de verificar a permeabilidade. Os

resultados de absorção (*capilaridade e imersão*), porosidade e permeabilidade à água e ao Oxigênio demonstraram que o revestimento com pintura do tipo acrílica apresentou valores intermediários entre aos três tipos de revestimentos aplicados. Sendo que no ensaio de porosidade o revestimento com tinta acrílica reduziu, em média, 72% quando comparado ao referência. Do ponto de vista técnico (*praticidade de aplicação*) e econômico (*custo*) a aplicação de tinta acrílica constitui na opção mais competitiva quando comparada com as demais.

Na mesma linha de Moreira et al. (2006) e Aguiar, Ramos e Soares (2005), realizaram um estudo onde foi observado uma redução na absorção de água através do ensaio de capilaridade de cerca de 61%, já em relação à permeabilidade ao Oxigênio foi observada uma redução de 42% por ocasião da aplicação de uma tinta do tipo acrílica na superfície dos cps.

Em relação à vida útil das películas de tinta do tipo acrílica, existe uma variação que depende do ambiente de aplicação podendo ser ele interno ou externo pois, conforme a maioria dos fabricantes, a depender do tipo de ambiente a vida útil da película de tinta acrílica pode variar de 2 a 10 anos.

Neste sentido Park (2008) estudou diversos tipos de repintura periódica com o intuito de conferir um desempenho adequado em relação à proteção superficial dada pela tinta acrílica no que concerne à carbonatação. Foram comparados os resultados de carbonatação para um período de tempo de 30 anos, em concretos sem pintura, com uma pintura, com duas pinturas, com três pinturas e seis pinturas no intervalo de 30 anos. Park (2008) constatou que repinturas periódicas permitem um bom desempenho da proteção superficial contra a carbonatação.

3.7.6 Modelagem matemática

Para Neves et al. (2015) a avaliação da resistência à carbonatação do concreto para estruturas *in loco* é muito insipiente, tendo em vista a inexistência de métodos práticos e não destrutivos. Desta forma, com o intuito de equacionar problema, faz-se o uso de dados laboratoriais e de modelagem matemática. Neste cenário vários modelos foram desenvolvidos, tendo em vista a importância da determinação da vida útil das estruturas de concreto. Entre os fatores que envolvem a modelagem matemática da carbonatação, pode-se citar: a) a agressividade do meio ambiente; b) a difusibilidade de gases no concreto; c) a porosidade do material, entre outros (MEIER et al., 2007; MONTEIRO et al., 2012).

Dentre os fatores que dificultam a modelagem, está a limitação dos testes usados, bem como a compreensão dos resultados obtidos. A partir do entendimento das informações contidas nos ensaios é possível o desenvolvimento de ações que possibilitem a extrapolação dos resultados. Desta maneira podem ser propostos ensaios acelerados de carbonatação mais compatíveis com a realidade (MUNTEAN et al., 2005). A previsão da profundidade de carbonatação de uma estrutura de concreto necessita de um modelo quantitativo, que envolva os materiais e o ambiente que influencia o processo de maneira a ser função de todas as variáveis envolvidas (PAPADAKIS et al., 1991).

Vários modelos de predição da carbonatação já foram desenvolvidos, contudo muitas são as limitações, pois cada um modela as suas “*condições de contorno*”, fazendo com que a aplicação se torne limitada (HELENE; CASTRO-BORGES, 2009). Vários pesquisadores consideram os mecanismos de transporte no interior concreto como sendo um fator limitante na modelagem da carbonatação. Esta limitação está relacionada à interdependência dos elementos que regem os mecanismos de transporte no interior do concreto, pois cada um segue leis físicas e químicas próprias. Do ponto de vista matemático os mecanismos de transporte de fluidos já foram modelados. Contudo a transposição para um fenômeno específico como a carbonatação, traz consigo particularidades que precisam ser adaptadas aos modelos pré-existentes.

Os modelos pré-existentes mais utilizados baseiam-se nas leis de Fick, onde se pressupõe o aspecto ilimitado do fenômeno da carbonatação ou seja, o mesmo continua a ocorrer enquanto o concreto estiver exposto ao CO_2 , conforme Czarnecki e Woyciechowski (2015). Por esta aplicação o processo de carbonatação somente acabará quando todos os produtos carbonatáveis forem consumidos. Particularmente, neste caso, é importante levar em conta que a difusibilidade do CO_2 depende da microestrutura do concreto e não somente da concentração deste gás.

Outra fragilidade na aplicação da lei de Fick é que a difusão não se altera com o passar do tempo, permitindo a existência de um único coeficiente de difusão. Esta simplificação compromete a aplicação plena da lei de Fick, no caso da carbonatação, pois não leva em consideração uma série de outros fatores, como: a) mudanças na difusibilidade em função da umidade; b) mudanças na concentração de CO_2 ; c) variações microestruturais do concreto, entre outras.

Uma maneira de compensar as limitações impostas nas leis de Fick consiste na utilização da formulação desenvolvida por Tuuti (1982) que contempla alguns dos fatores que não foram considerados na aplicação da lei de Fick para a carbonatação. Para desenvolver sua

formulação, o autor partiu do princípio que o coeficiente de difusão do CO₂ é igual ao do O₂, por questões de simplificações práticas, como pode ser observado na equação 3.1.

$$e = K_{CO_2} \cdot t^n \text{ (equação 3.1)}$$

Onde:

e: profundidade de carbonatação em mm;

k_{CO_2} : coeficiente de carbonatação expresso em mm.ano^{-0,5};

t: tempo em anos;

n: expoente variável dependente das condições de umidade pode variar de 0,25 (*ambientes externos expostos aos ciclos de molhagem e secagem*) a 0,50 (*ambientes internos abrigados*).

Vários autores destacam que a equação de Tuuti constitui uma aproximação bastante razoável da realidade da carbonatação em estruturas de concreto. Para Pade e Guimarães (2007) a equação 3.1 consiste em uma opção adequada para modelagem matemática do fenômeno de carbonatação. Contudo os autores ponderam que no caso de concretos de alta resistência ou em condições externas sem proteção, podem não se enquadrar na função com $n = 0,5$. Para os casos específicos citados por Pade e Guimarães (2007) o expoente da equação deve ser menor do que 0,5 o que resulta em menor profundidade carbonatada ao longo do tempo. Uma versão reduzida da fórmula de Tuuti e amplamente utilizada é mostrada na equação 3.2.

$$x = t^{0,5} \text{ (equação 3.2)}$$

Nesta versão simplificada o autor fixa o valor de n em 0,5, considerando a situação mais desfavorável em relação à carbonatação (*ambiente interno abrigado*), favorecendo o coeficiente de segurança da estrutura. Hills et al. (2015) ponderam que uma calibração mais fina da equação levaria o coeficiente $n = 0,4$, contudo a grande maioria dos autores concorda com o fator 0,5.

Como já relatado vários autores consideram a fórmula 3.2 como sendo adequada na previsão da carbonatação em ambientes com condições estáveis (*abrigados*) (SILVA et al., 2014). O foco desta simplificação está na segurança, ao favorecer o ambiente mais desfavorável. Na visão de Papadakis et al. (1992) quando se trata de ambientes desprotegidos os resultados apresentados pela equação 3.2 não são confiáveis.

Ainda em relação ao caráter expedito da equação 3.2, Nilsson e Tang (1996) comentam que, para o cotidiano da engenharia civil, o uso de descrições simplificadas é muito mais viável. Não obstante, as limitações advindas da simplificação da equação 3.2, o modelo é amplamente utilizado na predição da profundidade de carbonatação do concreto (SILVA et al., 2014).

Desta forma pode-se constatar que, apesar das limitações, vários autores defendem a utilização do modelo proposto por Tuuti. Tendo em vista ser mais simples e genérico permitindo fazer comparações entre concretos de mesma família, submetidos ao mesmo ambiente de cura durante o tempo (SILVEIRA, 2019).

3.8 O EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O emprego de partículas com uma área específica mais elevada que a do CP (*CH*, *FC* ou *CV*), resulta que mais água seja adicionada ao concreto e/ou argamassa a fim de obter uma dada trabalhabilidade ou consistência.

Assim o teor de água necessário para uma dada trabalhabilidade está acima da quantidade necessária para hidratação total do CP, sendo que este excesso determina a porosidade final da pasta endurecida (DE LARRARD, 1999). A diminuição do teor de água constitui em um caminho para a melhoria da resistência mecânica e durabilidade de concretos e argamassas.

A diminuição do consumo de água nos concretos e argamassas pode ser obtida pelo aumento do empacotamento de partículas (*agregados graúdos, miúdos, CP e adições*) o que acarreta na diminuição dos espaços vazios entre as partículas que precisam ser preenchidos com água.

Com o empacotamento pode-se produzir concretos e argamassas mais sustentáveis porque produzem pastas com menor teor de materiais cimentícios, para dada resistência mecânica. Assim, obtém-se misturas com menores índices de vazios através de uma seleção granulométrica dos materiais componentes, o que propicia a substituição parcial do clínquer e a otimização no uso do CP.

De forma simplificada, o empacotamento de partículas consiste na busca de materiais cujas composições granulométricas procuram encaixar, nos vazios dos grãos maiores, outros de dimensões menores com o objetivo de se obter o máximo preenchimento possível dos vazios entre as partículas, resultando na diminuição da porosidade e conseqüentemente

aumentando a resistência mecânica, propiciando durabilidade e vida útil as estruturas de concreto (OLIVEIRA et al., 2000).

Concomitante a estes ganhos podem ser citados os estudos de Damineli et al. (2015) onde concretos e argamassas Elaboradas por meio do conceito de empacotamento de partículas podem propiciar maior fluidez e menor utilização de CP para um mesmo desempenho. Através da diminuição dos vazios há uma redução do teor de água (*uso de superplastificantes*) para atingir a mesma fluidez gerando maior resistência no concreto.

O trabalho de Fennis et al. (2008) a respeito do empacotamento de partículas sobre a permeabilidade de concretos mostra que houve redução na quantidade de CP e água e sua influência na diminuição da segregação.

Também Fennis e Walraven (2012) constataram a eficácia da redução no consumo de CP por meio do empacotamento, possibilitando a produção de um concreto ecológico com 50% de substituição por AM.

Conforme Mangulkar e Jamkar (2013) a proporção entre o volume de sólidos das partículas de agregado pelo volume total dos mesmos pode ser definida como densidade de empacotamento conforme equação:

$$(\Phi) = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{V_s + V_v} = 1 - e \text{ (equação 3.3)}$$

Onde:

Vs: volume de sólidos;

Vt: volume total;

Vv: volume de vazios;

e: vazios.

Vários são os modelos de empacotamento de partículas esféricas, onde se pode calcular a densidade de empacotamento. Alguns modelos utilizam a abordagem discreta enquanto, outros, a contínua. Os principais modelos matemáticos clássicos para a realização do empacotamento de partículas são: a) Furnas (1931); b) Anderegg (1931); c) Andreassen e Andersen (1930).

Segundo alguns autores, o modelo de Furnas (1931) é menos utilizado devido ao seu grau de complexidade dificultando sua aplicabilidade, enquanto que o modelo de Andreassen e Andersen (1930), devido a sua praticidade, é mais utilizado, pelo fato de ser semi-empírico.

Ambos os modelos [Furnas (1931) e Andreassen e Andersen (1930)] serviram de base para Funk e Dinger (1992) conceberem o modelo de “*Andreassen modificado*”, o qual possui a característica de levar em consideração o tamanho da menor partícula na composição do empacotamento.

Este modelo consiste em um dos mais utilizados, porque apresenta otimização das curvas granulométricas a partir da composição de partículas intermodais discretas, sendo representado pela expressão:

$$CPFT = \left[\frac{(d^q - d_m^q)}{(D^q - d_m^q)} \right] \cdot 100 \text{ (equação 3.4)}$$

Onde:

CPFT: percentual acumulado de finos menor que “*d*” em volume;

d: tamanho da partícula;

dm: menor tamanho de partícula da distribuição;

D: maior tamanho de partícula da distribuição;

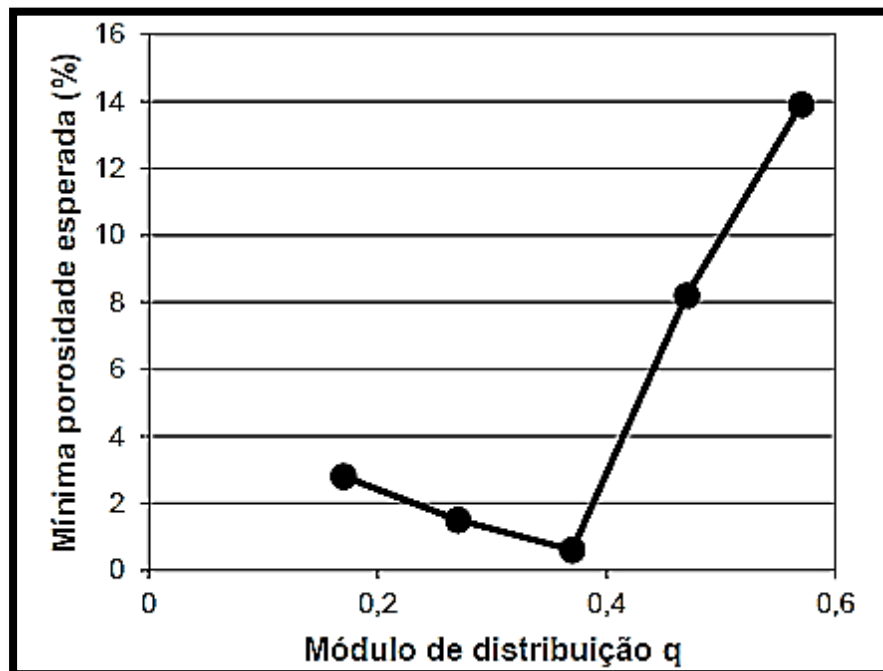
q: coeficiente de distribuição.

O conceito do expoente “*q*” relaciona-se com a capacidade da mistura em “*acomodar*” partículas de menor tamanho. Desta maneira à medida que o valor de “*q*” aumenta há um incremento de partículas de maior tamanho, enquanto que uma diminuição se traduz em um incremento de partículas de menor tamanho (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). Oliveira et al. (2000) colocam que um intervalo no valor de “*q*” entre 0,33 e 0,50 tende a maximizar o empacotamento de partículas.

Funk e Dinger (1993) demonstraram que o valor de 0,37 para “*q*” produz a máxima densidade de empacotamento, conforme Figura 3.14. No entanto, segundo os autores, este valor de “*q*” somente é viável por ocasião do menor diâmetro (*Ds*) ser zero, sendo esta condição não realista. Assim a melhor maneira de elaborar concretos que maximizem o empacotamento ocorre por meio da utilização do menor valor possível para *Ds*.

Segundo Oliveira et al. (2000), a distribuição granulométrica descontínua para concretos possui a característica de proporcionar uma fluidez adequada. A fim de atender este preceito, os concretos devem possuir um afastamento elevado entre as partículas maiores (“*q*” da fração grossa 0,21) e os interstícios preenchidos por partículas menores (“*q*” da fração fina 0,37). Neste caso os dois domínios de forças (*superficiais e gravitacionais*) são contemplados, propiciando boas condições para a fluidez do sistema como um todo.

Figura 3.14 – Mínima porosidade calculada pelo modelo de Andreassen modificado em função do módulo de distribuição, grão mínimo de 0,17 μm e grão máximo de 16 mm



Fonte: Funk e Dinger (1992).

Considerando que os modelos de empacotamento estão baseados na premissa que as partículas menores irão preencher os espaços deixados pelas partículas maiores, este arranjo proporcionará um aumento da densidade por meio da diminuição dos vazios. No entanto deve-se levar em conta que as partículas maiores, ainda, estarão em contato entre si o que acarretará em uma mistura com baixa fluidez. Desta forma faz-se necessário uma verificação do comportamento da mistura após a inserção do fluido por meio do estudo reológico.

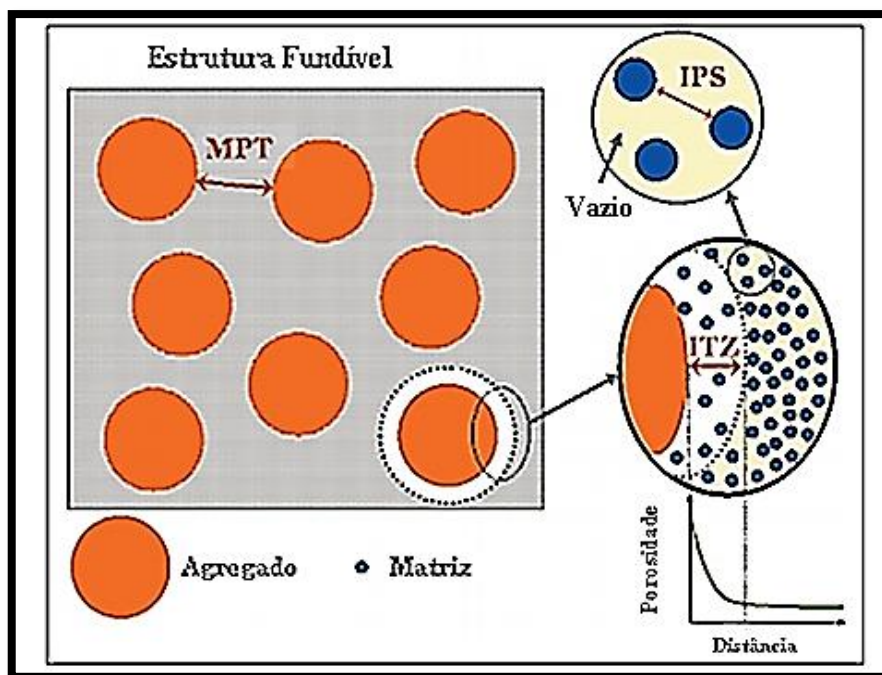
Concretos são suspensões compostas de: a) agregados com diâmetro $> 125 \mu\text{m}$ (*baixa área superficial e predominância de forças de massa*); b) finos reativos ou inertes com diâmetros menores $< 125 \mu\text{m}$ (*área superficial maior com predominância de forças de superfície*); c) água. A água é o fluido que move as partículas finas, sendo que da união dessas com a água forma-se a pasta que, por sua vez, move os agregados. Desta forma são necessários diferentes modelos de empacotamento de partículas para determinar o comportamento reológico do concreto.

Assim para um bom projeto de empacotamento, que vise alta eficiência dos materiais cimentícios, é necessário o cálculo dos vazios entre as partículas, ou seja, o cálculo da porosidade intergranular, que indica o mínimo teor de fluido necessário para preencher os vazios. Oliveira et al. (2000) mostram que a distância entre as partículas do concreto pode ser

calculada por dois indicadores: a) IPS (*Inter Particle Spacing*) que mede a distância entre os finos, sendo determinada pelo teor de água, o fluido que os afasta e, também, pelas características físicas dos finos, como a área superficial; b) MPT (*Maximum Paste Thickness*) que mede a distância entre os agregados e é determinado diretamente pelo teor de pasta, já que é o fluido que afasta os agregados.

Além do IPS e do MPT, Figura 3.15, deve ser levado em conta as restrições de empacotamento da superfície do agregado (*efeito parede*), uma região de maior porosidade e menor tortuosidade formada na interface matriz-agregado denominada ITZ (*Interfacial Transition Zone*) (BENTZ et al., 1992; SCRIVENER; NEMATI, 1996). O tamanho relativo das partículas da matriz e dos agregados, bem como da ligação química promovida pelo CSH são características que compõe a ITZ.

Figura 3.15 – Esquemática da estrutura de um concreto com os parâmetros de separação entre partículas (*IPS/MPT/ITZ*)



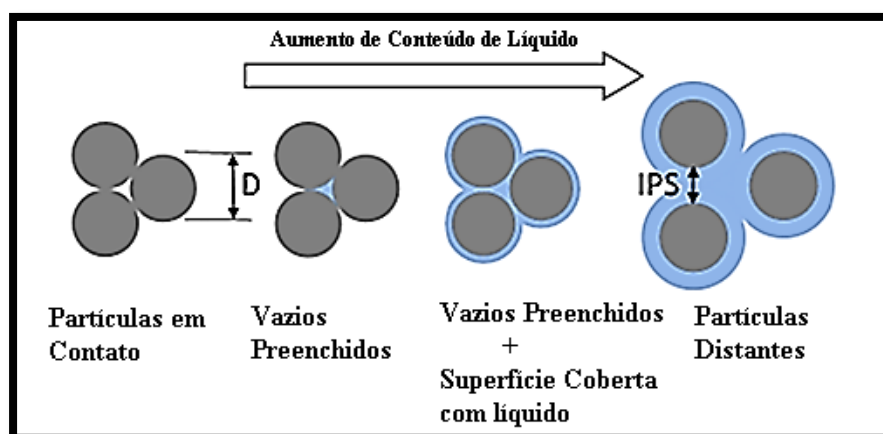
Fonte: Innocentini et al. (2002).

Conforme Daminieli (2013) um projeto de empacotamento precisa diminuir os vazios ao máximo possível, para tanto são necessárias duas ações básicas: a) diminuir os vazios intergranulares da pasta por meio da combinação de finos de diversas distribuições granulométricas visando conseguir alto IPS, mesmo com pouca água, condição onde a fluidez é aumentada ao mesmo tempo em que a resistência à compressão é a maior possível devido ao

baixo teor de água; b) aperfeiçoar o esqueleto granular dos agregados para conseguir alto MPT com pouca pasta o que implica em otimização do teor de ligantes para a mesma resistência; c) nestas condições a otimização da pasta ocorre pela substituição de finos inertes (*fillers*) permitindo criar distribuições empacotadas que consomem pouca água e diminutos teores de ligantes, o que aumenta a eficiência do seu uso.

Com o intuito de aperfeiçoar o proporcionamento entre os componentes do concreto, no que se refere ao IPS, a água pode ser considerada um fluido em relação à pasta (*microescala*) e a pasta como um fluido para os agregados (*macro escala*). Na Figura 3.16 pode ser observado o efeito da água enquanto fluido em relação à pasta, ou seja, de pó seco (*esquerda*) para partículas afastadas (*direita*).

Figura 3.16 – Representação esquemática do modelo IPS. O volume da fase líquida (*água em materiais base de CP*) aumenta da esquerda para a direita



Fonte: John et al. (2018).

Os efeitos físicos apresentados pela AM inserem-se dentro dos conceitos de empacotamento das partículas, principalmente o IPS, embora não sejam estudados em conjunto, não só sob o ponto de vista deste espaçamento interparticular como os efeitos de nucleação oferecidos pelo potencial zeta o que ocasiona maior compacidade da pasta cimentícia. Por isso, o estudo integrado da união dos efeitos sinérgico-químico-físico-empacotamento, une a nano/microestrutura dos poros das pastas cimentícias com a sua meso/macroestrutura oferecida pelos agregados, integrando assim todas as fases do concreto num estudo único entre todas as dimensões de partículas, e dos respectivos compostos formados a partir da sua estrutura atômico-molecular, para formar uma matriz mais compacta e homogênea (DAMINELI, 2013).

Mangulkar e Jamkar (2013) afirmam que os métodos utilizados para a aplicação do empacotamento de partículas em concretos sugerem a medição do parâmetro de empacotamento de algum componente por meio da aproximação de uma curva “*ideal*”. Devido à aglomeração das partículas finas (*CP e AM*), a menor massa específica em relação ao CP e a área superficial elevada, ocorre um aumento das forças superficiais (*potencial zeta*) que predominam sobre as gravitacionais, ou seja, resultam em forças de atração maiores do que repulsão. Por essa razão deve-se utilizar aditivos superplastificante (*dispersantes*) para contornar esse inconveniente.

3.8.1 Elkem Materials Mixture Analyzer (*EMMA*)

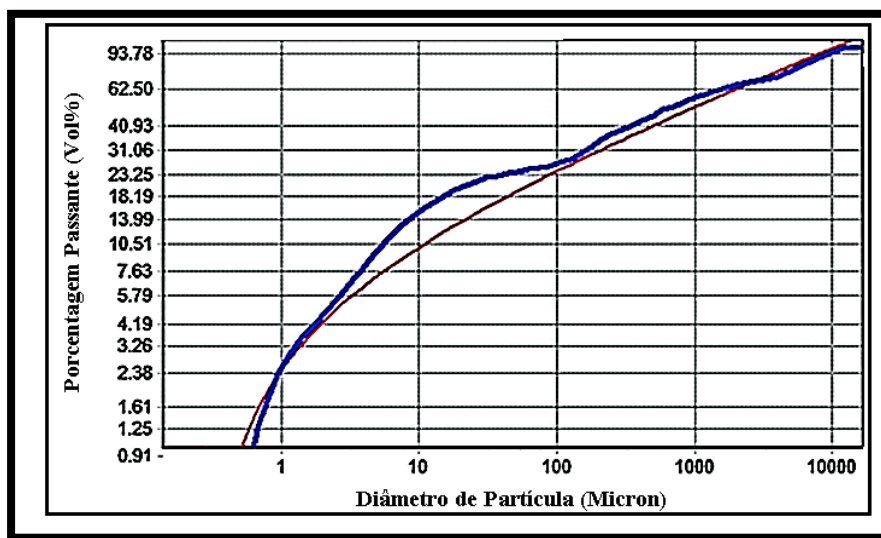
EMMA (*Elkem Materials Mixture Analyzer*) é um software livre, que calcula e apresenta a distribuição do tamanho de partículas de uma mistura de componentes, tendo sido desenvolvido pela empresa Elkem Materials, que se destaca na produção de produtos ambientalmente sustentáveis. Em que seu portfólio podem ser encontrados Silício de grau solar, Silício, ligas especiais para a indústria de fundição, Carbono e Microsilica.

O EMMA consiste em um programa que avalia o empacotamento de partículas, desenvolvido originalmente para a criação de composições moldáveis de refratários auto fluídos. O programa utiliza o modelo de Andreassen modificado para o empacotamento de partículas, calculando a distribuição do tamanhos do composto. Por meio de extensos testes de laboratório e documentação a empresa fornece a base para confecção de concretos auto adensáveis, de ultra alto desempenho entre outros (ELKEM, 2020).

O programa calcula, a partir das proporções prévias de cada material, com base nos dados informados, a curva da mistura e a curva de Andreassen. Desta forma, por meio da mudança na proporção entre os diferentes materiais de uma mistura (*concreto, por exemplo*) é possível buscar a aproximação da curva da mistura com a curva de Andreassen modificado. Contudo o programa não calcula as proporções de materiais a partir de suas curvas granulométricas. É possível observar na Figura 3.17 um gráfico oriundo do programa EMMA, no qual a curva em azul representa os materiais a serem ajustados sendo a curva em vermelho obtida a partir do modelo de Andreassen modificado.

No gráfico da Figura 3.17 é possível observar que as duas curvas possuem certa distância entre elas. O principal objetivo do empacotamento de partículas consiste na aproximação da curva em azul em relação à vermelha. Quanto mais próximas estiverem melhor será o empacotamento de partículas de tal forma que o somatório das áreas superiores possua o mesmo valor numérico do somatório das áreas inferiores.

Figura 3.17 – Exemplo de curvas de distribuição granulométrica do programa EMMA, em vermelho, a curva padrão, em azul, curva a ser ajustada



Fonte: Elkem (2020).

3.9 ACV E CCV

3.9.1 Introdução aos conceitos de ACV e CCV

A adoção de ferramentas de gestão ambiental são cada vez mais necessárias para a sociedade devido à crescente importância dos aspectos ligados ao meio ambiente. Estas ferramentas possibilitam mensurar os impactos ambientais das decisões tomadas em relação a processos e produtos seja no âmbito das empresas, governo ou instituições de ensino e pesquisa.

Ao lidar com impactos ambientais surge um problema de comparação entre produtos ou processos distintos. Com isso é necessário o estabelecimento de critérios de comparação comuns afim de que a abordagem possa ser completa.

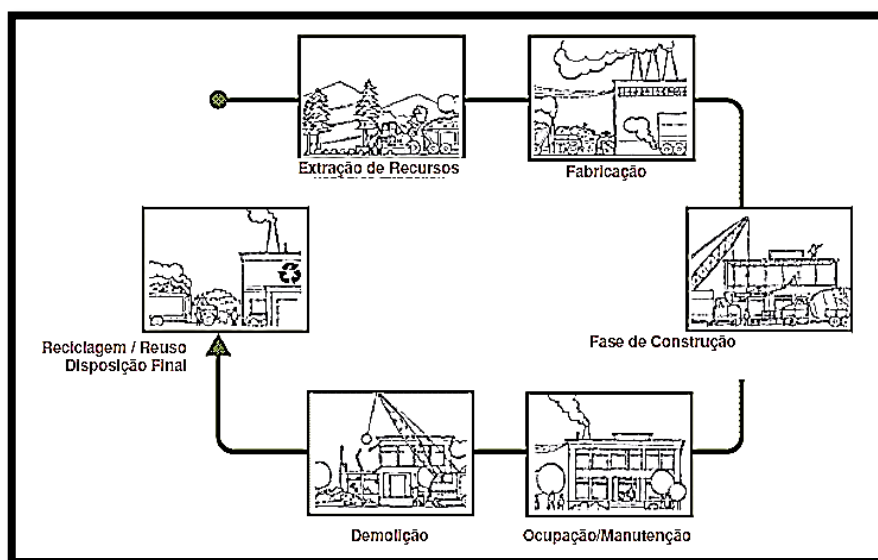
Com o intuito de contribuir para a solução deste problema foi desenvolvida uma ferramenta denominada de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos ou serviços que consiste em uma metodologia que leva em consideração a avaliação dos aspectos ambientais em todas as fases da vida de sistemas e produtos. A ACV visa estabelecer uma vinculação em relação ao impacto potencial no que se refere ao consumo de recursos naturais, saúde humana e à ecologia (ABCV, 2020).

O inventário dos impactos ambientais de todas as atividades da cadeia produtiva constituem em um dos objetivos primordiais da ACV. Primeiramente devem ser identificadas

as “*entradas*” e “*saídas*” (*matéria e energia*) do empreendimento em questão (SEO; KULAY, 2006). Num segundo momento devem ser avaliados os impactos ambientais potencialmente associados a essas “*entradas*” e “*saídas*”.

Do ponto de vista da cadeia produtiva da construção civil as principais etapas são (Figura 3.18): a) extração de recursos; b) fabricação; c) construção; d) ocupação e manutenção; e) demolição; f) destinação de resíduos.

Figura 3.18 – Ciclo de vida na construção civil



Fonte: Fuller (2020).

Com a finalidade de difundir a ferramenta da ACV, bem como orientar sua aplicação foi elaborada a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d), cujos principais aspectos são: a) identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em várias etapas do ciclo de vida; b) tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais; c) escolha de indicadores mais confiáveis de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; d) marketing, quando produtos ou serviços são identificados como cumpridores de requisitos ambientais.

Outro aspecto relacionado à ACV, diz respeito à análise dos custos de um produto, processo ou atividade ao longo da sua vida. Este mecanismo possui a denominação de Life Cycle Costs Analysis (*LCA*), ou, em português: Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida (*CCV*).

De maneira genérica estão incluídos nos custos do ciclo de vida de uma construção as seguintes fases: a) projeto; b) construção; c) operação; d) manutenção; e) reabilitação; f) demolição/desconstrução.

De modo expedito a estimativa dos custos do ciclo de vida podem ser determinados por meio da contabilização dos recursos dispendidos em cada uma dessas fases. Entre os recursos a serem dispendidos, destacam-se: a) disponibilidade financeira; b) disponibilidade de material; c) disponibilidade humana ou imaterial consumida ou utilizada na execução de atividades (REAL, 2010). As diferenças entre as duas metodologias (*ACV e CCV*) são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Diferenças entre ACV e CCV

Itens ACV e CCV	ACV	CCV
Objetivo	Impactos ambientais potenciais	Valores econômicos
Escopo	Materiais e produtos	Custos
Abordagem	Descendente	Ascendentes
Avaliação de impactos ambientais	Ar, água e solo	-
Avaliação de custos	-	Todos os custos
Unidade	Unidade física	Unidade monetária
Fluxos	Materiais e energia	Benefícios e custos

Fonte: Silva (2014).

3.9.2 ACV

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d) define as etapas que compõe a metodologia da ACV de um produto ou serviço: a) definição de objetivo e escopo; b) quantificação dos dados (*inventário*) de todas as entradas (*materiais, energia e recursos*) e saídas (*produtos, subprodutos, emissões, etc.*); c) identificação dos impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida; d) interpretação dos resultados do estudo.

3.9.2.1 Objetivo e escopo

O público alvo, abrangência e motivo para a condução do estudo são elencados na etapa de definição do objetivo. Em relação ao escopo devem ser considerados alguns parâmetros essenciais como: a) função; b) unidade funcional e fluxo de produto; c) definição de fronteiras; d) critérios para a utilização de cargas ambientais; e) categorias de impactos (SEO; KULAY, 2006).

Os resultados podem ser afetados caso a definição da fronteira não seja determinada de maneira adequada, pois consiste em um aspecto crítico (JOHN, 2010). Esta fase consiste em definir as etapas mais relevantes do processo. O critério mais comumente utilizado para esta decisão ocorre por escolha, tendo em vista a participação da etapa na massa ou energia total consumida pelo produto ou, ainda, pelo custo de produção.

A priorização das emissões mais relevantes no âmbito do trabalho consistem na definição dos parâmetros ambientais pois, desta forma é possível a redução de informações que contribuem para erros no estudo. Com relação à unidade funcional há possibilidade de comparação de produtos. É necessário o estabelecimento de uma mesma função e desempenho de produtos, sendo esta escolha dependente do objetivo do estudo.

São partes constituintes do escopo: a) especificações geográficas; b) técnicas; c) históricas; d) origem dos dados. A busca por estas informações pode levar muito tempo e acaba por ajustar o escopo (CHEHEBE, 1997).

Outro aspecto a ser observado diz respeito ao nível de detalhamento do estudo que se relaciona ao tempo, espaço, hipóteses e limitações. Os fluxogramas são geralmente utilizados para a determinação dos limites de uma ACV. Neles é possível observar a sequência do sistema, auxiliando, do ponto de vista gráfico, uma visão global dos sistemas e das inter-relações.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d) o processo que conduz ao estabelecimento do objetivo ou escopo pode possuir graus de complexidade elevados conforme o caso. É importante que seja garantida uma boa definição da extensão, da profundidade e do detalhamento do estudo com o intuito de alcançar o objetivo estabelecido. Não é fato incomum a redefinição do escopo do estudo ao passar por uma análise, devido à interação de uma série de fatores, tendo em vista que a ACV é uma técnica interativa.

3.9.2.2 Inventário

A coleta de dados tem como objetivo estabelecer os procedimentos de cálculo, conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d), para busca do agrupamento dos dados em categorias ambientais normalmente utilizáveis e comparáveis.

Como ponto mais importante considera-se que deve haver um balanço, ou seja, tudo o que entra deve ser igual ao que sai do sistema, em termos de energia ou massa, desde a extração das matérias-primas até o descarte final do produto.

Tendo em vista a complexidade da fase de coleta de dados, a qualidade das análise pode ser comprometida tendo em vista: a) a indisponibilidade de dados; b) a má qualidade dos dados disponíveis; c) a necessidade de estimá-los.

Várias são as fontes consultadas na fase de coleta, dentre elas destacam-se: a) medidas em campo; b) dados de fornecedores; c) buscas bibliográficas. A busca de dados diretamente com fornecedores ou a partir de dados médios de setores industriais, referentes às matérias-primas, bem como a energia deve ser realizada de forma minuciosa (JOHN, 2010).

A condução do inventário constitui em um processo iterativo, cuja sequência envolve a verificação dos procedimentos (SEO; KULAY, 2006), formando uma fase complexa e trabalhosa, devido a uma séries de razões que estão relacionadas direta ou indiretamente à coleta de dados.

3.9.2.3 Avaliação de impactos

O processo de avaliação do impacto está elencado na norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d) onde é proposta uma estrutura em três etapas: a) seleção e definição das categorias estabelecidas com base no conhecimento científico; b) classificação dos dados nas categorias selecionadas; c) caracterização, os dados são modelados por categoria de forma que cada um possa ter o seu indicador numérico.

Impactos potenciais ao meio ambiente não são gerados somente na fase de produção (JOHN, 2010), também causam impactos ambientais importantes o transporte, montagem em canteiro e fase de uso, além da demolição. Tendo em vista que a fase de uso é a mais extensa que as demais, deve se levar em conta os hábitos ou atividades desenvolvidas pelos usuários no momento de contabilizar sua contribuição nos processos poluidores.

Deve-se considerar que cada fase pode ter impactos positivos e negativos ao meio ambiente. Constituem em impactos ambientais negativos: a) mudanças climáticas; b) diminuição da camada de ozônio; c) acidificação; d) consumo de combustíveis fósseis. e) degradação ambiental; f) poluição do ar; g) interferência na saúde pública; h) consumo de água; i) consumo de energia; j) geração demasiada de resíduos; k) toxidade ambiental; l) smog ou névoa seca. Por outro lado, a fixação de CO₂ nas estruturas de concreto constitui em um impacto ambiental positivo.

Inúmeras informações são necessárias por ocasião do cálculo da quantidade de emissões e resíduos gerados durante o ciclo de vida de um produto (O'NEILL, 2003), que podem ser obtidas em bancos de dados genéricos ou específicos. A fim de facilitar a busca

existem programas de computador que simulam modelos para ACV. Eles são desenvolvidos com o objetivo de auxiliar os cálculos dos impactos ambientais, dentre eles destacam-se: Boustead, SimaPro, Gabi e Umberto, entre outros.

Devido ao grau de complexidade de algumas ACV's, que demandam uma grande quantidade de informações, são oferecidas bibliotecas de produtos e/ou processos nos respectivos programas. Dentre os principais bancos de dados destaca-se o Ecoinvent, nele é possível acessar uma biblioteca de inventários com valores de cargas ambientais (*entradas e saídas de materiais, substâncias e energia*), associadas ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos, sistemas de energia, de transporte, de disposição de resíduos, entre outros.

A ABCV (2020) considera a fase de avaliação dos impactos como não científica. A razão ocorre pela possibilidade dos técnicos poderem atribuir pesos aos resultados da avaliação, tendo em vista que a ponderação envolvida no processo pode envolver critérios subjetivos.

3.9.2.4 Interpretação dos resultados e tomada de decisão

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2014d) e a NBR ISO 14044 (ABNT, 2014e) são as responsáveis pela interpretação dos resultados de uma ACV, consistindo em uma das etapas mais importantes, pois as hipóteses definidas durante as fases anteriores, podem resultar na alteração do resultado final do trabalho.

Nesta etapa são realizadas a análise e identificação dos resultados, que foram encontrados das fases de inventário ou avaliação de impactos do estudo da ACV (SEO; KULAY, 2006). Para os profissionais que utilizam ACV, a fase de interpretação dos resultados reveste-se de caráter conclusivo e/ou de recomendação, e constitui em um importante auxílio no processo de tomada de decisão.

É necessária a realização de uma revisão crítica a ser elaborada por um especialista independente, tendo em vista o grau de complexidade do trabalho, bem como para a redução de erros e riscos de abusos e/ou manipulações. Em se tratando de afirmações comparativas ou públicas, a revisão crítica é obrigatória por norma. Esta providência é importante tendo em vista que o uso dos resultados de uma ACV pode afetar partes interessadas que são externas ao estudo. A análise crítica pode ser realizada tanto por uma comissão como por um membro isolado (*especialista*), devendo ser incorporada no relatório de estudo da ACV (ABCV, 2020).

3.9.3 Ciclo de vida modular

Uma das principais peculiaridades da ACV é o seu grau de limitação devido à grande abrangência da proposta que visa analisar todos os fluxos de materiais e produtos que fazem parte do ciclo de vida do produto ou serviço (GIANNETTI et al., 2007).

Com o objetivo de minimizar esta e outras limitações, o Conselho Brasileiro da Construção Sustentável (CBCS) propõe uma plataforma global simplificada da ACV (CBCS, 2014), para alcançar os mesmos resultados de uma ACV tradicional, contudo com uma redução no tempo e custo, ou seja, uma ACV simplificada. Assim nasce o ACV modular (ACV-*m*) que está ligada intimamente com a metodologia da ACV tradicional. A ACV-*m* pode ser considerada um programa piloto para o surgimento de uma plataforma nacional de ACV simplificada. Ela é direcionada para a área de materiais de construção cujo foco está relacionado com os principais produtos do setor.

A confiabilidade dos resultados de uma ACV, bem como sua acurácia podem ser afetados pela simplificação da aplicação da ACV-*m*. A fim de diminuir os riscos indevidos, faz-se necessário a identificação das áreas da ACV que podem ser simplificadas e/ou omitidas, sem o comprometimento relevante dos resultados finais.

Segundo Giannetti et al. (2007) consistem em meios para a simplificação da ACV: a) omitir estágios do ciclo de vida; b) dar ênfase a alguns impactos ambientais; c) limitar o inventário; d) omitir alguma avaliação de impacto; e) utilizar estudos anteriores, principalmente os dados. Em se tratando de construção civil, em nível nacional, deve-se levar em conta a escassez de informações para compor a ACV-*m*. O mercado já tem demandado a contabilização dos impactos ambientais da empresa/produtos nos seguintes aspectos: a) consumo de energia; b) água; c) consumo de matérias primas; d) geração de resíduos; e) efluentes; f) emissão de CO₂ (CAMPOS, 2012).

Neste quesito a ACV-*m* apresenta vantagens, constatando-se que há uma diminuição no grau de complexidade dos dados, tornando o processo mais amigável, propiciando a realização do levantamento em pouco tempo. Portanto a ACV-*m* propõe-se a apresentar uma diminuição de custo e tempo, podendo ser aplicada em uma grande variedade de materiais de construção.

3.9.4 ACV e o concreto

Como dito anteriormente, apesar da sua pequena massa no concreto o peso do CP na emissão de CO₂ é majoritária, contribuindo, de forma decisiva, para a aceleração das

mudanças climáticas. Em estudo realizado por Nielsen (2008) foram compilados dados referentes à emissão de CO₂ proveniente do concreto, o autor efetuou os cálculos da quantidade de CO₂ gerada para a produção de um concreto com resistência característica de 35 MPa e fator a/ag de 0,4, produzido na Dinamarca, chegando as seguintes conclusões: a) o transporte das matérias-primas e produtos acabados tem pequena influência, exceto quando as distâncias são grandes; b) a calcinação do clínquer responde pela maior emissão de CO₂, e quando substituído por AM, há uma redução dos impactos; c) a possibilidade de reutilização de concreto britado na área de pavimentação é interessante do ponto de vista ambiental.

A redução do consumo de clínquer constitui na medida mais eficiente para diminuir as emissões de CO₂, conforme mostra a literatura. O CO₂ gerado na produção do CP pode ser reduzido com a utilização de AM, tanto naturais como subprodutos de outros processos (AGOPYAN; JOHN, 2011; LIMA, 2010). Contudo é necessário um estudo prévio do tipo e teor da substituição, tendo em vista que as AM podem não ter um bom desempenho em algumas aplicações, acarretando uma aceleração na carbonatação e/ou facilitando ataques químicos.

A utilização de combustíveis que apresentam menores emissões constitui em uma ótima oportunidade para reduzir a poluição atmosférica. Em nível nacional os obstáculos para a implantação de combustíveis mais amigáveis ao meio ambiente são: a) custo; b) disponibilidade; c) limitação da tecnologia de queima. Neste caso deve-se levar em conta que os fornos possuem condições de operar com diversos tipos de combustíveis levando a diferentes taxas de emissão de CO₂.

A utilização de resíduos como combustível para os fornos são uma boa alternativa do ponto de vista ambiental, reduzindo a necessidade de combustíveis fósseis, aumentando a vida útil dos aterros e minimizando a emissão de metano. Todavia é importante levar em conta o incremento na emissão de gases poluidores com a utilização de resíduos (LIMA, 2010).

Ao realizar ACV em uma estrutura de concreto deve-se primeiro entender todos os aspectos do seu ciclo de vida. Para tanto um levantamento minucioso dos fluxos que envolvem as etapas de produção devem ser realizados. Estes fluxos devem levar em conta: a) a obtenção da matéria-prima; b) transporte; c) produção; d) resíduos; e) pós-uso.

O aumento da vida útil das estruturas de concreto, que são elementos de difícil substituição, tem como significado o adiamento na geração de resíduos. O planejamento da vida útil tem por base um sólido conhecimento dos mecanismos de degradação da estrutura de concreto (AGOPYAN; JOHN, 2011) porque, com base neste conhecimento, pode-se projetar soluções estruturais e selecionar materiais com o propósito de fazer frente ao processo de degradação.

Outro aspecto importante a ser destacado são as fases de uso, manutenção e demolição da construção, porque, no que diz respeito à ACV, são etapas importantes e não podem ser esquecidas. Vale ressaltar que a minimização de um impacto ambiental, na fase de construção, pode significar menor impacto global. Muitas vezes medidas de maior impacto adotadas na fase de construção podem reduzir a manutenção, o consumo de energia e água, ou acrescentar durabilidade.

Benefícios ambientais podem ocorrer da redução dos desperdícios em obra, tais como: a) dos materiais extraídos; b) dos materiais descartados, prolongando assim a vida útil de aterros; c) do consumo de energia incorporada à construção; d) do consumo de água; e) das emissões atmosféricas. Desta maneira a diminuição na emissão de poluentes ocorre por meio da redução dos desperdícios no canteiro de obras (CYBIS; SANTOS, 2000).

Outro enfoque para a ACV ocorre pelo seu uso em atividades estratégicas de uma organização, tais como projeto de novos produtos e reavaliação de produtos já existentes, sendo possível realizar novas opções de projetos com base nos resultados da ACV (SEO; KULAY, 2006). Dentre as possibilidades destacam-se: a) novos materiais; b) formas de energia alternativas; c) implantação de melhorias de processo visando à minimização de perdas; d) a concepção de produtos menos agressivos ao meio ambiente. Contudo Lima (2010) adverte que os esforços na redução dos impactos ambientais em componentes de concreto, podem ser perdidos caso a aplicação do concreto apresente desperdícios.

3.9.5 CCV

A norma NBR ISO 15686-5 (ABNT, 2017) define CCV como sendo a mensuração do custo de um bem ou produto (*ou mesmo de suas partes*) no transcorrer do seu ciclo de vida, afim de que possam ser atendidos os requisitos de desempenho para os quais o mesmo foi concebido. Um estudo de CCV deve levar em conta os custos dentro de um determinado período de tempo definido pelo ciclo de vida, tais como: a) custos de construção; b) operação; c) manutenção; d) disposição final.

O CCV tem sua origem da década de 1960 nos Estados Unidos. Inicialmente foi concebido pelos militares norte-americanos como ferramenta de suporte na aquisição de equipamentos militares. Sua aplicação na área da construção civil remonta a década de 1970, por ocasião da sua aplicação na comparação de alternativas energéticas para edificações. Mais tarde o CCV foi aplicado com o objetivo de efetuar análises comparativas de projetos no âmbito técnico e econômico (COLE; STERNER, 2000; JOHNSON, 1990; LANGSTON, 2005).

O conceito básico do CCV ocorre por meio de uma metodologia de caráter econômico que pode contribuir para selecionar, entre as alternativas analisadas, ao longo de um período de tempo, a mais eficiente em termos de custos (REAL, 2010). A principal característica de um CCV é a verificação e análise dos componentes de custos de um produto que mais se destacam durante seu ciclo de vida. Por outro lado, pode ser utilizado como critério suplementar no que se refere à verificação da sustentabilidade de um produto (KOTAJI et al., 2003; PARDINI, 2009; SILVA, 2007).

O CCV constitui em uma ferramenta que permite a comparação entre diversas alternativas, neste caso poderá apontar, dentro das informações disponíveis, aquela solução de menor custo global.

Existem várias ferramentas técnicas de gerenciamento e controle de custos, que podem ser aplicadas durante o ciclo de vida de um produto, sendo uma delas o CCV. Outra possibilidade é indicar a viabilidade de certas inovações ou metas relacionadas a um produto, indicando se elas possuem sustentabilidade a médio ou longo prazo (PARDINI, 2009).

3.9.5.1 CCV e as construções

Quando da aplicação do CCV, em construções, pode-se defini-lo como sendo o custo ao longo da vida útil. Assim sendo deverão ser contemplados os custos referentes à: a) aquisição; b) instalação; c) ensaios; d) energia; e) operação; f) manutenção (*preventiva e corretiva*); g) ambientais; h) demolição. Com isso o desempenho econômico da construção, ao longo do período de tempo especificado, pode ser medido por meio desta metodologia através da norma E917 – 17 e 1 (ASTM, 2017).

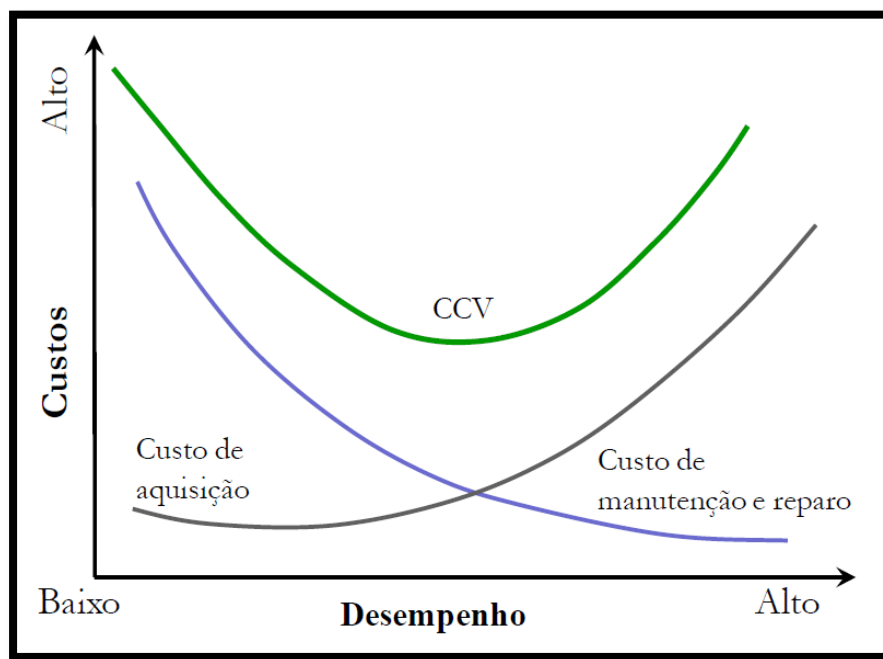
Levando-se em consideração um dado período de tempo é possível a determinação de um custo mínimo por meio da utilização da metodologia do CCV. A aplicação tem como objetivo o estabelecimento de procedimentos para a avaliação dos custos durante o ciclo de vida de uma construção.

O modelo também se aplica para a comparação entre alternativas de diversos modelos de construção que venham a satisfazer as mesmas exigências funcionais. Por conseguinte o modelo enseja que as incertezas, efeitos não quantificáveis e as restrições de financiamento (*por exemplo*) devem ser considerados na análise final segundo a norma E917 – 05 (ASTM, 2017).

Tendo por base o elenco de alternativas de projeto que levem a diferentes custos de construção, operação, manutenção, reparo e reabilitação, durante a vida útil de determinada

construção, é possível a elaboração de uma curva de desempenho e uma curva de custos ao longo do tempo conforme apresentado na Figura 3.19 (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Figura 3.19– CCV x custo de construção e manutenção

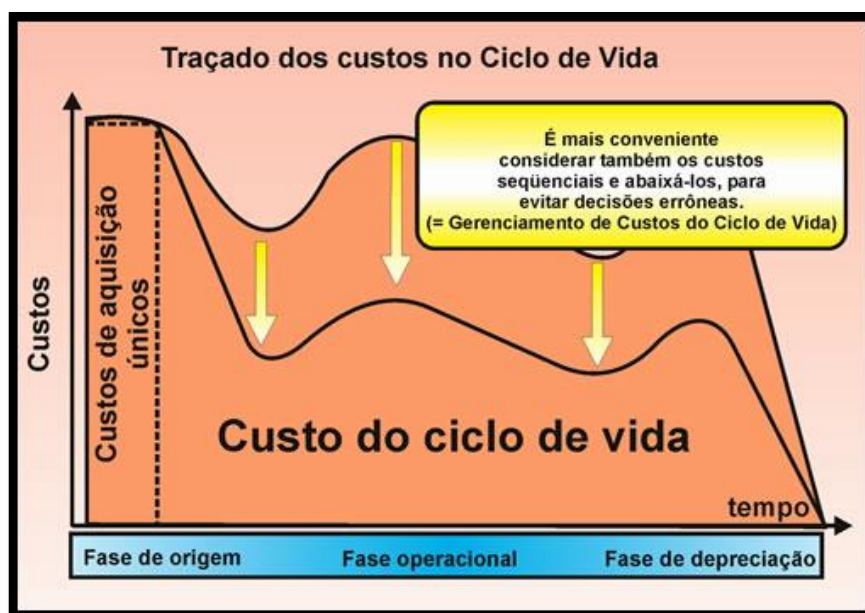


Fonte: Possan e Demoliner (2013).

É importante considerar, na aplicação do CCV, sua vocação em ir além dos métodos tradicionais. Por exemplo, o conceito do ciclo de vida da construção precisa ser considerado na fase de estudo de viabilidade, sob a ótica dos custos e receitas. A aplicação do método não deve somente considerar um fluxo que contenha os investimentos iniciais e receitas provenientes da comercialização e/ou locação de unidades, mas também que contemple custos de operação e uso da construção (SILVA; PARDINI, 2010).

Ao considerar o ciclo de vida da construção como um todo é possível constatar que o investimento inicial representa um percentual reduzido quando comparado com o restante dos custos (YOSHITAKE, 1995). É fundamental, no processo de decisão, ter em mente que os custos de operação e manutenção são maiores que os custos iniciais, levando-se em conta o ciclo de vida da construção (PARDINI, 2009), conforme pode ser observado na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Traçado dos custos no ciclo de vida



Fonte: Duch (2007).

Deve-se levar em conta o caráter duradouro de uma construção. Não parecer ser adequado, do ponto de vista econômico, muito menos do ponto de vista ambiental, considerar as construções como produtos descartáveis. É inevitável que, em um dado momento, a construção venha a apresentar níveis de desempenho inferiores aos exigidos pelos usuários, neste momento a substituição não pode e não deve ser considerada como primeira opção.

Neste caso as manutenções são importantes atores na continuidade e ampliação da vida útil das construções. Diversos estudos apontam que um percentual entre 1% e 2% do custo inicial estejam envolvidos de forma direta e/ou indireta nas despesas anuais de manutenção de uma construção. Ressalta-se que, aparentemente, o percentual é reduzido, todavia deve ser levado em conta o gasto total durante a vida útil da construção. Estudos apontam que os custos de manutenção podem ser iguais e/ou superiores ao investimento inicial em uma construção conforme a NBR 5674 (ABNT, 2012).

Uma das principais potencialidades do CCV é sua utilização como ferramenta de comparação entre diversas alternativas de custo durante o ciclo de vida de uma construção. Neste caso o CCV indica qual solução apresenta o menor custo global (*ao longo da vida útil*), levando em considerações todas as informações disponíveis. Desta maneira o CCV permite um aprimoramento da tomada de decisão por levar e conta uma estimativa de custo que leva em consideração todo o ciclo de vida da construção. Com isso há uma redução no custo e no tempo de execução da construção, bem como uma melhora na qualidade e no desempenho do projeto.

A determinação da vida útil de uma construção é de vital importância, sua consideração impacta diretamente os estudos de viabilidade, sendo capaz de influenciar o resultado final da análise, podendo inviabilizar o empreendimento. Em uma pesquisa realizada com 53 empresas na Suécia no ano de 1999 tendo como foco o setor da construção civil foi constatado que: a) mais de 80% usam o método do CCV na fase de projeto; b) mais de 50% o usam na fase de planejamento; c) 40% utilizam na fase de concepção e aquisição; d) 66% das empresas utilizam no processo de tomada de decisão (PARDINI, 2009).

Por outro lado, o CCV não constitui uma realidade no setor da construção civil brasileira. Muitas são as razões que estão relacionadas à sua não utilização, entre elas destacam-se: a) natureza complexa das operações de construção; b) a especificidade do projeto; c) curta duração de vida do projeto; d) as mudanças rápidas na estrutura e composição das equipes de construção; e) intensa concorrência dentro do mesmo grupo, por exemplo, contratantes; f) contraditórios papéis atribuídos a diferentes grupos, por exemplo, entre consultores e empreiteiros (REN; ZHANG, 2004).

Assim à utilização do CCV não faz parte do dia a dia do setor da construção civil. Não há uma percepção no setor que a aplicação do CCV poderia ser útil do ponto de vista das construções. Normalmente são os investidores e usuários que vislumbram melhor as benesses da aplicação do CCV, por sentirem, de forma mais direta, a economia decorrente de um melhor projeto. Para o restante dos atores vale a máxima de que os custos de operação e manutenção são de responsabilidade de quem utiliza a construção.

3.9.5.2 CCV e a sustentabilidade das construções

Por meio da utilização do CCV é possível obter uma visão mais abrangente dos custos ao longo da vida útil de uma construção, porque, na sua aplicação, são considerados as diferentes fases de um projeto o que possibilita um estudo que reduza os custos de operação e uso. Este enfoque é fundamental quando da priorização da qualidade e do valor da construção ao longo do tempo (NORNES, 2005). A aplicação do CCV também é importante na valoração das construções sustentáveis, onde o retorno gerado e sua tradução em valor são percebidos ao longo do ciclo de vida.

Com isso há a possibilidade da implementação de metodologias de avaliação ambiental, como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), tendo em vista que as mesmas são viabilizadas do ponto de vista econômico. Vale destacar que o CCV viabiliza a implantação de empreendimentos sustentáveis tendo em vista que, muitas vezes,

apresentam um custo de implantação superior às construções convencionais, mas inferior ao longo de sua operação (PARDINI, 2009).

Nesta mesma linha temos a posição de Gluch e Baumann (2004) que sugerem a implementação do CCV em relação a aspectos ambientais, porque desta maneira poderiam ser incluídos no processo de avaliação de uma construção, possibilitando a tomada de decisão com base na dimensão monetária. Assim a utilização de metodologias de avaliação ambiental possibilitariam maior excelência dentro do contexto da sustentabilidade, de outro lado o uso do CCV viabilizaria, do ponto de vista econômico, a construção (JOHN et al., 2007).

Brown (2003) exemplifica a colocação de John et al. (2007) utilizando a comparação do custo da eletricidade entre uma usina eólica e uma a carvão mineral. Em relação à energia eólica o valor da energia elétrica refletirá o custo com: a) fabricação da turbina; b) sua instalação; c) manutenção; d) fornecimento de energia aos consumidores. Em relação à energia termoeletrica o valor da energia elétrica refletirá o custo com: a) construção da usina; b) a mineração do carvão; c) transporte para usina; d) distribuição da eletricidade.

Porém, para obter-se um balanço de energia e massa corretamente, deve-se incluir o custo da perturbação climática causada pelas emissões de Carbono da queima do carvão: a) mais tempestades destrutivas; b) degelo de calotas; c) elevação do nível oceânico; d) picos de calor; e) danos a lagos de água doce e florestas, causado pela chuva ácida; f) custos de tratamento de doenças respiratórias causadas pela poluição atmosférica. Assim, a estimativa do custo da eletricidade referente ao carvão será mais precisa, e a comparação com a eletricidade de origem eólica poderá gerar outro resultado.

Brown (2003) relata que uma maneira bastante adequada para solução deste problema seria reunir cientistas ambientais e economistas. Juntos poderiam calcular o custo da ação climática e, a partir deste cálculo, um imposto sobre eletricidade proveniente do carvão poderia ser criado, o que representaria o custo real deste combustível fóssil. Esse procedimento significaria que todos os tomadores de decisões econômicas, tanto governos quanto consumidores individuais, teriam as informações necessárias para tomarem decisões mais inteligentes e ambientalmente responsáveis.

Como dito anteriormente, o CCV não é muito difundido no setor da construção civil. Contudo sua utilização, em maior escala, contribuiria para a diminuição da visão imediatista de curto prazo da maioria das empresas do setor. O CCV poderia propiciar uma mudança no ambiente empresarial ao promover uma perspectiva mais abrangente e compatível com o conceito de construção sustentável (JOHN et al., 2007).

3.9.5.3 CCV: limitações

O CCV possui limitações que necessitam ser compreendidas para sua correta aplicação e interpretação dos resultados. Uma das suas principais fragilidades, refere-se às variáveis envolvidas. Devido às características de previsão em longo prazo, na maioria das vezes, as variáveis são estimadas. O CCV possui uma dependência bastante acentuada em relação à disponibilidade de informações. Com isso o grau de confiabilidade do processo está intimamente ligado com a qualidade dos dados de base. Outro aspecto a ser destacado refere-se à distorção dos resultados advindos da complexidade e subjetividade do processo como um todo (GLUCH; BAUMANN, 2004). É importante considerar a imprevisibilidade do método como sendo uma fragilidade. Apesar da consistência do método, por meio da análise de riscos e probabilidades, ainda não se pode conhecer o futuro (MORTON; JAGGAR, 1995).

O CCV possui boa parte de sua complexidade atrelada aos histórico dos dados. Existe uma série de variáveis envolvidas, entre elas destacam-se: a) as construções são diferentes; b) localizadas em diferentes áreas; c) construídas em épocas diferentes; d) operadas por uma variedade de proprietários e seus agentes. Um fator limitante diz respeito à inexistência de padronização para a coleta e armazenamento de dados e custos de construções. Existe um prazo demasiadamente longo entre a fase de projeto e de uso o que dificulta uma previsão mais precisa dos dados. A evolução constante nas condições de uso das construções que acarretam modificações e promovem distorção dos dados coletados (STERNER, 2000).

Conforme o autor, devido ao tempo necessário para a implementação de um CCV, ocorre uma majoração dos custos em relação aos profissionais envolvidos no projeto, o que dificulta a utilização do método. Os sistemas de contabilidade utilizados pelos gestores da construção e fornecedores raramente tornam possível à identificação, com precisão, dos custos de manutenção e reparação de componentes específicos. Apesar dos esforços em relação ao planejamento nem sempre é possível prever o custo futuro de operação e manutenção (JOHNSON, 1990; REN, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com vistas ao atendimento dos objetivos principal e específicos deste trabalho, neste capítulo são apresentados os materiais e métodos experimentais estudados, para mitigação dos impactos ambientais oriundos da utilização de misturas cimentícias, lançou-se mão de duas alternativas: a) substituição do clínquer; b) a otimização do uso de ligantes. A dosagem dos traços foi realizada por empacotamento de partículas, pela utilização de AM (*FC e CV*) e CH.

Os teores dos materiais aglomerantes foram escolhidos com base nos objetivos geral e específicos, com o uso do FC em substituição ao CP, em teores, de pelo menos o dobro permitido pela norma brasileira.

Tendo em vista que a NBR 16697 (ABNT, 2018a) permite um teor máximo de FC no CP de 25%, foi adotado, como parâmetro inicial, uma substituição de 50%, em volume, a partir do qual foram escolhidos os teores de 60% e 70% de FC em substituição ao CP para atender as misturas binárias, ternárias e quaternária com CV e CH. Foram determinados os traços com as seguintes diretrizes e configurações:

a) REF: traço referência com 100% de CPV-ARI que serviu de parâmetro de comparação com as demais misturas estudadas. A composição química deste CP, conforme relatório da ABCP (2019), apresenta teor de 7% de FC;

b) FC50: traço binário com 50% de CP e 50% de FC, atendendo ao objetivo específico de substituição do CP por, pelo menos, o dobro permitido pela norma brasileira;

c) FC60: traço binário com 40% de CP, 60% de FC, com o objetivo de formular misturas com elevados teores de FC;

d) FC60P: traço binário com 40% de CP, 60% de FC e película protetora, por motivo da maior vulnerabilidade frente à carbonatação, tendo em vista a redução da reserva alcalina;

e) FC60CH10: traço ternário com 40% de CP, 60% de FC e 10% (*adição*) de CH, objetivando essa última incorporar barreira química de proteção contra a carbonatação;

f) FC70CV10: traço ternário com 20% de CP, 70% de FC e 10% de CV, escolhendo-se esta pozolana para dar maior compacidade à pasta;

g) FC70CV10P: traço ternário com 20% de CP, 70% de FC, 10% de CV e película protetora;

h) FC70CV10CH10: traço quaternário com 20% de CP, 70% de FC, 10% CV e 10% (*adição*) de CH.

Foi adotado o fator a/ag 0,25 para todos os traços estudados com uso de aditivo hiperplastificante, tendo em vista que baixos valores de relação a/ag são imprescindíveis na concepção de concretos com elevados teores de FC (PROSKE et al., 2013). As características dos traços podem ser observadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Siglas adotadas para os traços estudados

Traços	Fator a/ag	Sigla adotada
100% CP	0,25	REF
50% CP + 50% FC	0,25	FC50
40% CP + 60% FC	0,25	FC60
40% CP + 60% FC + Pintura	0,25	FC60P
40% CP + 60% FC + 10% CH	0,25	FC60CH10
20% CP + 70% FC + 10% CV	0,25	FC70CV10
20% CP + 70% FC + 10% CV + Pintura	0,25	FC70CV10P
20% CP + 70% FC + 10% CV + 10% CH	0,25	FC70CV10CH10

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Os traços propostos possuem viabilidade de apresentar resultados promissores, segundo prospecções da literatura, tanto do ponto de vista das propriedades mecânicas como de durabilidade, como observado nos estudos de Antoni et al. (2012), Damineli (2013), Dhir et al. (2007), Fennis e Walraven (2012), Isaia et al. (2003), John et al. (2018), Palm et al. (2016), Proske et al. (2013) e Silva e Brito (2016).

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental foi dividido em três etapas, a primeira corresponde à obtenção e caracterização dos materiais da pesquisa, seguida da verificação da compatibilidade entre o CPV-ARI e o aditivo escolhido para a determinação do teor mais adequado.

A seguir realizou-se o estudo do empacotamento de partículas (*CP*, *FC*, *CV*, *CH*, *areias e brita*) com vistas à dosagem dos traços, para a obtenção de concretos com maior compacidade.

Na segunda etapa foi realizado estudo em concretos para determinação da resistência à compressão, ensaio de carbonatação acelerada e os ensaios de microestrutura: difração de raios-X (*DRX*) e análise termogravimétrica (*TG/DTG*).

Estes últimos tiveram o objetivo de avaliar os parâmetros da microestrutura dos traços estudados nas camadas carbonatada e não carbonatada, pela determinação dos seguintes

compostos: Hidróxido de Cálcio remanescente, teor de Carbonatos e teor de água combinada. A paralização das reações de hidratação foi realizada conforme Lothenbach et al. (2016).

Com base na análise termogravimétrica (*TG/DTG*) e na difração de raios-X (*DRX*) realizou-se estudo das interações físico-químicas que ocorreram quando são adicionadas as AM (*FC e CV*) e CH nas misturas binárias, ternárias e quaternária, assim como relacioná-las com os resultados de resistência à compressão e carbonatação acelerada.

Na terceira etapa foi realizada, a partir dos ensaios de durabilidade frente à carbonatação acelerada, a aplicação da ACV e CCV em duas unidades funcionais: a) um metro cúbico de concreto (*do berço ao portão*); b) um pilar estrutural de concreto (*do berço ao túmulo*). Esta etapa foi elaborada, para a ACV, segundo as normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014d; ABNT, 2014e) e, para CCV, segundo a NBR ISO 15686-5 (ABNT, 2017).

4.2 VARIÁVEIS DA PESQUISA

Nesta fase, são apresentadas as variáveis da pesquisa, que são: independentes, intervenientes e dependentes.

4.2.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes são inerentes à escolha e proporcionamento dos materiais constituintes do concreto sendo elas: a) idade do ensaio: 28 e 91 dias para a resistência à compressão do concreto e 3, 6, 9 e 12 semanas para a carbonatação acelerada; b) consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone 100 ± 20 mm.

4.2.2 Variáveis intervenientes

Variáveis intervenientes são as que possuem a capacidade de modificar as variáveis independentes e conseqüentemente influenciam nos resultados das variáveis dependentes, sendo elas: a) tipos de AM e aglomerante; b) teores de AM e aglomerante: misturas binárias FC50, FC60 e FC60P; misturas ternárias FC60CH10, FC70CV10 e FC70CV10P e mistura quaternária FC70CV10CH10.

4.2.3 Variáveis dependentes

Variáveis dependentes são aquelas que dependem diretamente das variáveis independentes, interferindo nos resultados, sendo elas: a) em concreto: resistência à compressão de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015b); profundidade de carbonatação; teor de água quimicamente combinada; teor de Portlandita e teor de Carbonato de Cálcio; b) em pastas: cone de Marsh para avaliação da compatibilidade entre CP e aditivo.

4.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.3.1 Aglomerantes

Foi utilizado o CPV-ARI, de alta resistência inicial, porque é o que se encontra no mercado brasileiro com menor teor de FC, (*máximo de 10%*) conforme NBR 16697 (ABNT, 2018a), cuja análise química apresentou teor de Calcita de 7%, Gesso 2,5% e perda ao fogo 0,5% o que levou a um teor de clínquer $\approx 90\%$ (ABCP, 2019).

Com o intuito de fornecer uma barreira química contra a carbonatação para os traços com reduzida reserva alcalina foi adicionado 10% de CH, proveniente de jazidas de origem Calcítica nos municípios de São José da Lapa e Pains (MG), da marca ICAL, estando em conformidade com a NBR 6473 (ABNT, 2003a), NBR 7175 (ABNT, 2003b) e NBR 9289 (ABNT, 2000), com classificação tipo CHI que consiste em uma CH mais pura com Óxidos totais $> 96,8\%$ na base não volátil e no máximo 5% de CO_2 .

O FC escolhido é proveniente da extração de jazidas localizadas em Caçapava do Sul (RS), originário de rocha Calcítica, tendo sido moído em moinho de bolas (*capacidade 50 L – Tabela 4.2*) em três diferentes tempos de moagem 60, 120 e 180 minutos, sendo utilizado apenas o FC com 180 minutos de moagem por apresentar a melhor composição granulométrica e índice de desempenho.

Tabela 4.2 – Especificação das bolas metálicas do moinho

Tipos de bolas	Quantidade (un)	Diâmetro (mm)	Peso unitário (g)	Peso total (kg)
Pequena	2.950	9,0	4,25	12,54
Média	935	14,0	14,51	13,57
Grande	135	16,4	25,57	3,45

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Conforme Machner et al. (2017), Makhloufi et al. (2015) e Vance et al. (2013), um FC com tamanho de partícula igual ou inferior à do CP contribui para: a) melhor empacotamento de partículas; b) maior superfície específica para os pontos de nucleação; c) maior reatividade contribuindo, do ponto de vista químico, para as reações de hidratação.

A CV procedente da usina termoelétrica de Candiota (RS) foi moída em tempos distintos no moinho de bolas, por 60 e 120 minutos, sendo selecionada a CV com 120 minutos de moagem, pelas mesmas razões apontadas para o FC. A CV tem como classificação uma pozolana Classe F, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014a).

4.3.1.1 Composição granulométrica dos aglomerantes

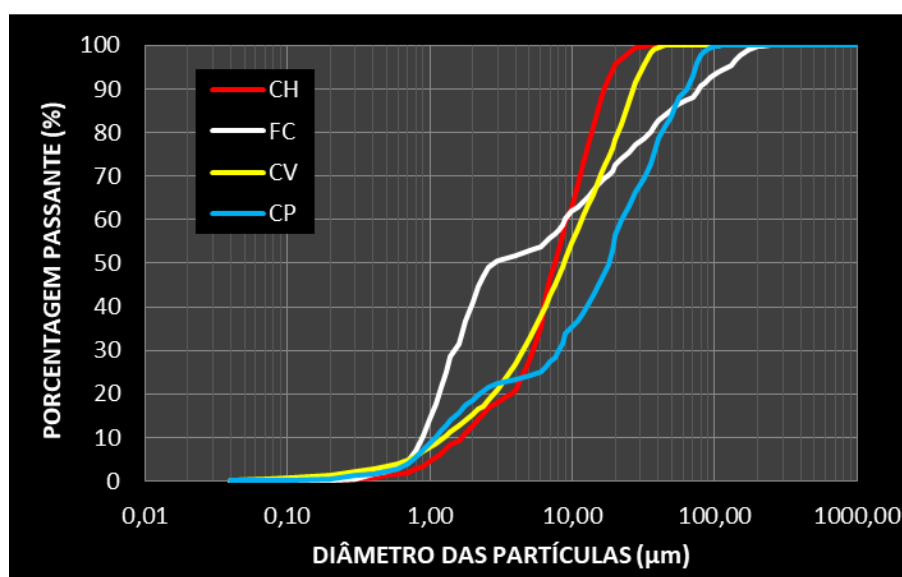
Na Tabela 4.3 encontram-se as dimensões das partículas do CP, FC, CV e CH.

Tabela 4.3 – Tamanho das partículas do CP, FC, CV e CH

Aglomerantes	Dimensão média (μm)	Diâmetro de 10% das partículas (μm)	Diâmetro de 90% das partículas (μm)
CPV-ARI	9,11	1,09	23,12
FC	2,09	0,73	19,42
CV	11,75	1,25	26,93
CH	8,02	1,48	15,88

Fonte: ABCP (2019).

Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos aglomerantes e AM



Fonte: ABCP (2019).

Na Figura 4.1, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas por granulometria a laser do CP, FC, CV e CH. A partir da Figura 4.1 e da Tabela 4.3 pode-se observar que a dimensão dos grãos de FC é menor que a do CP, CV e CH, até 10 μm .

Em termos médios os grãos de CV estão aproximadamente centralizados entre os demais, podendo contribuir nos traços ternários e quaternário para: a) a reatividade (COSTA; MASSAZZA, 1983; JATURAPITAKKUL et al., 2004; RAVINA, 1980); b) melhor densidade da pasta e da microestrutura da zona de transição (PAPADAKIS, 2000; SIDDIQUE; KHAN, 2011); c) aumento da resistência à compressão e redução na porosidade (BONDAR; COAKLEY, 2017; CHINDAPRASIRT et al., 2005); d) efeito físico (*nucleação, diluição e empacotamento*) e efeito químico (*pozolânico*) (DESCHNER et al., 2012); e) redução na demanda de água por meio do “efeito rolamento de esferas” (NEVILLE, 2016).

A finura da CH representada pela fração dos grãos superiores a 6 μm poderá contribuir com os traços ternários e quaternário através da fração inerte funcionando como agente de nucleação para a precipitação dos Hidratos de CP (HOPPE FILHO, 2008). Esta contribuição física da CH possibilitará melhores propriedades ao concreto no estado endurecido dentre elas o aumento da resistência à compressão, diminuição da carbonatação, entre outras.

As dimensões menores do FC ($< 10 \mu\text{m}$) podem contribuir para: a) empacotamento de partículas, especialmente o IPS (*Inter Particle Spacing*) (OLIVEIRA et al., 2000); b) efeito físico (*pontos de nucleação*) (BERODIER; SCRIVENER, 2015; SCRIVENER et al., 2015) e químico (*formação de Carboaluminatos*) (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017; BENTZ, 2006; BONAVETTI et al., 2003); c) maior consumo de água que poderá dificultar a trabalhabilidade da mistura demandando uso mais intensivo de aditivo para a mesma consistência (PROSKE et al., 2014), por outro lado o “efeito filer” poderá se contrapor a esta necessidade (TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010).

O tamanho das partículas de FC possibilitarão a compensação da diminuição do teor CP na mistura por meio da diluição, a qual, para o mesmo fator a/ag, provocam mais espaços para a formação de compostos Hidratados e, portanto, maior grau de hidratação do que nas misturas sem substituição (BERODIER; SCRIVENER, 2015; SCRIVENER et al., 2015).

Também, as partículas mais finas do FC ($< 10 \mu\text{m}$), poderão contribuir para o “efeito filer”. Entre os benefícios deste efeito destacam-se: a) redução na demanda de água; b) redução na exsudação; c) nos concretos endurecidos o bloqueio dos poros capilares reduzindo a penetração de agentes agressivos (TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010).

Outra contribuição do FC ocorre na fase hidratação, tendo em vista que sua finura colabora para a aceleração das reações (TAYLOR, 1997). Esta contribuição resulta em

aumento nos ganhos de resistência mecânica em idades precoces. Tanto Stark et al. (1999) como Hawkins et al. (2005), constataram o potencial reativo do FC em finuras mais elevadas, sendo que outros estudos apontam que a finura do FC melhora as propriedades globais do concreto (KUMAR et al., 2013; SUN et al., 2013).

4.3.1.2 Composição química dos aglomerantes

O resumo da composição química do CP, FC, CV e CH pode ser visto na Tabela 4.4. Pode-se verificar que a concentração de CaO é 53,6% e a de MgO é de 0,31%, desta forma o FC é classificado como Calcítico (PIMENTEL, 2013).

Tabela 4.4 – Composição química dos aglomerantes

Composição química	CP (%)		AM (%)		CH (%)
	CPV-ARI	NBR16697 ⁽¹⁾	FC	CV	
Óxido de Cálcio (<i>CaO</i>)	60,18	-	53,60	1,00	72,37
Dióxido de Silício (<i>SiO₂</i>)	19,89	-	1,04	68,81	1,77
Óxido de Alumínio (<i>Al₂O₃</i>)	4,87	-	0,20	23,51	0,36
Óxido de Ferro (<i>Fe₂O₃</i>)	2,83	-	0,27	4,70	0,16
Anidrido Sulfúrico (<i>SO₃</i>)	3,45	< 4,50	1,14	-	0,21
Óxido de Magnésio (<i>MgO</i>)	3,40	< 6,50	0,31	2,16	0,39
Óxido de Potássio (<i>K₂O</i>)	1,04	-	0,02	0,39	0,10
Óxido de Titânio (<i>TiO₂</i>)	0,30	-	-	0,16	-
Óxido de Estrôncio (<i>SrO</i>)	0,22	-	-	-	-
Anidrido Fosfórico (<i>P₂O₅</i>)	0,16	-	-	-	-
Óxido de Manganês (<i>MnO</i>)	0,04	-	-	0,68	-
Óxido de Sódio (<i>Na₂O</i>)	-	-	0,82	-	0,10
Perda ao Fogo (<i>PF</i>)	0,56	< 6,50	41,41	0,10	24,54

(1) (ABNT, 2018a)

Fonte: ABCP (2019).

O FC, também, atende aos requisitos da norma EM367/97 - Material de enchimento para misturas betuminosas (*filer*) (DNER, 1997). Em relação ao cálculo da estimativa do teor de CaCO₃ indicado pela NBR 16697 (ABNT, 2018a), deve-se dividir o teor de CaO por 0,56 ($53,6/0,56 = 95,7\%$), sendo que o valor mínimo exigido pela norma é de 75%, logo o FC atende as prescrições desta NBR.

O teor de CaCO₃ no FC contribui para as reações químicas de hidratação do CP na medida em que poderá reagir com o C₃A para a formação de Carboaluminatos (*Mono e Hemi*) (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017; BENTZ, 2006; BONAVETTI et al., 2003). O FC, também, atende aos requisitos químicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014a) referente aos teores de SO₃ e Na₂O.

Em relação a CV destaca-se, em sua composição química, o Óxido de Silício (SiO_2) com teor de 68,8% e o Óxido de Alumínio (Al_2O_3) com teor de 23,5%. Quanto a este último, seu teor é benéfico para as misturas ternárias e quaternária ao passo que poderá contribuir com Aluminatos adicionais para reação pozolânica.

Os Aluminatos adicionais amplificam o efeito de interação com o FC na produção de Carboaluminatos (*Mono e Hemi*) contribuindo para uma redução da porosidade do concreto. Assim a presença da CV, nas misturas ternárias e quaternária, poderá trazer um efeito sinérgico com o FC (DESCHENER et al., 2012; DE WEERDT et al., 2011). A CV atende aos requisitos químicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014a) no que diz respeito aos teores de SO_3 , Na_2O e perda ao fogo.

A CH caracteriza-se por ser Calcítica ou alto Cálcio CaO (72,37%) associado ao baixo teor de MgO (0,39%). Os baixos teores de Óxido de Ferro (0,16%), Alumínio (0,36%) e Anidrido Sulfúrico (0,21%) indicam que a CH tem elevado grau de pureza coerente com os Óxidos totais (96,42%) que constituem a fração aglomerante da CH.

A CH devido a sua composição química predominantemente Calcítica atuará nas reações pozolânicas propiciando um aumento no grau das reações a partir de um maior consumo de Portlandita o que implicará em incremento dos compostos hidráulicos formados (HOPPE FILHO, 2008). Com isso ocorrerá aumento nas propriedades do concreto que estão relacionadas com a estrutura de poros da matriz cimentícia que é refinada com a produção de CSH secundário no caso das misturas com CV.

O CPV-ARI atende aos requisitos químicos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018a) no que diz respeito aos teores de SO_3 , MgO e perda ao fogo.

4.3.1.3 Composição física dos aglomerantes

As características físicas e mecânicas dos aglomerantes e AM podem ser observadas na Tabela 4.5, bem como a micrografia de cada um nas Figuras 4.2 e 4.3.

O CPV-ARI apresenta superfície específica BET de $1.710 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$ sendo mais fino que os demais, até os grãos menores que $3 \mu\text{m}$, devido sua utilização para altas resistências iniciais. A CV apresentou uma superfície específica BET ($1.040 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$) próxima a do CP, caracterizando uma estrutura mais esférica. Já o FC apresentou o segundo valor mais elevado de superfície específica BET ($8.220 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$), sendo que a CH obteve o maior valor ($10.250 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$).

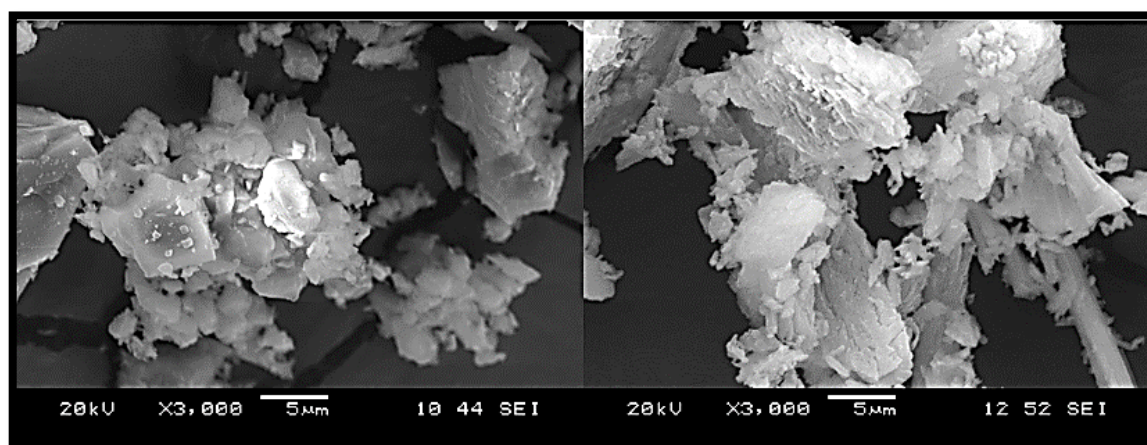
Tabela 4.5 – Caracterização física dos aglomerantes

Características físicas	CP		AM		CH
	CPV-ARI	NBR16697 ⁽¹⁾	FC	CV	
Massa específica ($g.cm^{-3}$)	3,03	-	2,69	2,36	2,30
Superfície específica BET ($m^2.g^{-1}$)	1,71	-	8,22	1,04	10,25
Índice de desempenho com CP aos 28 dias (%)	-	-	92,39	92,00	-
Material retido na # 75 μm (%)	0,54	< 6,0 %	12,74	-	1,36
Tamanho médio dos grãos (μm)	9,11	-	2,09	11,75	8,02
Início de pega (h)	3h:25min	> 1h	-	-	-
Fim de pega (h)	4h:15min	< 10 h	-	-	-
Consistência normal (%)	30,4	-	-	-	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	36,7 MPa	> 24 Mpa	-	-
	7 dias	46,8 MPa	> 34 Mpa	-	-
	28 dias	53,3 MPa	-	-	-

(1) (ABNT, 2018a)

Fonte: ABCP (2019) / Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 4.2 – Micrografia dos grãos de CPV-ARI (esquerda) e CH (direita)



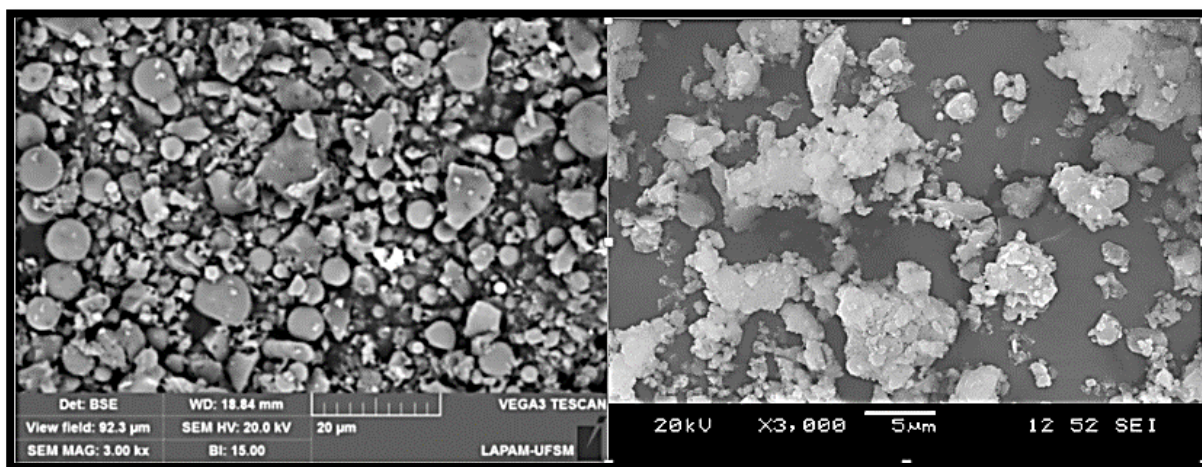
Fonte: LME (2019).

Na Figura 4.2 é possível observar a amostra dos grãos de CPV-ARI ampliada 3.000 vezes nota-se alguns grãos angulosos de Alita com formatos prismáticos e hexagonais. Também na Figura 4.2 observa-se amostra dos grãos de CH, também ampliada 3.000 vezes, com os poros apresentando relevo perceptível e formas irregulares, não sendo possível a identificação de formas cristalinas visíveis.

A finura constitui-se em uma das características físicas mais importantes da CH possuindo grande influência nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como endurecido, tendo em vista sua grande área superficial. Quanto ao CPV-ARI as análises físicas e mecânicas mostram que o mesmo atende aos quesitos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018a).

É possível observar na Figura 4.3 a amostra dos grão de FC apresentando uma estrutura mais esférica o que pode melhorar a eficiência do empacotamento das partículas através do “efeito *filer*” e, com isso, colaborar para uma redução na demanda de água (TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010). Também na Figura 4.3 observa-se os grãos de CV bem definidos com uma forma esférica proveniente do resfriamento em suspensão na câmara de combustão.

Figura 4.3 – Micrografia dos grãos de CV (*esquerda*) e FC (*direita*)



Fonte: LAPAM (2019) / LME (2019).

Devido à forma arredondada tanto o FC como a CV, proporcionam ao concreto maior trabalhabilidade que está associada a melhor composição no tamanho dos grãos por meio do “efeito *preenchimento*”, levando a requisitarem, em tese, uma menor quantidade de água nas misturas cimentícias (HELMUTH, 1987). Sobre este tema os trabalhos de El Barrak et al. (2009) e Helmuth (1987) afirmam que tanto o FC como a CV possuem a característica de agir como agente lubrificante.

Estudos de Espining (2008) apontam para o papel de destaque da superfície específica BET do FC nos concretos, cujas principais conclusões foram: a) a natureza física do melhor empacotamento, pela incorporação do FC, não só governa a fluidez do concreto, mas também a resistência à compressão devido à matriz mais densa e a melhor dispersão dos grãos de CP; b) o efeito da nucleação heterogênea na resistência à compressão depende da afinidade do FC com os Hidratos do CP e aumenta com a área BET do FC; c) o FC com maior área BET tende a diminuir a fluidez do concreto, aumentando a retração autógena, diminuindo a evaporação e,

consequentemente, minorando a tendência à fissuração plástica o que propicia uma maior resistência à compressão.

O menor tamanho das partículas de FC pode contribuir para a nucleação heterogênea propiciando a formação de produtos de hidratação (HEMALATHA; SANTHANAM, 2018; MEHDIPOUR et al., 2017). Neste caso deve-se salientar que a área específica BET do FC constitui-se na responsável por determinar a amplitude da nucleação heterogênea, ou seja, quanto maior a finura do FC mais elevado será o incremento no grau de hidratação (KADRI; DUVAL, 2002).

A finura potencializa os efeitos físicos relacionados ao FC, com efeito, Madani et al. (2016) constataram a influência positiva de FC ultrafinos na resistência à compressão dos concretos, sendo que outras propriedades como durabilidade, permeabilidade aos cloretos e resistividade elétrica também foram contempladas.

O índice de desempenho com CP aos 28 dias foi realizado conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014b) com argamassa com 100% de CP, com 25% de FC e com 25% CV. Os resultados devem apresentar índice de desempenho com CP aos 28 dias maior ou igual a 90% conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014a).

Nos traços com CV foi possível observar um índice de 92% indicando uma reatividade adequada tendo em vista que as reações pozolânicas não ocorrem de forma intensa nas idades iniciais. Este resultado está de acordo com os estudos de Mehta e Monteiro (2014) quando afirmam que não há contribuição para o desenvolvimento da resistência à compressão até os 7 dias de idade, sendo que os ganhos são constatados a partir dos 28 dias de idade.

Observa-se que o índice de desempenho do FC (92,39%) é maior do que o da CV, apesar do primeiro ser quase inerte e do segundo uma pozolana. A provável causa deste comportamento é a maior finura BET do FC cujos grãos mais finos geram reações químicas mais intensas e rápidas com os compostos aluminosos da CV, formando Carboaluminatos que preenchem os poros da pasta, como também à maior atração devida ao potencial superficial zeta.

Neste caso parece ser bastante adequada afirmação de Courad et al. (2018) quando consideram que o FC pode ser denominado de AM ou material cimentício suplementar quando apresentar superfície específica maior do que $400 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$, sendo este o caso atual com o valor de $822 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$.

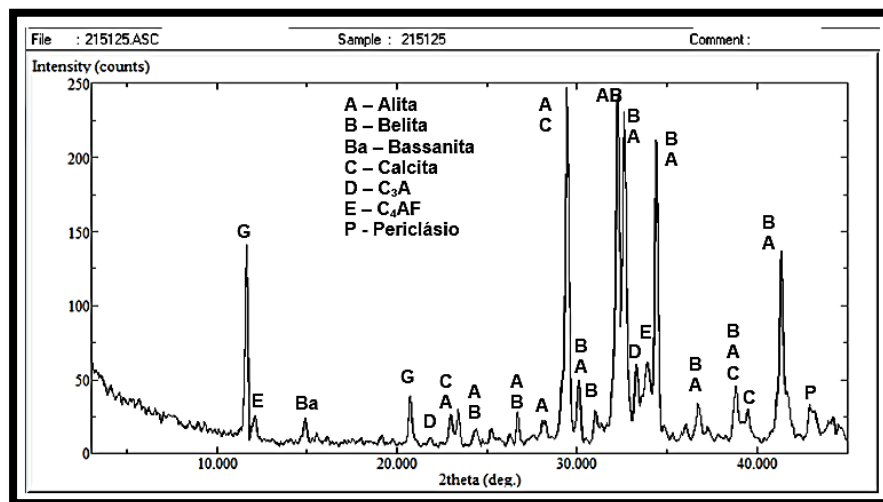
4.3.1.4 Difração de raios-X dos aglomerantes

O CP, FC, CV e a CH tiveram suas composições determinadas por DRX, as Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, mostram os respectivos difratogramas. A determinação das fases cristalinas foi realizada com as seguintes condições de ensaio: radiação de Cu e fonte de energia com 30 kv e 10 mA.

O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X de pó da marca Rigaku, modelo Miniflex 300, operado em modo step, com Scan speed de 0,5 e Scan step de 0,03°, em ângulos de 5 a 100°.

O difratograma de raios-X mostra que o CP, na Figura 4.4, possui uma composição mineralógica predominante de C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF e Periclásio, compostos que compõem o clínquer. Também pode ser observado os compostos do Gesso (*Gipsita e Bassanita*) e a Calcita relacionada ao FC.

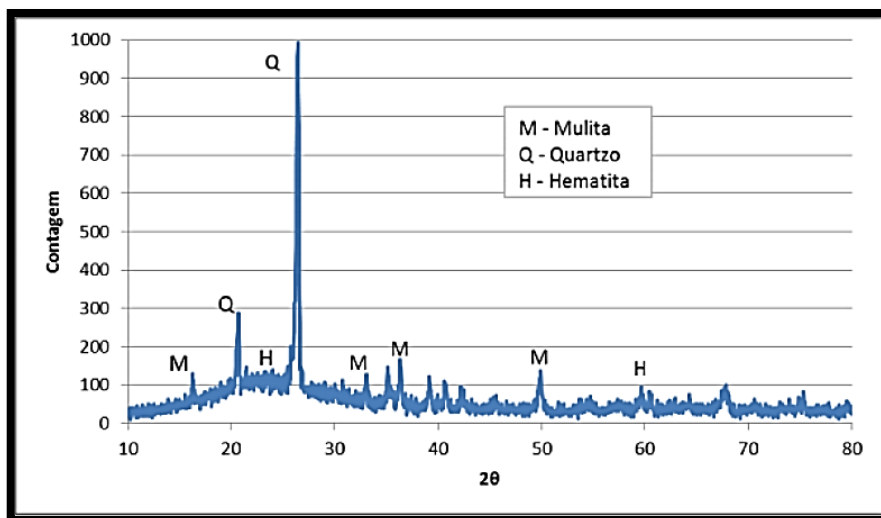
Figura 4.4 – Difratograma do CPV-ARI



Fonte: ABCP (2019).

O difratograma de raios-X mostra, na Figura 4.5, a CV sendo constituído principalmente por quartzo, mas contendo, também Mulita e Hematita e o halo de amorfização típico entre 20 e 30° em 2θ.

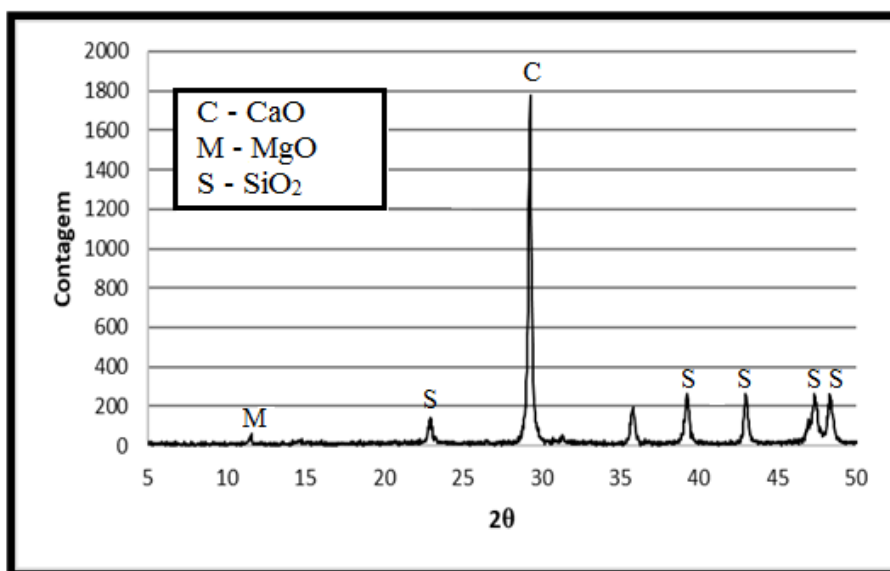
Figura 4.5 – Difratoograma da CV



Fonte: LAPAM (2019).

O difratograma (Figura 4.6) do FC mostra sua composição, predominantemente Calcítica, evidenciada por meio dos grandes picos de Óxido de Cálcio, conforme indicou também a análise da composição química.

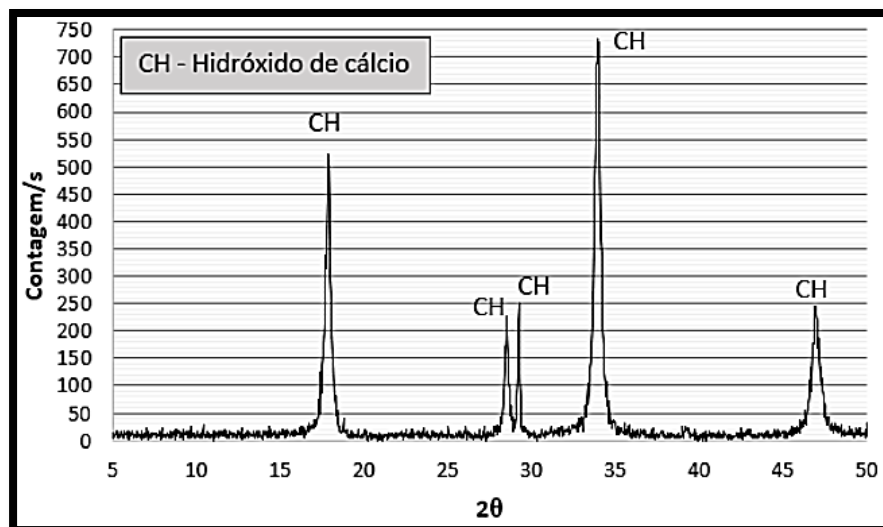
Figura 4.6 – Difratoograma do FC



Fonte: LAPAM (2019).

A Figura 4.7 mostra o difratograma da CH onde foram identificados o Hidróxido de Cálcio predominantemente nas posições 2θ de 17,5° e 34°.

Figura 4.7 – Difratoograma da CH



Fonte: LAPAM (2019).

4.3.1.5 Análise termogravimétrica dos aglomerantes

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 pode-se observar a caracterização da análise termogravimétrica, perdas de massa e teores de Portlandita e FC referente ao CPV-ARI.

Tabela 4.6 – Caracterização por análise termodiferencial e termogravimétrica do CP

Temperatura do pico (°C)	Natureza da reação	Interpretação
20-150°C	Endotérmica	Desidratação do Gesso
150-400°C	Endotérmica	Decomposição dos Aluminatos Cálcicos Hidratados
400-500°C	Endotérmica	Desidroxilação da Portlandita [$Ca(OH)_2$]
500-800°C	Endotérmica	Descarbonatação da Calcita ($CaCO_3$)

Fonte: ABCP (2019).

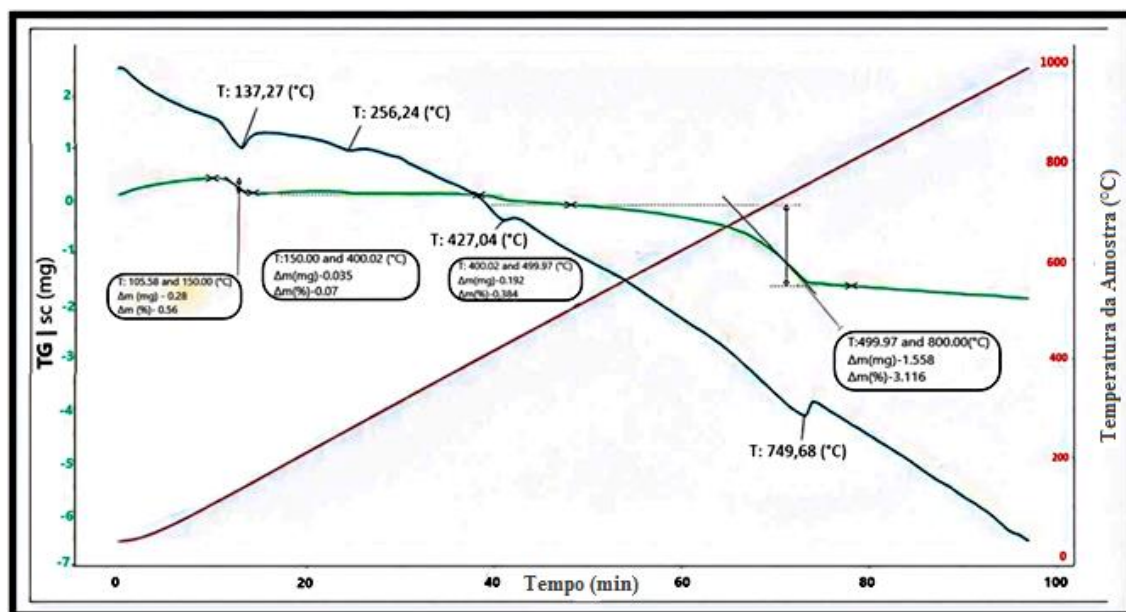
Tabela 4.7 – Perdas de massa e teores de Portlandita e FC no CP

Identificação da amostra	Perda de Massa (%)				Teor (% em massa)	
	20-150°C (Gesso)	150-400°C (W_R)	400-500°C [$Ca(OH)_2$]	500-800°C ($CaCO_3$)	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$
CP	0,50	0,07	0,36	3,16	1,5	7

Fonte: ABCP (2019).

W_k representa uma medida de pré-hidratação do CP e compreende a porcentagem em massa que a amostra perde ao ser aquecida até 500°C, excluindo-se as perdas referentes à desidratação do Gesso e à desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou seja, é a porcentagem de água combinada com os minerais do clínquer. Os teores de Carbonato correspondem à somatória do CaCO_3 (*Calcita*) do Calcário de adição acrescido do CaCO_3 proveniente de uma carbonatação incipiente das amostras. Para os cálculos, considerou-se a perda de massa teórica da Calcita (44%). Os teores de Portlandita foram calculados com base na perda de massa teórica desse mineral (24,32%). O índice de pré-hidratação (W_k) é inferior ao especificado pela literatura (0,35%) a partir do qual o CP poderia ser considerado Pré-Hidratado e apresentar problemas no desenvolvimento das resistências mecânicas, conforme Tabela 4.7. A análise termodiferencial e termogravimétrica revela que o CP possui teores de Calcita e Portlandita de 7% e 1,5%, respectivamente. A Figura 4.8 apresenta as curvas de análise térmica diferencial (TG/DTG) do CPV-ARI.

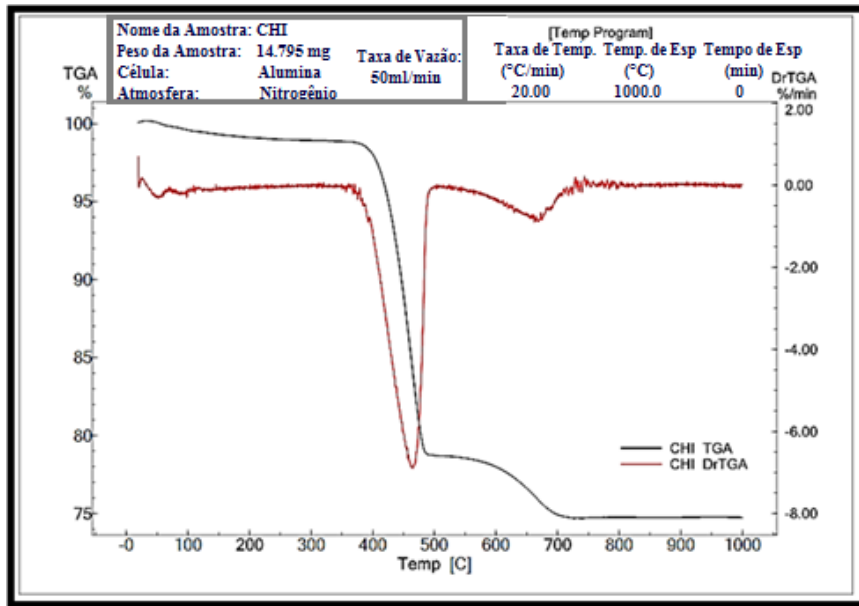
Figura 4.8 – Curva termogravimétrica do CPV-ARI



Fonte: ABCP (2019).

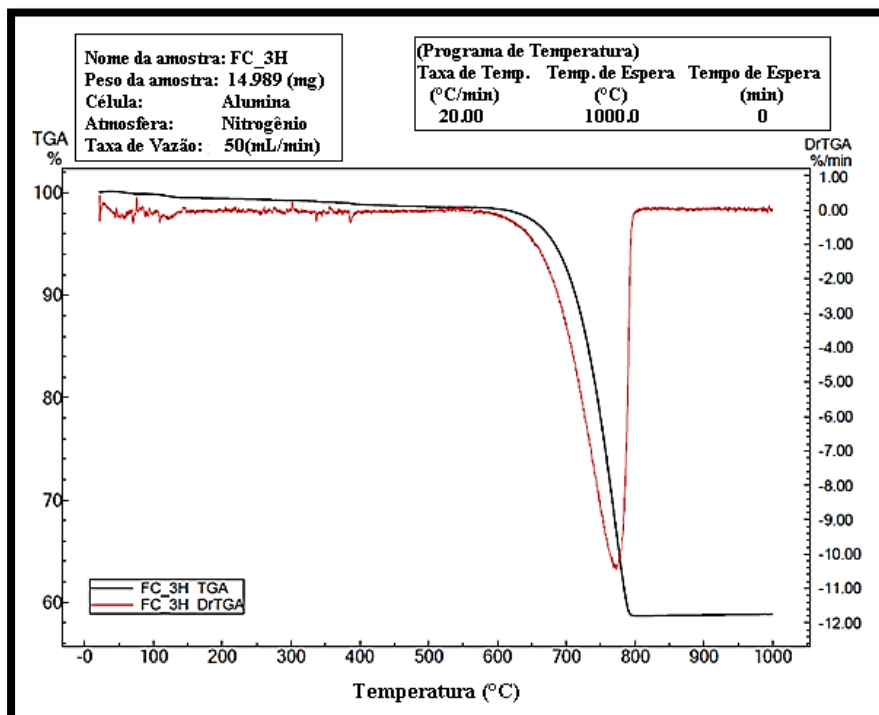
Na curva da CH (Figura 4.9) nota-se um decréscimo entre 0°C e 360°C, correspondente à perda de umidade, medida em torno de 0,176 mg. Também se percebe uma perda significativa de massa entre 360°C e 495°C, que se deve a decomposição da Portlandita, representando uma perda de 20,1%. Entre 495°C e 750°C ocorre a decomposição do Carbonato de Cálcio residual oriundo da matéria prima depois da calcinação, bem como uma eventual carbonatação advinda da estocagem. A perda de massa total foi de 25,3%.

Figura 4.9 – Curva termogravimétrica da CH



Fonte: LAPAM (2019).

Figura 4.10 – Curva termogravimétrica do FC



Fonte: LAPAM (2019).

A análise da curva termogravimétrica referente ao FC (Figura 4.10) apresenta uma perda de umidade entre 0°C e 600°C, cujo valor correspondente foi de 0,173 mg. No intervalo

entre 600°C a 800°C é possível visualizar uma perda de massa de 39,7% referente à decomposição da Calcita ($CaCO_3$). A partir dos 800°C não ocorreu variação. A perda de massa total do FC foi de 41,46%.

4.3.2 Agregados

A proporção entre os tamanhos dos grãos de cada agregado dada pela composição granulométrica exerce influência sobre a compacidade, resistência mecânica e durabilidade dos concretos. Tendo em vista um melhor empacotamento de partículas foram utilizadas duas areias provenientes das jazidas do Arenal em Santa Maria (RS), classificadas como fina ($D_{m\acute{a}x} < 1,2 \text{ mm}$) e média ($D_{m\acute{a}x} < 2,4 \text{ mm}$), a fim de fornecer partículas de dimensões que possibilitem a melhor transição dos grãos finos do CP, FC, CV e CH com o agregado graúdo, atendendo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2019b).

O agregado graúdo britado é oriundo de amostra de pedras britadas, de origem diabásica (*Plagioclásio e Piroxênios*), classificado como brita 0 ($D_{m\acute{a}x} \leq 12,5 \text{ mm}$). O resumo dos resultados de caracterização física dos agregados estão expostos na Tabela 4.8.

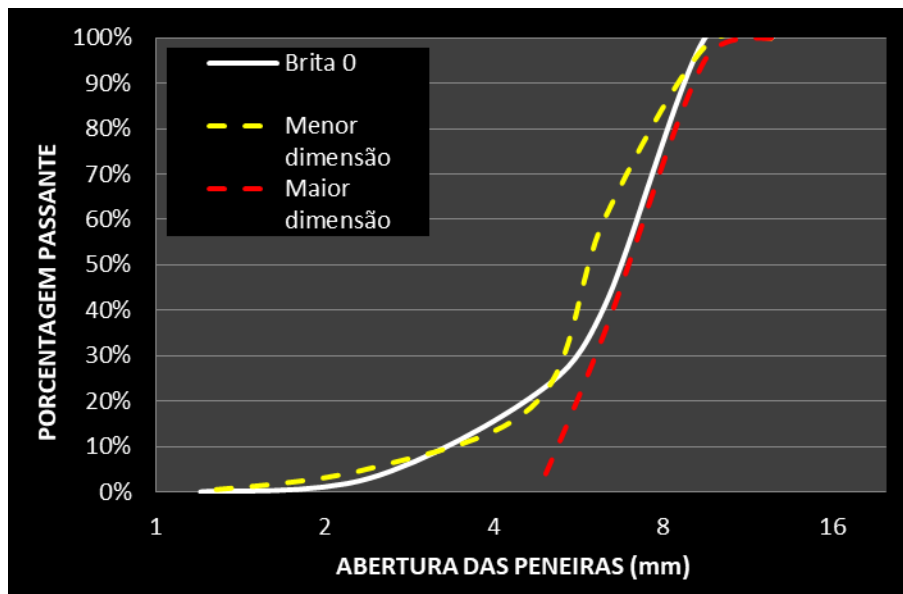
Tabela 4.8 – Características físicas dos agregados

Propriedades	Areia fina	Areia média	Brita 0
Módulo de finura	1,14	1,49	6,96
Diâmetro máximo característico (<i>mm</i>)	0,6	1,20	19,0
Massa específica ($g.cm^{-3}$)	2,64	2,62	2,46
Massa aparente ($g.cm^{-3}$)	2,56	2,61	3,36
Massa unitária ($g.cm^{-3}$)	1,68	1,65	1,22
Volume de vazios (%)	36,34	36,77	50,40
Perda de massa por abrasão Los Angeles (%)	-	-	11,07
Índice de forma	-	-	2,09
Absorção de água (%)	0,31	0,33	3,17

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Em relação ao agregado graúdo, o índice de forma dos grãos não deve ser superior a 3 e o índice de desgaste por abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50% em massa do material, valores contemplados nos agregados utilizados na pesquisa. As composições granulométricas dos agregados selecionados, determinadas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003c), são apresentadas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

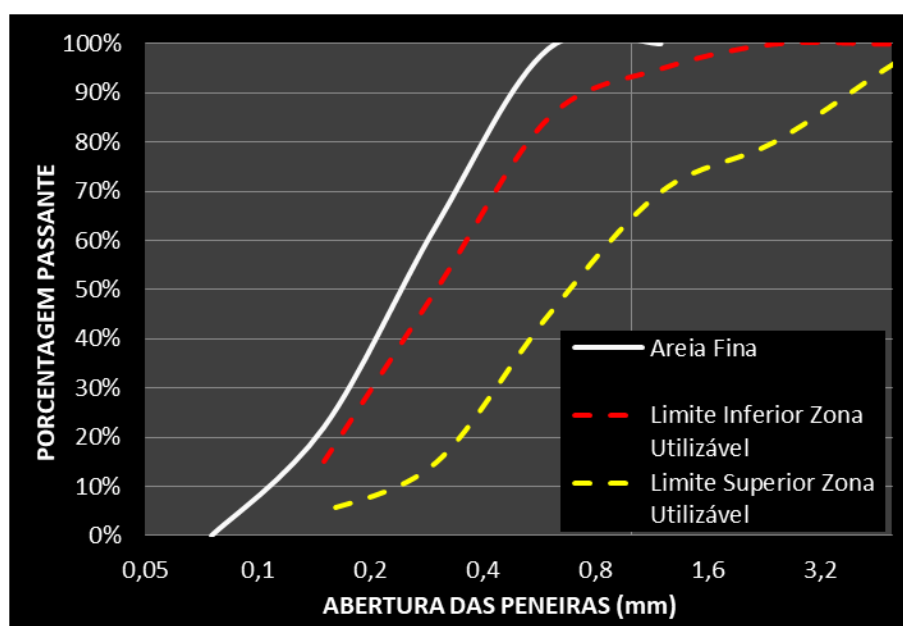
Figura 4.11 – Distribuição granulométrica da brita 0



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019b) os agregados miúdos devem enquadrar-se dentro dos limites de distribuição granulométrica, ou seja, o módulo de finura da zona ótima entre 2,20 e 2,90, da utilizável inferior de 1,55 a 2,20, assim como da zona utilizável superior de 2,90 a 3,50.

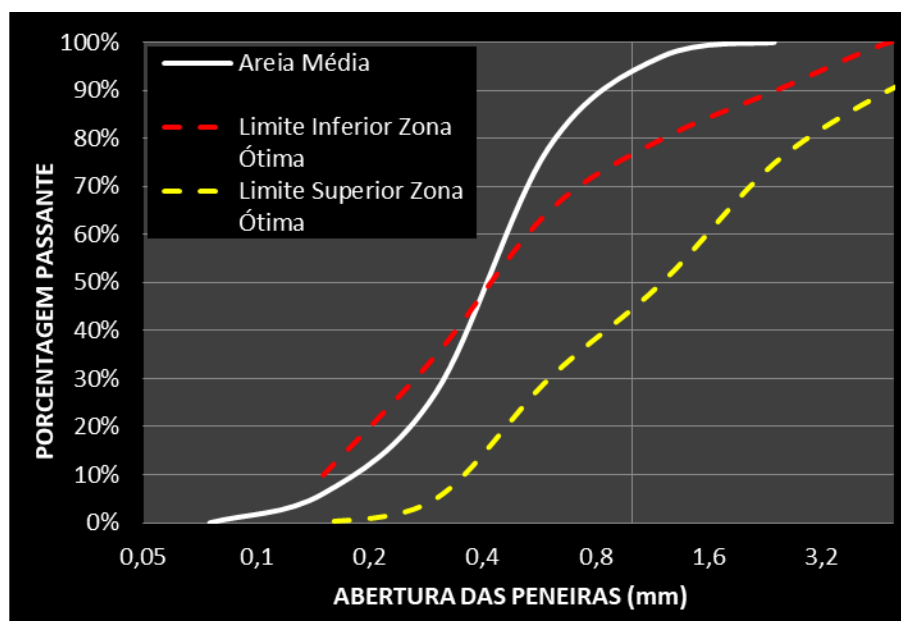
Figura 4.12 – Distribuição granulométrica areia fina



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A areia fina, mesmo não estando dentro das faixas da norma, foi utilizada tendo em vista que o teor de vazios entre as partículas tende a diminuir com o aumento do empacotamento granulométrico, sendo que a areia média encontra-se dentro da zona inferior utilizável.

Figura 4.13 – Distribuição granulométrica da areia média



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.3.3 Aditivo químico

Para atingir o melhor empacotamento das partículas e efetivo ganho de resistência à compressão é necessário dispersar, o mais completamente possível, as partículas finas com a utilização de aditivo químico, em quantidade compatível com os parâmetros das propriedades reológicas dos concretos produzidos. Foi escolhido o hiperplastificante Master Glenium 54 da BASF que é um aditivo de terceira geração à base de policarboxilatos que atua como dispersantes do material aglomerante propiciando elevada redução de água e alta trabalhabilidade.

Este aditivo é isento de Cloretos e atende aos requisitos da norma Brasileira NBR 11768-1 (*Tipo P e SP*) (ABNT, 2019a). Os aditivos hiperplastificantes possuem a característica de manterem a trabalhabilidade por um período de tempo mais prolongado quando comparados aos aditivos de segunda geração, bem como possuem maior capacidade de redução de água (TUTIKIAN et al., 2011).

O hiperplastificante escolhido possui recomendação de utilização para todos os tipos de concretos os quais necessitam de grande diminuição no teor de água de amassamento, como é o caso do presente trabalho (*misturas com fator a/ag 0,25*). Dentre as propriedades e benefícios que o hiperplastificante oferece estão: a) não alteração do tempo de pega; b) alta taxa de redução de água (40%); c) compatibilidade com todos os tipos de CP; d) redução do fator a/ag; e) incremento na resistência à compressão; f) diminuição da permeabilidade. A caracterização do aditivo e o resumo das características físicas e químicas são apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Características físicas e químicas do aditivo hiperplastificante

Propriedades	Master Glenium 54
pH	5 a 7
Teor de sólidos (%)	38 a 42
Densidade ($g.cm^{-3}$)	1,10
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido Branco Turvo

Fonte: Feltrin (2019).

4.3.3.1 Verificação da compatibilidade entre CP e aditivo pelo método Marsh

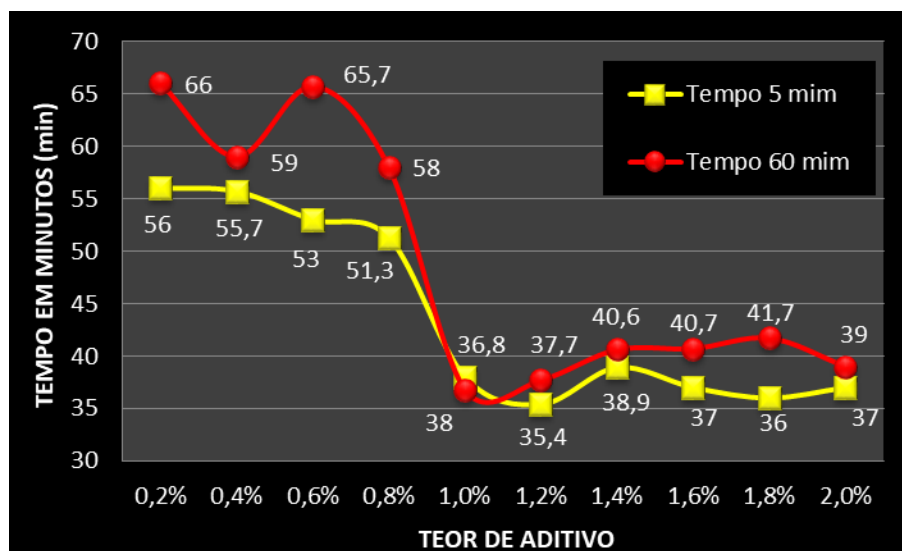
Com a finalidade determinar o teor ótimo de aditivo a ser utilizado nas misturas estudadas foi necessário, primeiro, a verificação da compatibilidade com o CP escolhido. Para tanto foi realizado o ensaio do cone de Marsh com o objetivo de verificar o teor ideal de aditivo em função de sua compatibilidade com o CP utilizado. A opção pela escolha do ensaio do cone de Marsh ocorreu pela facilidade de execução, rapidez e capacidade de reprodução, segundo Aitcin (2000), o ensaio determina o teor de aditivo acima do qual não produz variação relevante no escoamento da pasta.

De modo prático determina-se o ponto de saturação por meio da intersecção das linhas de escoamento de 5 e 60 minutos no gráfico tempo x teor de aditivo. Um dos maiores méritos do ensaio do cone de Marsh consiste na sua simplicidade, sem a perda da confiabilidade dos resultados, mesmo ao comparar-se com o ensaio do viscosímetro. Outra vantagem do ensaio do cone da Marsh refere-se a não influência da temperatura (RICO, 2000).

Conforme Figura 4.14 existe compatibilidade entre o CPV-ARI e o hiperplastificante Master Glenium 54, sendo que o teor ótimo de aditivo é de 1%, para uma pasta de CP com

fator a/ag 0,25. O valor é compatível com o intervalo de dosagem proposto pelo fabricante (0,2% a 1,2%).

Figura 4.14 – Compatibilidade entre o CPV-ARI e o hiperplastificante Master Glenium 54



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.3.4 Estudo do empacotamento

A análise do empacotamento entre as partículas dos aglomerantes, AM e agregados, foi executada através do software EMMA (*Elkem Materials Mix Analyzer*), no qual as granulometrias dos materiais foram colocadas na plataforma e, para cada traço, foram especificadas as quantidades, densidades e curvas granulométricas dos materiais.

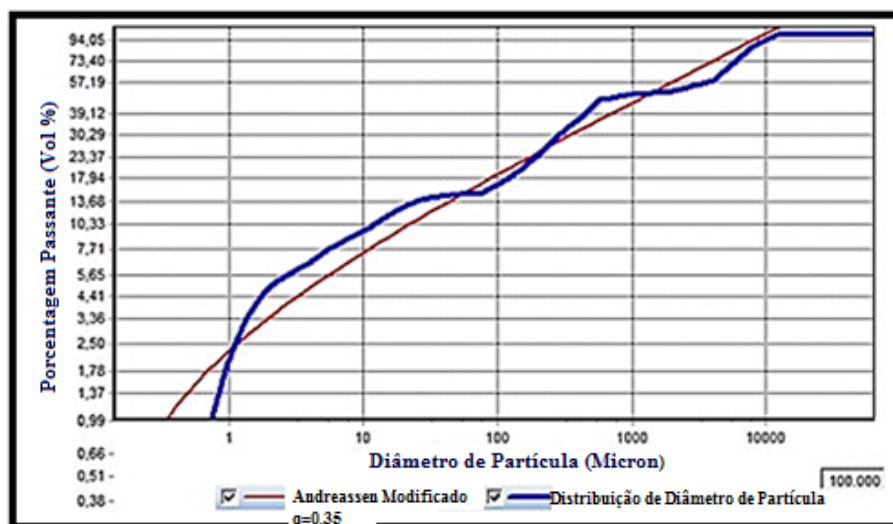
Por meio da variação na proporção entre CP, FC, CV, CH, areias e brita, buscou-se aproximar a curva das misturas com a curva ideal. Recomendado pelos autores Funk e Dinger (1992) e Oliveira et al. (2000) fez-se o uso do modelo matemático de Andreassen modificado, porque é o melhor que se adapta quando são utilizadas partículas de pequeno tamanho.

Para o favorecimento do adensamento o coeficiente de distribuição “ q ” utilizado, foi 0,35, sendo que, em alguns casos, houve dificuldade de aproximação das curvas devido ao excesso ou falta de finos. Foram testadas 6 curvas de empacotamento e, como exemplo, a Figura 4.15 apresenta a curva para o traço FC50, as demais (APÊNDICE D).

Considerando-se que o objetivo principal deste trabalho foi a formulação de misturas com altos teores de substituição de CP por AM (*FC e CV*) e CH, a escolha da proporção entre as partículas possui uma importância impar, pois é por meio de empacotamento otimizado que

será possível reduzir o teor de CP o que possibilitará a elaboração de concretos com maior sustentabilidade. Com efeito, segundo Fennis e Walraven (2012), somente por meio do uso da tecnologia de empacotamento de partículas é possível a concepção de concretos com reduzidos teores de CO₂ no qual 50% do CP é substituído por AM.

Figura 4.15 – Distribuição do diâmetro de partículas no programa EMMA – FC50



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A escolha do coeficiente de distribuição “ q ” no valor de 0,35 teve por base a indicação de Oliveira et al. (2000) os quais afirmam que para atingir uma maximização do empacotamento de partículas o valor deve estar situado no intervalo entre 0,33 e 0,50. Por outro lado, Castro e Pandolfelli (2009) sugerem um valor de “ q ” entre 0,25 e 0,30 a fim de obter-se concretos mais adensáveis. Para os autores o valor de 0,25 propicia concretos auto adensáveis, enquanto que 0,30 relaciona-se com concretos adensados por vibração. Neste trabalho foi fixada a trabalhabilidade pelo ensaio de tronco de cone (*abatimento*) no valor de 100 ± 20 mm. Na primeira fase do estudo piloto o valor “ q ” de 0,35 levou o abatimento dos traços estudados ao intervalo pré-determinado de 100 ± 20 mm, decidindo-se, assim, seguir as indicações de Oliveira et al. (2000).

Outra razão para a escolha deste valor diz respeito ao mesmo estar próximo do valor 0,37, quando, segundo Funk e Dinger (1993) ocorre a máxima densidade de empacotamento. Contudo, segundo os autores, o valor de 0,37 para “ q ” não é realista, pois ele só é possível quando o menor diâmetro (D_s) for igual à zero o que não acontece na prática.

Assim, com $q = 0,35$, o empacotamento de partículas levará à diminuição dos espaços vazios entre as partículas que precisam ser preenchidos com água, o que viabilizará a redução do fator a/ag . Com o uso de um fator a/ag reduzido ocorrerá incremento na resistência à compressão devido a formação de uma matriz mais densa, propiciando um aumento na durabilidade e, conseqüentemente, na sustentabilidade do concreto.

Conforme Proske et al. (2013) a sustentabilidade dos concretos com substituição de CP por altos teores de AM tem um dos seus pilares baseado na otimização da densidade de empacotamento.

No presente trabalho uma das formas de medição da sustentabilidade do concreto ocorreu pela mensuração da durabilidade por meio da profundidade de carbonatação. Um eficiente empacotamento de partículas tende a propiciar a redução do fator a/ag que poderá levar a um aumento da resistência à compressão contribuindo para a redução dessa profundidade.

4.3.4.1 Curva de distribuição do tamanho das partículas x curva de Andreassen modificado

Conforme descrito no Item 3.8.1, no programa EMMA, existe uma distância entre a curva proposta por “*Andreassen modificado*” (*em vermelho*) e a distribuição do tamanho de partículas (*proposta em azul*), sendo o objetivo principal do empacotamento a aproximação destas curvas, ou seja, a convergência da experimental com a teórica.

No presente trabalho, foi empregada a regressão não linear pelo método dos mínimos quadrados com o intuito de maximizar a convergência entre as curvas teóricas e experimentais, levando-se em consideração somente as diferenças verticais entre ambas. Deve-se considerar que o método dos mínimos quadrados somente possui validade por ocasião da distribuição dos pontos em torno da curva serem Gaussianos e independentes do valor y .

Foi aplicado este método para as curvas de distribuição do tamanho das partículas nos 6 traços estudados (*REF, FC50, FC60, FC60CH10, FC70CV10 e FC70CV10CH10*). Na Tabela 4.10 observam-se os parâmetros utilizados para a convergência entre as curvas do programa EMMA.

Os parâmetros listados na Tabela 4.10 demonstram que as curvas possuem convergência por meio da função potência com coeficientes de correlação que variaram de 0,9801 a 0,9915, indicando que o empacotamento das partículas foi alcançado.

Tabela 4.10 – Parâmetros utilizados para a convergência entre as curvas do programa EMMA

Traço	Tipo de função	Equação	Coefficiente de Determinação (R^2)
REF	Potência	$y = 2,3018x^{0,4128}$	0,9832
FC50	Potência	$y = 2,8197x^{0,3837}$	0,9844
FC60*	Potência	$y = 3,0671x^{0,3745}$	0,9904
FC60CH10	Potência	$y = 3,1769x^{0,3823}$	0,9915
FC70CV10*	Potência	$y = 2,5646x^{0,4004}$	0,9801
FC70CV10CH10	Potência	$y = 2,6326x^{0,4123}$	0,9856

* A distribuição granulométrica dos traços FC60 e FC60P, bem como FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.3.5 Estudo da dosagem

O concreto, enquanto produto, não pode e não deve estar separado da qualidade de seus materiais constituintes, bem como dos aspectos tecnológicos ligados à sua utilização. Vários são os fatores intervenientes que afetam direta e/ou indiretamente o proporcionamento dos materiais, portanto, é necessária a fixação de parte das variáveis para encontrar as respostas a fim de atingir-se as propriedades desejadas.

Os aspectos básicos que precisam ser verificados em uma dosagem são: resistência à compressão, trabalhabilidade e durabilidade. Mais recentemente, outro aspecto tem sido considerado nas dosagens, ou seja, o menor consumo de matérias-primas através de uma visão de sustentabilidade (GRAZIA et al., 2019; TUTIKIAN et al., 2011).

Na fase preliminar do estudo de dosagem realizaram-se misturas prévias com o objetivo de obter o teor ideal de argamassa e água, ou seja, o teor mínimo que, por meio de observações experimentais, a massa de concreto se mantivesse compacta, coesa e sem vazios (HELENE; TERZIAN, 1992). Obtiveram-se valores de 53%, em massa, para a argamassa e 8,33% para a água, os quais foram fixados para todos os traços. A partir da fixação do teor de argamassa, dos fatores a/ag e do teor das AM e CH, os traços unitários de concreto foram determinados com o uso das equações de dosagem do concreto e das massas específicas dos materiais.

Inicialmente, realizou-se a pesagem e a aferição da temperatura dos materiais, manteve-se constante a temperatura da água, entre 20°C e 23°C. Antes da colocação do CP houve a homogeneização, a seco, com as AM (FC e CV) e a CH. Tendo em vista o baixo fator a/ag (0,25) houve a necessidade de maior energia de mistura, tendo sido utilizada uma perfuratriz de alta potência (900 W) e rotação (645 a 1.400 rpm), em conjunto com pás misturadoras de alta eficiência em um recipiente metálico.

Procurou-se adotar a ordem de mistura especificada pela NBR 12821 (ABNT, 2009), entretanto, foi constatado que as primeiras misturas tiveram que ser descartadas por não terem sido misturadas homogeneamente, em virtude da presença de partículas muito finas e ao baixo fator a/ag (0,25). Assim ajustou-se a seguinte sequência dos materiais, que foi utilizada para todos os traços: a) 100% do CP, AM (*FC e CV*), CH, água e aditivo; b) areias; c) brita.

No teste de abatimento do tronco de cone, efetuado de acordo com NBR 16889 (ABNT, 2020), a consistência do concreto foi preservada constante para todas as misturas, aplicando-se como referência o intervalo de 100 ± 20 mm.

Seguiu-se a recomendações da NBR 12821 (ABNT, 2009) para o controle dos parâmetros ambientais de dosagem, anotando-se, durante a mistura, os valores de umidade relativa e a temperatura do ambiente. Os traços com as quantidades de materiais por m^3 , podem ser vistos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Consumo de materiais em kg por m^3 , aditivo em $L.m^{-3}$

Traço	CP	Clínquer	FC	CV	CH	Areia fina	Areia média	Brita 0	Aditivo	H ₂ O	Abatimento 100+20 (mm)
REF	424	382	-	-	-	403	400	971	16,34	106	100
FC50	238	214	180	-	-	445	442	1.073	13,68	105	80
FC60	192	173	226	-	-	451	448	1.088	13,87	104	80
FC60CH10	192	173	226	-	42	451	448	1.088	13,87	104	80
FC70CV10	97	87	283	36	-	467	463	1.125	13,46	104	80
FC70CV10CH10	97	87	283	36	42	467	463	1.125	13,46	104	80

* O consumo de materiais por m^3 do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Foram moldados 20 corpos de prova cilíndricos com dimensões 10x20 cm para cada traço de concreto nas respectivas idades de controle referente a cada um dos ensaios realizados, seguindo a recomendação da NBR 5738 (ABNT, 2015b) para moldagem e adensamento.

Foram adensados os corpos de prova em mesa vibratória e mantidos em cura imersa com água e Cal até as idades de cada ensaio. Posteriormente, houve a realização dos ensaios de resistência à compressão e carbonatação acelerada, bem como a análise de microestrutura (*DRX e TG/DTG*).

4.3.5.1 Estudo da trabalhabilidade

Para Proske et al. (2013) a diminuição do fator a/ag consiste em um elemento primordial para a trabalhabilidade dos concretos com altos teores de FC, para tanto é necessária a utilização de superplastificante de alto desempenho (*hiperplastificante*), para obtenção da trabalhabilidade previamente escolhida. Com base nos dados da dosagem, tendo sido analisadas as interações dos traços com o aditivo, duas premissas foram adotadas.

A primeira é apontada por Espining (2008) onde o autor afirma que o FC, com maior área BET, tende a diminuir a fluidez do concreto. Desta forma a presença do FC demandaria uma maior quantidade de aditivo para uma mesma trabalhabilidade.

A segunda baseia-se no sentido oposto, ou seja, a presença do FC poderia diminuir a necessidade de aditivo através dos estudos de El Barrak et al. (2009) onde os autores afirmam que, a depender do fator a/ag , o FC age mais como agente lubrificante.

Com a finalidade de comparar estas duas premissas o abatimento foi fixado em um único valor médio (100 mm) com o intuito de facilitar a comparação entre os teores de aditivo nas diversas misturas estudadas, bem como por ser a média do intervalo proposto ($100\pm 20\text{ mm}$). Também foi realizado o cálculo da área BET dos aglomerantes, em m^2 por litro de aditivo com o objetivo de comparar o consumo relativo de aditivo entre as diversas misturas considerando o aumento das partículas finas advindas do incremento no teor de FC, CV e CH.

Na Tabela 4.12 é possível observar os traços em relação à área de cada aglomerante ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$), quantidade de aditivo ($\text{L}.\text{m}^{-3}$), relação entre área dos aglomerantes e quantidade de aditivo ($\text{m}^2.\text{L}^{-1}.\text{10}^4$), bem como o percentual de variação em relação a cada mistura.

Tabela 4.12 – Relação aglomerante x aditivo ($\text{m}^2.\text{L}^{-1}.\text{10}^4$)

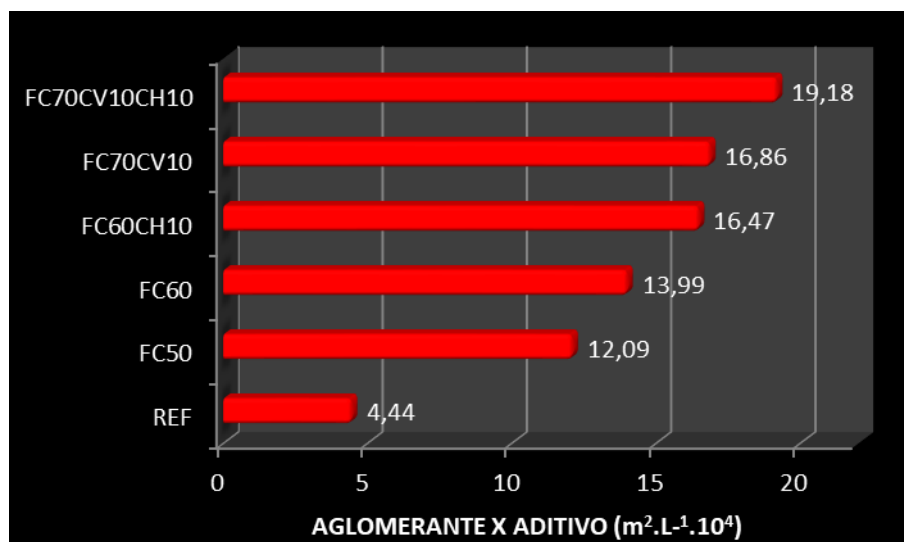
Traços	CP ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)	FC ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)	CV ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)	CH ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)	Total ag ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)	Aditivo ($\text{L}.\text{m}^{-3}$)	ag/aditivo ($\text{m}^2.\text{L}^{-1}.\text{10}^4$)	Var. (%)
REF	725.040	-	-	-	725.040	16,34	4,44	-
FC50	406.980	1.660.040	-	-	2.067.020	17,10	12,09	172,3
FC60*	328.320	2.096.100	-	-	2.424.420	17,33	13,99	15,7
FC60CH10	328.320	2.096.100	-	430.500	2.854.920	17,33	16,47	17,7
FC70CV10*	165.870	2.622.180	47.840	-	2.835.890	16,82	16,86	2,4
FC70CV10CH10	165.870	2.622.180	47.840	430.500	3.266.390	16,82	19,18	13,8

* A relação aglomerante x aditivo do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elabora pelo Autor (2021).

Na Figura 4.16, observa-se a relação aglomerante x aditivo ($m^2.L^{-1}.10^4$), para cada um dos traços estudados.

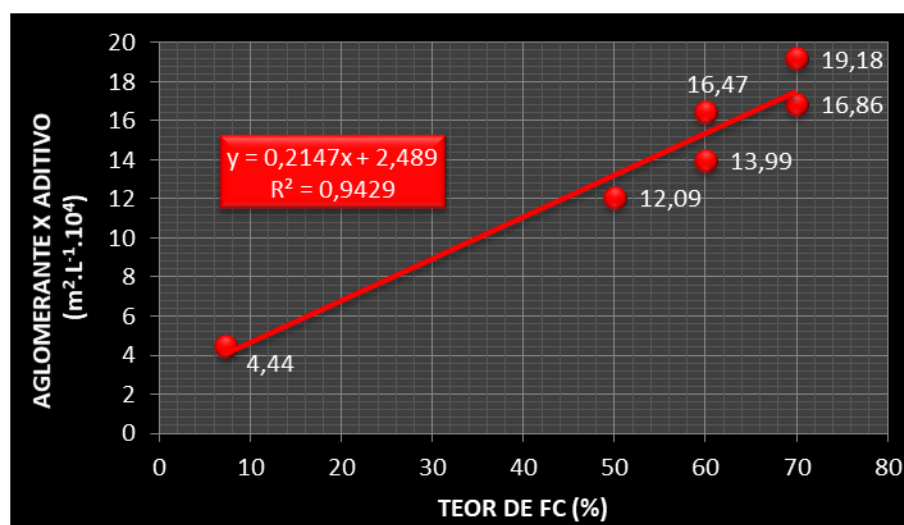
Figura 4.16 – Relação aglomerante x aditivo ($m^2.L^{-1}.10^4$)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

No traço REF, 1 litro de aditivo atendeu a demanda de $4,44.10^4 m^2$ partículas de CP para um abatimento de 100 mm. Com a substituição de 50% do CP por FC no traço FC50 o mesmo litro de aditivo atendeu a $12,09.10^4 m^2$ de partículas, ou seja, a mesma quantidade de aditivo atendeu uma demanda 172,3% maior, idem para os demais traços.

Figura 4.17 – Teor de FC x teor relativo de aditivo



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Com a incorporação de partículas com maior área BET, no caso do FC, era esperado um aumento relativo no teor de aditivo conforme colocado por Espining (2008). No entanto os dados da Tabela 4.12 e Figura 4.16 demonstram o contrário, ou seja, à medida que maiores quantidades de FC são adicionados o teor relativo de aditivo diminui, demonstrando o efeito benéfico da incorporação da AM na trabalhabilidade dos traços estudados conforme pode ser visto na Figura 4.17.

Os motivos para diminuição no teor relativo de aditivo com a substituição de FC podem estar relacionados com: a) o efeito filer que conduz a uma redução na demanda por água na mistura (TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010); b) a maior distância entre as partículas propiciadas pelo FC que resulta em uma melhora no comportamento reológico do concreto (HAWKINS et al., 2005); c) um empacotamento de partículas otimizado por parte do FC que tende a diminuir a demanda de água (PROSKE et al., 2014).

Observa-se que a quantidade relativa de aditivo na transição do REF para FC50, apresentou uma variação percentual (*diminuição relativa de aditivo*) de mais de 170%. Contudo, no FC60, 1 litro de aditivo atendeu a demanda de $13,99.10^4 \text{ m}^2$ de partículas uma variação de 15,7%.

Desta forma a incorporação de FC no traço REF (*FC50*) propiciou uma diminuição relativa no teor de aditivo, maior do que na transição do traço FC50 para FC60. Este comportamento pode ser explicado pela proporcionalidade entre o teor de FC e o teor relativo de aditivo conforme demonstra a Figura 4.17. Ou seja, na transição do REF para o FC50 ocorreu uma incorporação de 50% de FC enquanto na transição do FC50 para o FC60 somente 10% de FC foi incorporado.

Assim conclui-se que a substituição do CP por FC contribuiu para a diminuição no teor relativo de aditivo. Com isso a segunda premissa levantada no início deste item fica confirmada, ou seja, a substituição por FC impactou de forma positiva a trabalhabilidade dos traços sendo que ele agiu como agente lubrificante conforme os estudos de El Barrak et al. (2009).

4.4 ENSAIOS EM CONCRETO

4.4.1 Resistência à compressão

Foi realizado ensaio de resistência à compressão em corpos de prova (*cp*) 10x20 cm, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015b) e ensaiados conforme a NBR

5739 (ABNT, 2018b), nas idades de 28 e 91 dias. Os cps foram previamente retificados e a posteriori foi colocada placa de neoprene como equalizador das tensões nos pratos da prensa hidráulica. Foram confeccionados 4 cps para cada idade de ensaio (28 e 91 dias), adotando-se a média ponderada a fim de determinar a resistência a compressão para cada traço e idade.

Foi utilizada, para a realização dos ensaios, uma prensa marca INSTRON com capacidade de 150 tf, modelo 1500HDX-C4-G7B e precisão de +/- 1%. Os resultados das resistências à compressão foram analisados e discutidos em verdadeira grandeza, em MPa, assim como por meio da evolução (%) da resistência à compressão, intensidade de clínquer (I_{cq}), intensidade de ligante (IL) e da resistência à compressão unitária (fc_{unit}), com o intuito de analisar a influência do teor de CP, FC, CV e CH contidas nas misturas estudadas, em cada idade de controle.

4.4.1.1 Intensidade de clínquer

Um dos principais caminhos para a diminuição das emissões de CO₂ no CP é sua substituição por AM, para tanto, é necessária a quantificação desta redução por meio de um índice. Daminieli (2013) abordou o assunto propondo a criação de um índice que pudesse representar o consumo de materiais aglomerantes através da correlação com a resistência à compressão do concreto.

O autor denominou este indicador de eficiência ambiental do CP de “Intensidade de Ligante (IL)” que correlaciona o consumo total de ligantes (*impacto ambiental*) em kg.m⁻³, com a resistência à compressão (*desempenho*) em MPa, conforme equação 4.1.

Na Figura 4.18 observa-se o gráfico relacionando a IL (kg.m⁻³.MPa⁻¹) com a resistência à compressão (MPa). Neste estudo o autor apresenta a IL em diversos trabalhos publicados no âmbito nacional, internacional e de mercado. A equação 4.1 relacionada ambas variáveis, sob a forma:

$$IL = l \cdot rc^{-1} \text{ (equação 4.1)}$$

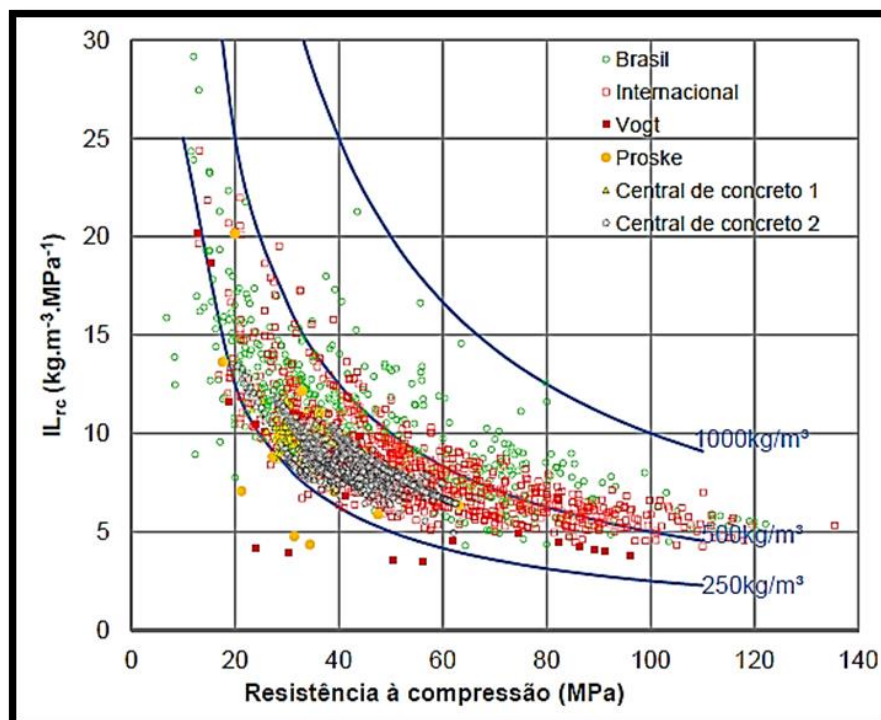
Onde:

IL : Intensidade de ligante;

l : consumo de materiais ligantes em kg.m⁻³;

rc : requisito de desempenho (*resistência à compressão aos 28 dias em MPa*).

Figura 4.18 – Intensidade de ligante (IL) versus a resistência à compressão aos 28 dias para dados internacionais, brasileiros e de mercado. As linhas representam concretos com o mesmo teor total de ligantes, em kg.m^{-3}



Fonte: Damineli (2013).

Considerando a importância do tema da sustentabilidade no contexto do presente trabalho, propõe-se uma releitura do conceito de IL proposto por Damineli (2013). A alteração refere-se a concepção do termo “consumo de materiais ligantes” (kg.m^{-3}) que leva em consideração o consumo de todos os materiais ligantes (*exceto FC*) como CP, CV e a CH. No presente trabalho propõe-se a utilização do termo “consumo de clínquer” ($\text{kg}_{cq}.\text{m}^{-3}$).

O motivo da troca tem, por finalidade, enfatizar o aspecto da sustentabilidade no trabalho. Conforme Kjellsen et al. (2005), 91% das emissões de CO_2 do concreto estão relacionadas ao clínquer. Desta forma o impacto ambiental, no que se refere às emissões de CO_2 , estão relacionadas, basicamente, ao teor de clínquer, assim sua contabilização, facilitará a comparação entre os traços em relação aos impactos ambientais causados por cada um.

Tendo em vista que no presente trabalho foi utilizado um CPV-ARI com teor de 7,5% de Calcita, 2,5% de gesso e 0,5 % de perda ao fogo foi considerado um teor de clínquer de, aproximadamente, 90% (Item 4.3.1). Logo, como premissa para o cálculo da intensidade de clínquer têm-se os seguintes parâmetros que não foram considerados nos cálculos: a) o teor de FC, gesso e perda ao fogo no CPV-ARI; b) o teor de FC que substituiu o CPV-ARI nos traços binários, ternários e quaternário; c) o teor de CV que substituiu o CPV-ARI no traço ternário e

quaternário; d) o teor de CH que foi adicionado no traço ternário e quaternário. Desta forma a releitura da proposta de Daminieli (2013) apresenta-se da seguinte forma (equação 4.2):

$$I_{cq} = I_c \cdot rc^{-1} \text{ (equação 4.2)}$$

Onde:

I_{cq} : intensidade de clínquer em $kg_{cq} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$;

I_c : consumo total de clínquer em $kg_{cq} \cdot m^{-3}$;

rc : resistência à compressão aos 28 ou 91 dias em MPa.

As diferenças básicas entre a IL proposta por Daminieli (2013) e a I_{cq} deste trabalho são: a) a CV e a CH não terem sido incorporadas no cálculo da I_{cq} ; b) o cálculo de duas I_{cq} uma aos 28 e outra aos 91 dias de idade. A justificativa para adoção de duas idades de controle reside no fato que o desenvolvimento da resistência à compressão nos traços com CV se dá a partir dos 28 dias de idade, desta maneira foi necessário aguardar a evolução até os 91 dias de idade para calcular o real efeito desta pozolana em médio prazo. Justifica-se essa idade mais elevada porque grande parte das peças estruturais não são submetidas a carga total de serviço aos 28 dias de idade.

4.4.1.2 Resistência à compressão unitária

A resistência à compressão unitária (fc_{unit}) consiste na relação entre a resistência à compressão (MPa) e o teor de clínquer ($kg_{cq} \cdot m^{-3}$), expresso em $MPa \cdot kg_{cq}^{-1} \cdot m^{-3}$. A fc_{unit} tem por objetivo a equalização dos resultados em uma mesma referência, ou seja, um mesmo teor de clínquer. Com isso, fica viabilizada a comparação entre as diferentes misturas (*referência, binárias, ternárias e quaternária*) ao serem relacionadas às resistências à compressão com seus respectivos consumos de clínquer. A expressão da fc_{unit} é dada pela equação 4.3:

$$fc_{unit} = R_{comp} \cdot C^{-1} \text{ (equação 4.3)}$$

Onde:

fc_{unit} : resistência à compressão unitária em $MPa \cdot kg_{cq}^{-1} \cdot m^{-3}$;

R_{comp} : resistência à compressão aos 28 ou 91 dias em MPa;

C : consumo de clínquer do CP na mistura em $kg_{cq} \cdot m^{-3}$.

A $f_{c_{unit}}$ relaciona-se diretamente com a $I_{c_{q}}$ sendo uma o inverso da outra. Enquanto na $f_{c_{unit}}$ tem-se a relação $MPa.kg_{c_{q}}^{-1}.m^{-3}$, na $I_{c_{q}}$ tem-se $kg_{c_{q}}.m^{-3}.MPa^{-1}$. Todos os parâmetros (*teor de FC, CV, CH, idade de controle, etc.*) que compõe o cálculo da $f_{c_{unit}}$ são os mesmos adotados na $I_{c_{q}}$, considerando a correlação existente entre ambas.

4.4.2 Carbonatação acelerada

Entende-se por ensaios de carbonatação acelerada a reprodução, com o uso de câmaras de carbonatação climatizadas, de um ambiente favorável para as reações de carbonatação do concreto em um período de tempo inferior àquelas ocorridas no processo natural.

A necessidade de obtenção de um processo de carbonatação mais rápido consiste no fato que as reações de difusão do CO_2 na matriz cimentícia são bastante lentas, tendo em vista a reduzida concentração de CO_2 no meio ambiente, algo em torno de 0,04%.

Muitas são as pesquisas sobre as concentrações de CO_2 empregadas nas câmaras de carbonatação acelerada variando desde 2% (CUI et al., 2015) até 100% (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996).

Conforme Houst (1997) não há proporcionalidade entre o teor de CO_2 e a velocidade de carbonatação, pois quando são utilizados valores elevados de Dióxido de Carbono, há produção de água como subproduto das reações de carbonatação, a qual, em excesso, pode bloquear a rede de poros limitando o processo de difusão.

Mehta e Monteiro (2014) alertam que concentrações altas de CO_2 podem gerar uma reação instável entre a Portlandita e o CO_2 por meio da geração de Ácido Carbônico, acarretando a transformação do Carbonato de Cálcio (*insolúvel*) em Bicarbonato de Cálcio (*solúvel*).

Castellote et al. (2009), pesquisaram diferentes teores de CO_2 (0,03%, 3%, 10% e 100%), concluindo que o aumento do teor de Dióxido de Carbono altera a microestrutura da pasta cimentícia, pela despolimerização dos Silicatos de Cálcio modificando, assim, a estrutura dos poros e conseqüentemente o mecanismo de difusão do CO_2 . Conforme os autores teores até 3% de CO_2 , não propiciam mudanças substanciais na microestrutura da pasta cimentícia.

Cui et al. (2015) relatam que concentrações de CO_2 que estejam no intervalo entre 2% e 20% podem ser consideradas baixas para o processo de carbonatação acelerada. Silva et al. (2009) defendem que o processo de carbonatação acelerada ocorra em baixas concentrações

de CO₂, com isso são impedidas alterações substanciais na microestrutura do concreto levando a obtenção de coeficientes de carbonatação compatíveis com a realidade.

Sisomphon e Franke (2007) demonstraram a relação entre o teor de CO₂ na atmosfera natural e na câmara de carbonatação acelerada relacionando-os com a velocidade proporcional de carbonatação. Com base na lei de Fick, tem-se que a relação entre os coeficientes de carbonatação no teste acelerado e natural é dada pela equação 4.4:

$$\frac{K_{acc}}{K_{env}} = \frac{\sqrt{\frac{2D CI_{acc}}{C_0}}}{\sqrt{\frac{2D CI_{env}}{C_0}}} \quad (\text{equação 4.4})$$

Onde os subscritos “acc” e “env” representam, respectivamente, o ensaio nas condições “acelerado” e “natural”. Considerando o valor da difusividade do gás, “D”, e a quantidade inicial de Portlandita que pode reagir com o CO₂ e “C₀”, como propriedades constantes de cada concreto estudado, a relação entre os coeficientes de carbonatação pode ser expressa em função da concentração de Dióxido de Carbono na atmosfera (0,03%) e na câmara acelerada (3,0%, por exemplo) da seguinte forma dada pela equação 4.5:

$$\frac{K_{acc}}{K_{env}} = \frac{\sqrt{CI_{acc}}}{\sqrt{CI_{env}}} \approx \frac{\sqrt{3,00\%}}{\sqrt{0,03\%}} = 10 \quad (\text{equação 4.5})$$

Assim, o concreto no ensaio acelerado carbonatou “dez vezes mais rápido” do que o do ensaio natural, segundo a formulação acima (SILVEIRA, 2019). Desta maneira a concentração de CO₂ escolhida para o presente trabalho foi de 3%, entre as razões para escolha está à velocidade proporcionada pelo teor (*dez vezes mais rápida do que a natural*), bem como a baixa probabilidade da mesma alterar a microestrutura do concreto (VAN DEN HEEDE et al., 2019).

Conforme Peter et al. (2008) em um processo de carbonatação acelerada os compostos não Hidratados, praticamente não apresentam carbonatação. Desta forma, no presente trabalho foram considerados, para fins de estudo, somente a carbonatação dos produtos Hidratados no que se refere à análise da profundidade carbonatada e dos compostos gerados por este processo (WU; YE, 2017).

4.4.2.1 Pré-condicionamento e a carbonatação acelerada

O pré-condicionamento constitui em uma etapa importante no ensaio de carbonatação acelerada tendo em vista que a temperatura de secagem dos cps pode conduzir a alterações na microestrutura do concreto. Estas modificações podem vir a modificar a cinética da difusão do CO₂ na matriz cimentícia acarretando, com isso, uma distorção nos resultados do ensaio de carbonatação acelerada.

Neste sentido Bahador e Jong (2006) analisaram a variação da temperatura de secagem na microestrutura da matriz cimentícia. Os cps foram submetidos a diferentes temperaturas de secagem (40 e 105°C) durante a etapa de pré-condicionamento onde foram observadas alterações no diâmetro dos poros na superfície das amostras.

Na temperatura de 40°C os autores observaram um incremento de 50% no diâmetro dos poros na superfície dos cps. Por outro lado, com o aumento da temperatura (100°C) ocorreu uma elevação de 3 vezes no diâmetro dos poros, bem como um incremento na interconectividade entre eles. Assim os autores puderam constatar a influência da temperatura na microestrutura dos concretos submetidos a carbonatação acelerada.

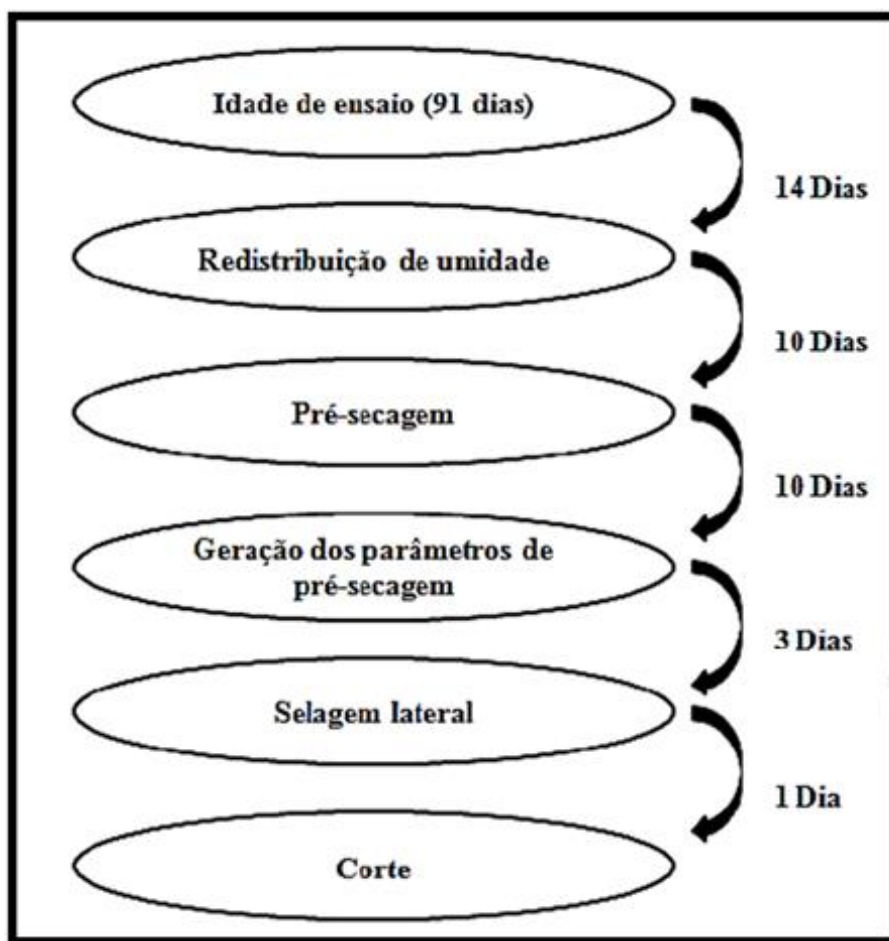
Os procedimentos de pré-condicionamento dos cps para a carbonatação acelerada, podem ser encontrados na recomendação TC 116-PCD (RILEM, 1999) cujo objetivo principal é dotar os cps de uma concentração de umidade equilibrada de 75% ± 2%, em um ambiente aéreo com temperatura de 20°C ± 1°C obtendo-se assim uma distribuição uniforme de umidade.

Várias são as etapas neste processo, as quais iniciam no dia subsequente à moldagem dos cps quando é realizada a desmoldagem. Os cps com dimensões de 10x20 cm são colocados em câmara úmida até a idade de 49 dias. A determinação da idade de 49 dias é feita de maneira retroativa, ou seja, partindo da idade do ensaio de 91 dias são descontados os prazos previstos para as fases de pré-condicionamento, distribuídos da seguinte forma: a) 14 dias para redistribuição da umidade; b) 10 dias para pré-secagem; c) 10 dias para a determinação dos parâmetros da pré-secagem; d) 3 dias para selagem dos cps; e) 1 dia para o corte dos cps; f) 4 dias para imprevistos que são acrescentados ao período de redistribuição de umidade, quando não utilizados. Na Figura 4.19 é possível observar as etapas e seus respectivos prazos.

Finalizados esses procedimentos os cps são colocados em uma câmara climatizada com teor constante de CO₂, UR e temperatura. No presente trabalho os parâmetros do processo de carbonatação acelerada foram: a) câmara climatizada de CO₂ automatizada

CARON, modelo 6034-2; b) teor de CO₂ de 3%; c) UR de 75% ± 2%; d) temperatura 23 ± 1°C. Os cps, após o pré-condicionamento, foram colocados na câmara de carbonatação por 3, 6, 9 e 12 semanas. A cada idade de ensaio os cps foram removidos da câmara e rompidos diametralmente.

Figura 4.19 – Etapas e prazos de pré-condicionamento



Fonte: Adorna (2016).

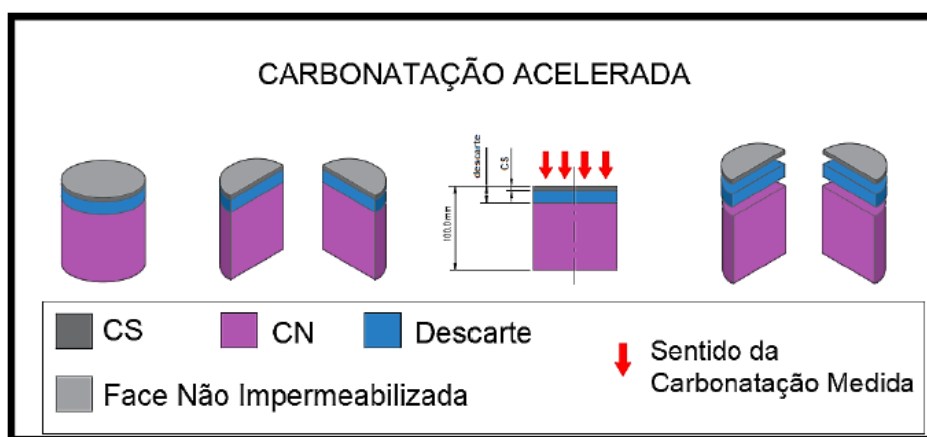
4.4.2.2 Nomenclatura referente à carbonatação

Foram retiradas amostras de duas regiões dos cps sob carbonatação acelerada, uma mais superficial, onde comprovadamente havia ocorrido o processo de carbonatação, a qual foi denominada de CS e outra, mais interna, onde comprovadamente não havia ocorrido o processo de carbonatação, denominada CN.

A camada intermediária (CHANG; CHEN, 2004) entre a CS e CN foi descartada com o objetivo de diminuir a possibilidade de “contaminação” por frações parcialmente carbonatadas de concreto.

Na Figura 4.20 observa-se os detalhes das camadas mencionadas cujo sentido considerado da carbonatação acelerada foi perpendicular à face plana (*topo*) dos cps. Na Tabela 4.13 é apresentada a nomenclatura para os traços estudados frente à carbonatação acelerada.

Figura 4.20 – Representação esquemática das camadas CS e CN dos corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada



Fonte: Silveira (2019).

Tabela 4.13 – Nomenclatura dos traços frente à carbonatação acelerada

Modalidade de ensaio	Traços	Camada totalmente carbonatada	Camada não carbonatada
Carbonatação acelerada	REF	REFCS	REFCN
	FC50	FC50CS	FC50CN
	FC60	FC60CS	FC60CN
	FC60P	FC60PCS	FC60PCN
	FC60CH10	FC60CH10CS	FC60CH10CN
	FC70CV10	FC70CV10CS	FC70CV10CN
	FC70CV10P	FC70CV10PCS	FC70CV10PCN
	FC70CV10CH10	FC70CV10CH10CS	FC70CV10CH10CN

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.4.2.3 Metodologia para a determinação da frente de carbonatação

Os cuidados relacionados ao descarte da camada intermediária entre CS e CN conforme Chang e Chen (2004), apresentadas anteriormente, estão relacionadas com o pH da

pasta cimentícia. O pH de viragem da fenolftaleína ocorre entre 9,0≈10,0 havendo uma zona parcialmente carbonatada um pouco à frente a qual não se consegue precisar com exatidão.

Desta maneira, ao utilizar aspensão de fenolftaleína, a frente de carbonatação pode estar além do limite visualmente definido (LIU et al., 2018). Neste caso (*zona parcialmente carbonatada*) há uma sobreposição entre a Portlandita e os Carbonatos dificultando a definição do limite de carbonatação (PARK, 2008).

Apesar das dificuldades de determinação da zona parcialmente carbonatada, vários autores são favoráveis ao uso da fenolftaleína (CHINCHÓN-PAYÁ et al., 2016; MOBIN RAJ; MUTHUPRIYA, 2016), porque consiste em um processo simples, confiável e bastante conveniente para avaliação visual e dimensional do processo de carbonatação. Hussain et al. (2017) opinam que, entre os métodos visuais disponíveis, o uso da fenolftaleína, constitui no mais barato e prático.

Apesar das ressalvas colocadas, por alguns autores, a respeito da utilização da fenolftaleína para a determinação das profundidades de carbonatação, o método apresenta resultados bastante próximos quando comparados com outras metodologias. Neste sentido Cui et al. (2015) estudaram a profundidade de carbonatação através do uso de fenolftaleína comparada com a tomografia computadorizada de raios-X.

Os autores concluíram que ambos os métodos produzem resultados semelhantes, apesar de uma certa dúvida em relação a determinação das regiões parcialmente carbonatadas por ocasião da utilização da fenolftaleína. Em relação a este último ponto os autores colocam que a tonalidade carmesim (*fenolftaleína*) pode ser observada em regiões do concreto com pH maior que 9.

Uma outra restrição, em relação ao uso da fenolftaleína, por parte dos autores, diz respeito ao método não ter a capacidade de determinar a profundidade carbonatada, mas sim a propriedade de medir o pH (PHUNG et al., 2015). Por outro lado, autores favoráveis a utilização da fenolftaleína lembram que sua utilização constitui em uma parcela do ensaio, e que o método de determinação da profundidade carbonatada deve ser avaliada como um todo. Para tanto, estes autores, evocam normas como a CPC-18 (RILEM, 1988), que indica o uso da fenolftaleína como sendo um método para a determinação da profundidade carbonatada (SILVA et al., 2009).

Em relação ao pH de viragem da fenolftaleína existe divergência entre os autores, alguns apontam para um valor fixo e outros um intervalo. A literatura aponta que, na média, a fenolftaleína não possui coloração para pH abaixo de 10, enquanto que para valores acima deste valor a coloração é carmesim. Desta forma, no presente estudo, considerou-se o pH de viragem da fenolftaleína com valor igual a 10, conforme adotado por Silveira (2019).

Contudo, a metodologia para determinação exata do limite da área carbonatada é muito difícil ao levar-se em conta o pH do concreto. A determinação visual do limite da frente carbonatada e sua medição com paquímetro constituem na maneira mais usual para a aferição da área carbonatada com utilização da fenolftaleína. Segundo Choi et al. (2017) e Dilonardo et al. (2015) a utilização de paquímetro na determinação das profundidades carbonatadas não é adequada, pois depende do operador que realiza as medições e possui pouca precisão.

Ainda em relação aos autores que possuem ressalvas em relação a utilização da fenolftaleína para a determinação da profundidade de carbonatação é feita a colocação de que o valor da viragem acontece em um pH inferior ao da corrosão do aço. Com isso o uso da fenolftaleína poderia levar a um aumento artificial na vida útil do concreto (HERRERA et al., 2015).

Contudo os defensores da utilização da fenolftaleína ponderam que a UR ideal para o desenvolvimento da carbonatação (60%) e da corrosão (80%) são distintos. Desta maneira no momento em que a frente da carbonatação atingir a armadura não iniciará, necessariamente, o processo de corrosão (SILVA; LIBÓRIO, 2003). Complementando este último posicionamento, Silveira (2019) coloca que o uso da fenolftaleína é um método adequado para a determinação da profundidade de carbonatação.

Para a determinação da profundidade de carbonatação foi utilizada a metodologia de Dalla Lana (2005) que consiste no tratamento da imagem do cp carbonatado por meio do software AutoCAD (AUTODESK, 2020) com o auxílio da rotina “COTA.LSP”. Uma maior precisão nas leituras é obtida com este método devido à utilização de recursos de digitalização de imagens.

A principal característica do método consiste na possibilidade de obtenção de um grande número de medições de profundidade carbonatada. Com isso, a precisão na obtenção das profundidades carbonatadas é mais próxima da realidade. Apesar de todos os dispositivos de softwares utilizados, a determinação da linha limite da frente de carbonatação é feita de forma visual.

A metodologia desenvolvida por Dalla Lana (2005) consiste nos seguintes passos; a) coloca-se cada imagem em escala com unidade em milímetros (Figura 4.21); b) na intersecção de cores da amostra, que representa o limite da área carbonatada e não carbonatada desenha-se uma polyline; c) desenham-se linhas verticais com afastamento de 1 mm entre si, por meio da rotina denominada “COTA.LSP” desenvolvida em Autolisp, que é uma linguagem de programação do AutoCAD (AUTODESK, 2020); d) os resultados obtidos pela rotina “COTA.LSP” são ordenados em uma planilha Excel, onde recebem tratamento estatístico; e) calcula-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das

profundidades assim obtidas, até que o coeficiente de variação chegue ao valor inferior a 30%, os limites inferiores e superiores de cada corpo de prova são eliminados, para diminuir a dispersão dos resultados, visto que sempre consideram-se mais de 30 valores para o cálculo estatístico.

Figura 4.21 – Profundidade de carbonatação acelerada do FC70CV10CH10 com 6 semanas



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.4.2.4 Película de proteção contra a carbonatação

Conforme abordado no Item 3.7.5, a aplicação de uma camada protetora de tinta acrílica como acabamento da superfície exposta, pode conferir ao concreto uma proteção adicional 2 a 3 vezes maior quando comparado com o mesmo traço sem pintura no que se refere ao processo de carbonatação. No presente trabalho foram Elaboradas traços de concreto com elevados teores de substituição de CP por AM, (*especialmente o FC*), acarretando uma redução significativa na reserva alcalina, como no caso dos traços FC60P e FC70CV10P.

É importante conferir a estes traços uma proteção extra contra o avanço do CO_2 na camada de cobrimento do concreto, com o objetivo de elevar a durabilidade da peça estrutural com o respectivo aumento da vida útil. Foram moldados cps adicionais com pintura de tinta acrílica com o intuito de conferir uma barreira física contra o avanço do CO_2 . Para a pintura foi utilizada uma tinta acrílica da marca Coral denominada “*Proteção sol e chuva pintura*

impermeabilizante”, sendo aplicada uma camada de primer e duas demãos. Conforme o fabricante a tinta pode ter uma vida útil de 10 anos em ambiente externo abrigado como é o caso da unidade funcional do pilar estrutural de concreto considerado para efeito de cálculo da ACV e CCV. A pintura foi realizada ao fim da etapa de pré-condicionamento antes da colocação dos cps na câmara de carbonatação.

4.5 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA

4.5.1 Preparação das amostras

Após a realização do ensaio de carbonatação acelerada foram retiradas amostras dos cps para os ensaios de microestrutura tanto da camada carbonatada (CS) como não carbonatada (CN). Para os ensaios de difração de raio-X (DRX) e análise termogravimétrica (TG/DTG) foram retiradas amostras em pó.

4.5.1.1 Paralisação das reações de hidratação

Por recomendação de Lothenbach et al. (2016), visando à paralisação das reações de hidratação, as amostras para a análise de termogravimetria (TG/DTG) e difração de raio-X (DRX) foram previamente preparadas nas datas previstas para os ensaios. A paralisação das reações de hidratação ocorreu imediatamente após a determinação da profundidade carbonatada através da aspersão de fenolftaleína. Para a preparação das amostras em pó dos diferentes traços de concretos foram realizadas as seguintes etapas:

- a) O cp ensaiado foi quebrado com martelo e foi coletado um pedaço interno para moer no almofariz;
- b) O pedaço de concreto foi macerado no almofariz e depois peneirado na peneira #100;
- c) O pó de concreto passante na peneira #100 foi pesado até obtenção 5g do material;
- d) Foram misturadas 5g de pó do concreto com 50 ml de álcool isopropílico aguardando o tempo de 10 a 15 minutos;
- e) Logo após, a suspensão foi filtrada com o auxílio de um funil conectado ao frasco de Strauss e à bomba de sucção (*vácuo*) para escoar o isopropanol, aguardando que toda a sucção ocorresse;

f) Em seguida, o pó do concreto foi lavado (*ainda no filtro*) com 10 ml de éter dietílico para remover o isopropanol;

g) Após esse processo, as amostras foram colocadas nas placas de Petry para serem secas em estufa a 40°C, entre 10 e 30 minutos;

h) Posteriormente, os frascos foram colocados no dessecador, onde se conectava a bomba a vácuo para retirar o ar impregnado até conseguir abrir a tampa do dessecador sem dificuldade;

i) As amostras foram armazenadas em potes hermeticamente fechados e selados com filme de PVC;

j) Por fim, as amostras foram identificadas e levadas para o laboratório afim de realizar os ensaios de termogravimetria analítica e diferencial (*TG/DTG*) e difração de raios-X (*DRX*).

4.5.2 Termogravimetria analítica e diferencial (*TG/DTG*)

A termogravimetria (*TG*) é um dos métodos mais utilizados para determinar as modificações na massa de uma amostra quando ela está sendo aquecida lentamente sob atmosfera controlada. Conforme o equipamento utilizado, o estado físico da amostra pode ser o sólido ou líquido, variando de 1 mg a 10 mg. A amostra é continuamente pesada enquanto é aquecida, para tanto se utiliza uma termobalança com o objetivo de estimar a variação de massa da amostra em relação à temperatura.

O resultado do ensaio é representado por intermédio da curva TG que relaciona a temperatura ou tempo no eixo das abscissas com a massa (*ou perda de massa*) no eixo das ordenadas, produzindo informações sobre a velocidade de reação, composição do material e a estabilidade térmica da amostra. A curva proveniente da TG expressa “*desníveis*” em relação ao eixo das ordenadas que correspondem à variação de massa da amostra (LOTHENBACH et al., 2016; MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

Na curva DTG, os fenômenos correspondentes aos degraus na curva TG são representados por picos e a derivada é normalmente posicionada no eixo das ordenadas. Essa curva fornece dados mais detalhados do comportamento da amostra, pois, através do início e fim dos picos é possível estabelecer qual fenômeno o pico está associado, a duração e a temperatura em que o mesmo ocorreu com maior precisão que na curva TG. Há a possibilidade, também, de realizar análises quantitativas sobre a perda ou ganho de massa a partir da área da curva DTG (LOTHENBACH et al., 2016; MOTHÉ; AZEVEDO, 2009). O

ensaio TG/DTG é considerado a ferramenta mais precisa e rápida para identificar e quantificar todas as fases hidratadas e carbonatadas que estão presentes nos concretos, especialmente no CP misturado com Carbonato de Cálcio.

Para a análise termogravimétrica, no presente trabalho, foi utilizado o equipamento TGA-50, Shimadzu, as amostras de 15 ± 1 mg foram inseridas em um cadinho de platina e aquecidas em atmosfera inerte de Nitrogênio, a uma vazão de 20 ml.min^{-1} . O aquecimento ocorreu a partir da temperatura ambiente até ser atingida a temperatura de 800°C , a uma taxa de aquecimento de $20^\circ\text{C.min}^{-1}$, sendo a perda de massa percentual plotada em função da temperatura, também, foi obtida a curva da derivada primeira da TG. Os resultados foram registrados no software TA-60WS Collection Monitor (*Shimadzu*) e analisados no software TA60 (*Shimadzu*). Os ensaios de TG/DTG mostraram os compostos presentes nas amostras sob a forma de água combinada, Portlandita remanescente e Carbonato de Cálcio, além da perda de massa total.

4.5.2.1 Cálculo dos teores de água combinada, Portlandita e Carbonatos

A análise termogravimétrica tem por objetivo a determinação das variações de massa resultantes do aquecimento da amostra, indicando as perdas de massa nas respectivas faixas de temperatura que ocorrem por meio da quebra das ligações químicas entre os compostos. Em um primeiro momento ocorre a perda de massa referente à água livre em uma faixa de temperatura de aproximadamente 105°C . Em um segundo momento ocorre a perda de massa correspondente à água quimicamente combinada em uma faixa de temperatura entre 105°C e 400°C . Os teores de perda de água são obtidos por meio da equação de Bhatti (1986), conforme equação 4.6.

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{comb}} = (\text{Ldh} + \text{Ldx}) + (0,41 \cdot \text{Ldc}) \text{ (equação 4.6)}$$

Onde:

$\text{H}_2\text{O}_{\text{comb}}$: teor de água combinada;

Ldh: perda de massa na desidratação do CSH gel entre 105 e 400°C ;

Ldx: perda de massa da desidroxilação da Portlandita entre 400 e 500°C ;

Ldc: perda de massa na descarbonatação dos Carbonatos acima de 600°C .

Em relação à perda de massa da Portlandita, ela ocorre em uma faixa de temperatura entre 400 e 500°C. No que se refere aos Carbonatos a perda de massa ocorre em uma faixa de temperatura entre 550 e 990°C (THIERY et al., 2007). Foram utilizadas as equações de Lothenbach et al. (2016) com o objetivo de determinar os teores de Portlandita e Carbonatos. A equação 4.7 apresenta o cálculo do teor de Portlandita no concreto.

$$CH_{\text{medido}} = WL_{CH} \cdot (m_{CH}/m_{H_2O}) = WL_{CH} \cdot (74/18) = WL_{CH} \cdot 4,11 \quad (\text{equação 4.7})$$

Onde:

CH_{medido} : teor de Portlandita no concreto;

WL_{CH} : perda de massa devido à evaporação da água entre 400 e 500°C;

m_{CH} : massa molecular da Portlandita (74 g.mol^{-1});

m_{H_2O} : massa molecular da água (18 g.mol^{-1}).

No caso da determinação dos teores de Carbonatos de Cálcio (equação 4.8), as faixas onde ocorrem a decomposição são as seguintes: a) faixa I ocorre entre $780^\circ\text{C} < T < 990^\circ\text{C}$; b) faixa II ocorre entre $680^\circ\text{C} < T < 780^\circ\text{C}$; c) faixa III ocorre entre $550^\circ\text{C} < T < 680^\circ\text{C}$ (THIERY et al., 2007).

$$CaCO_{3\text{Medido}} = WL_{CaCO_3} \cdot (m_{CaCO_3}/m_{CO_2}) = WL_{CaCO_3} \cdot (100/44) = WL_{CaCO_3} \cdot 2,27 \quad (\text{equação 4.8})$$

Onde:

$CaCO_{3\text{Medido}}$: teor de Carbonato de Cálcio no concreto;

WL_{CaCO_3} : perda de massa do composto no ensaio acima de 600°C;

m_{CaCO_3} : massa molecular do $CaCO_3$ (100 g.mol^{-1});

m_{CO_2} : massa molecular do CO_2 (44 g.mol^{-1}).

A metodologia descrita nas equações 4.6, 4.7 e 4.8 não é adequada para a determinação dos teores de CSH. Neste caso a perda de água está relacionada com uma variação de temperatura em diversas faixas o que dificulta a precisão do cálculo (LOTHENBACH et al., 2016).

4.5.3 Difração de raio-X (DRX)

Segundo Shackelford (2008) e Snellings (2016) a difração de raios-X (DRX) é um fenômeno resultante da interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material. Assim sendo, a radiação incide na amostra e os fótons são difratados em direções que dependem da natureza do material. Em estruturas cristalinas, as direções de espalhamento do feixe difratado satisfazem a Lei de Bragg.

Os testes em DRX, frequentemente, são realizados com materiais em pó, posto que constituem-se em pequenos grãos cristalinos orientados aleatoriamente (SHACKELFORD, 2008). O experimento é feito em um difratômetro e os dados da DRX são representados em um gráfico da intensidade dos raios-X em função do ângulo de difração 2θ . Cada pico representa a difração do feixe de raios-X por um conjunto de planos cristalinos paralelos em várias partículas em pó. Para efeito de comparação, são usados os padrões obtidos a partir da análise do material em pó com uma grande coleção de padrões de difração conhecidos, catalogados pelo ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).

No estudo de materiais e misturas cimentícias, a DRX é utilizada com vários objetivos, como a caracterização de matérias-primas e a avaliação dos produtos de hidratação formados a partir da mistura desses materiais. Na caracterização das matérias-primas, a DRX tem sido empregada para identificar os compostos presentes no CP e as espécies mineralógicas presentes nas AM.

No laboratório de Tecnologia de Materiais da UFSM, as amostras de DRX foram analisadas em equipamento marca Rigaku, modelo Miniflex 300, operando em modo Step, com Scan speed de 0,5 s e Scan step de $0,03^\circ$, em ângulos de 5 a 100° . Esse equipamento possui radiação de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,54051 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA.

Por intermédio do computador acoplado ao equipamento de difração, os cálculos e listagens dos dados foram obtidos pelo sistema de dados que acompanha o equipamento. Em cada pico o programa detectou o ângulo, a distância interplanar com a respectiva intensidade na posição do pico, a largura do pico à meia-altura, as intensidades relativas e integradas.

Os resultados obtidos nos ensaios de DRX são qualitativos e propiciam a identificação dos compostos anidros encontrados nas misturas de CP com AM. Utilizando os dados tabulares detalhados das distâncias interplanares e dos ângulos, juntamente com os documentos do Highway Research Board (1972) e Vazquez (1971), entre outros, foi possível identificar os compostos anidros.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Amplamente difundida na análise estatística de um conjunto de valores, a análise de variância (ANOVA) consiste na verificação da ocorrência de diferenças relevantes entre valores médios, bem como se os fatores exercem influência em alguma variável dependente (*resposta*).

A principal aplicação da ANOVA consiste na comparação de médias entre e dentro dos diferentes grupos, este dispositivo é chamado de tratamento que tem a propriedade de detectar a influência de cada variável independente no experimento analisado a fim de manter o nível de significância estabelecido.

Conforme Castella e Berger (2010) uma definição simples sobre a metodologia da ANOVA, consiste na sua função de estimativa das médias de diversas amostras, que se pressupõe como normalmente distribuídas.

No presente trabalho a ANOVA foi utilizada para analisar a variância dos ensaios realizados com o intuito de verificar a existência de diferenças significativas entre os tratamentos, a fim de se obter um intervalo de confiança de 95% nos resultados apresentados.

De modo prático a aplicação da metodologia ANOVA ocorre da seguinte forma: a) o valor de “*F crítico*” é um parâmetro da distribuição de Fischer-Snedecor de escala para o valor de F a ser obtido; b) se $F > F_{crit}$, o fator exerce efeito estatístico significativo sobre o parâmetro, sendo que, quanto maior for a diferença entre os valores F e F_{crit} , maior a influência do fator sobre este parâmetro; c) a coluna com o “*valor-P*” (*nível de significância*) expressa a probabilidade de que qualquer correlação entre a variável explicada e o fator seja ao acaso; d) quando o $\text{valor-P} < \text{erro do experimento}$, existem indicativos de que o fator exerça influência estatística significativa sobre o parâmetro, uma vez que, quanto menor este valor, maiores os indicativos de que a correlação entre o fator e a variável explicada não sejam ao acaso (CASTELLA; BERGER, 2010).

4.7 ESTUDO DA SUSTENTABILIDADE – ACV E CCV

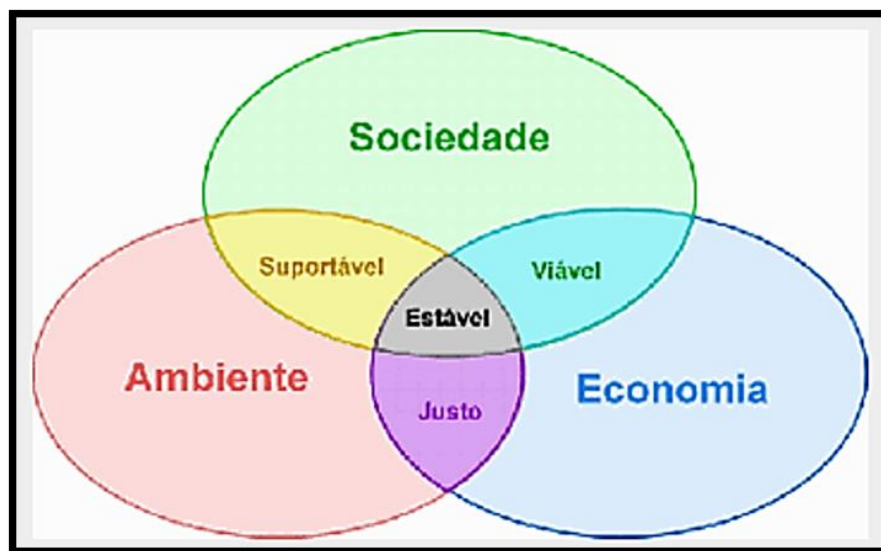
4.7.1 Definição dos parâmetros da ACV e CCV

A atividade desenvolvida no presente trabalho foi de cunho qualitativo, por meio da análise dos impactos ambientais e da sustentabilidade, e quantitativo, por meio da quantificação de custo e do fluxo de materiais.

O estudo das unidades funcionais (*um metro cúbico de concreto e um pilar estrutural de concreto*) partiu do princípio da sustentabilidade, que está ancorado em três critérios básicos: ambiental, econômico e social.

Foi delineado um diagrama (Figura 4.22) para a determinação de uma metodologia adequada que investigasse os dois parâmetros facilitando, assim, a visualização. A convergência entre os três grupos representa a sustentabilidade, para o par ambiental-social a metodologia estabelecida foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para o par social-econômico foi o Custo do Ciclo de Vida (CCV).

Figura 4.22 – Diagrama da sustentabilidade e metodologias utilizadas



Fonte: Wikipédia (2020).

A ACV foi definida no par ambiental-social tendo em vista a interferência que os impactos ambientais ocasionam na qualidade de vida, sem abarcar a análise social da ACV que abrange questões como as condições de trabalho e direitos humanos na produção dos produtos e serviços.

Não é possível avaliar o viés da ACV sem considerar o aspecto social, pois o estudo da sustentabilidade na construção civil está sendo conduzido, primordialmente, para a população que utiliza as obras de engenharia para a satisfação de seus propósitos e, com isso, devem apresentar condições que estejam de acordo com as necessidades presentes e futuras.

Assim escolheu-se a análise do CCV, pois o fator econômico exerce impacto sobre a população, principalmente, por limitar o acesso aos bens produzidos pela construção civil em relação às pessoas de menor poder aquisitivo.

4.7.1.1 *Software SimaPro*

O SimaPro é uma ferramenta flexível que possibilita a verificação e a comparação ambiental de produtos, serviços e processos de etapas da ACV. O programa auxilia na elaboração da ACV, seguindo as recomendações das normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014d; ABNT, 2014e) e encontra-se no mercado desde o início dos anos 1990.

É uma ferramenta bastante confiável para indústrias, empresas de consultoria e universidades em mais de 80 países. Esse software apresenta uma biblioteca de dados e diferentes métodos de cálculo embutidos em seu sistema, na versão completa.

A estrutura dos métodos de avaliação de impacto no SimaPro é baseada: a) na caracterização, onde os materiais que contribuem para uma categoria de impacto são multiplicados por um fator de caracterização que expressa a contribuição relativa de cada um deles; b) na avaliação de danos, a combinação de uma série de impactos em uma categoria de dano; c) na normalização, os indicadores de impacto sofrem normalização, com isso todos ficam com a mesma unidade, o que facilita a comparação; d) na ponderação, um fator que multiplica os impactos para normalizá-los.

O software SimaPro possui um banco de dados detalhado de entrada e saída com produtos diversificados que abrange grande parte da economia, além da compatibilidade com o banco de dados Ecoinvent, que engloba mais de 10.000 processos. Este banco resulta do esforço de diferentes entidades Suíças para atualizar e elaborar diversas bases de dados de inventário de ciclo de vida.

Assim há possibilidade de criar novos produtos ou processos, associando-os aos já existentes. O programa possui uma conformação que permite filtrar os resultados, compará-los, agrupá-los, apresentá-los em gráficos ou fluxogramas.

4.7.1.2 *ACV modular*

O Conselho Brasileiro da Construção Sustentável (CBCS, 2014) propôs, por meio das orientações da Plataforma Global de ACV-m, as questões ambientais mais representativas em uma Avaliação do Ciclo de Vida: a) consumo de água: contribuição para o estresse hídrico e suas consequências; b) consumo de recursos naturais: consumo de matéria-prima não renovável ou exploração de recursos renováveis sem manejo ou acima da biocapacidade; c) mudanças climáticas: emissões de gases que aceleram o efeito estufa; d) consumo de energia: eficiência no uso de energia e contribuição para esgotamento de fontes de energias

não renováveis; e) geração de resíduos: desperdício de produtos ou geração de subprodutos com risco de contaminação ambiental.

No decorrer da ACV-m os danos ambientais foram classificados nas categorias de impactos conforme o método de avaliação adotado. Existem diferentes modelos de avaliação, sendo no presente caso utilizado a conjugação entre o somatório dos impactos ambientais totais (*Eco-indicador 99*) e os impactos ambientais individuais (*consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, uso de recursos naturais e mudanças climáticas*).

4.7.2 Unidade funcional metro cúbico de concreto (MCC)

Tendo em vista que o trabalho engloba o ciclo de vida parcial da unidade funcional metro cúbico de concreto, a metodologia básica para determinação da ACV constituiu-se na abordagem do berço ao portão.

Para tanto, foram utilizados os traços apresentados nos capítulos 4 e 5 sendo eles: REF, FC50, FC60, FC60CH10, FC70CV10 e FC70CV10CH10. Os traços FC60P e FC70CV10P não foram utilizados devido a impossibilidade de determinação da superfície a ser pintada levando-se em consideração a abordagem do berço ao portão.

4.7.2.1 Metodologia da ACV referente a unidade funcional MCC

4.7.2.1.1 Definições de escopo e objetivos (MCC)

Este estudo teve por objetivo avaliar e comparar fatores ambientais e econômicos de alternativas de um metro cúbico de concreto estrutural disposto em região próxima à Universidade Federal de Santa Maria – RS, a ser utilizado em uma edificação composta por oito pavimentos, sendo o primeiro deles pilotis, com as 4 faces expostas ao exterior.

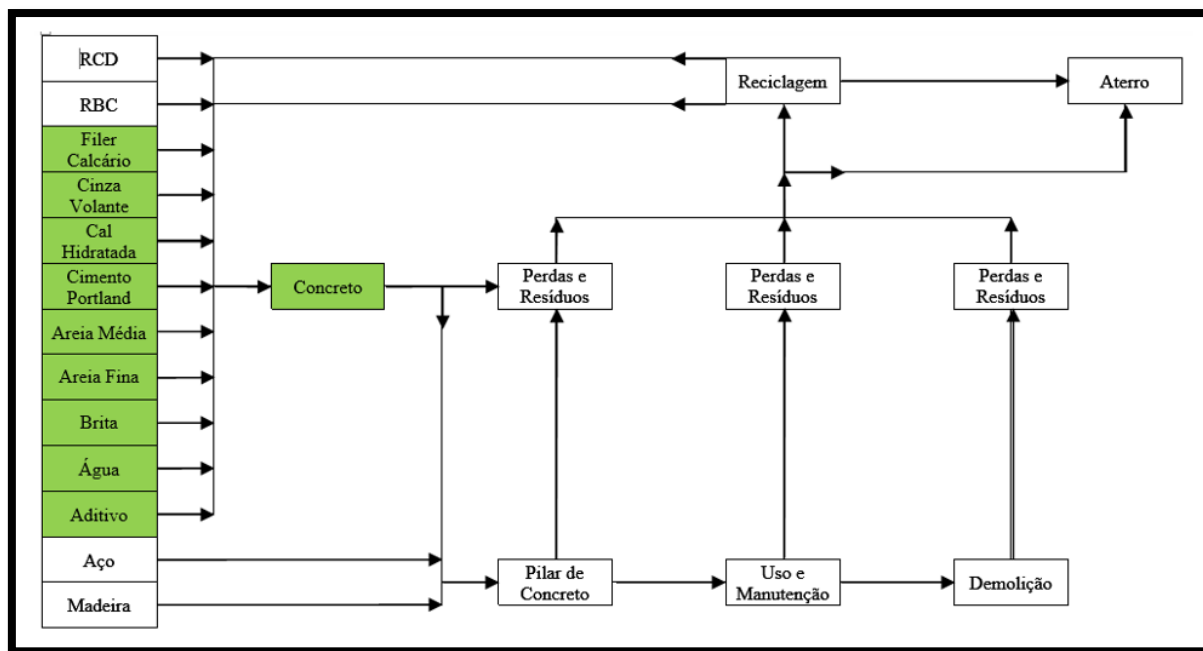
4.7.2.1.2 Unidade funcional, fluxos de referência e fronteiras do sistema (MCC)

Enquanto unidade funcional, o metro cúbico de concreto foi analisado do berço ao portão, tendo em vista que os impactos considerados estão relacionados à extração, processamento e transporte das matérias primas, bem como a produção e transporte do concreto na obra, conforme demonstrado na Figura 4.23 (*itens em verde*).

Desta forma, pode ser observado na Figura 4.23 os fluxos de referência e as fronteiras que delimitam o escopo do estudo da unidade funcional metro cúbico de concreto. As demais

fases não assinaladas em verde foram objeto de estudo da unidade funcional pilar estrutural de concreto que abordou o tema do “berço ao túmulo”. Assim foram selecionados os materiais da cadeia produtiva do concreto: agregados graúdos e miúdos, água, aditivo, CP, CH, FC e CV.

Figura 4.23 – Unidade funcional metro cúbico de concreto: fluxos e fronteiras (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

4.7.2.1.3 Avaliação e seleção de impactos (MCC)

Para o processamento dos dados referente a ACV foi utilizado o programa SimaPro, devido a possibilidade de flexibilização e adaptabilidade aos diversos objetivos propostos e também por permitir a customização de sua base de dados. Desta maneira, há uma otimização do processo tendo em vista a indisponibilidade de todos os dados para o inventário de impacto de ciclo de vida em alguns países como no caso brasileiro. Com isso, foi possível a personalização dos processos nas bases do programa com o intuito de proporcionar uma melhor representação no que se refere a entrada de dados. Como suporte ao programa SimaPro foi utilizado o banco de dados Ecoinvent considerado, por muitos pesquisadores, um dos mais completos tendo em vista a quantidade de dados, bem como por permitir ajustes para cenários alternativos.

A ACV foi realizada desde o berço (*produção dos materiais*) até a elaboração do concreto (*portão*) denotando as fases responsáveis pelos maiores impactos ambientais. Como já exposto, adotou-se a ACV-m que apresenta uma estrutura semelhante à ACV, contudo de forma mais sucinta fazendo com que a aplicação da ACV se torne mais ágil tendo em vista uma menor complexidade do levantamento. Em vista disso, os impactos ambientais mais relevantes são: a) os impactos ambientais individuais (*consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, uso de recursos naturais e mudanças climáticas*); os impactos ambientais totais representado pelo Eco indicador 99 (*saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos*); c) demais impactos ambientais (*emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil*).

Também foi realizado o levantamento de dados referente a CCV, utilizando-se Tabela de Composição de Preços para Orçamento (TCPO, 2020) e a Tabela de encargos sociais (RS) do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2020). Fez-se o levantamento dos custos da fase de elaboração do metro cúbico de concreto referente aos 6 traços de concreto estudados.

4.7.2.1.4 Coleta de dados para o inventário (MCC)

A aquisição de dados para o inventário constitui em uma das partes mais importantes de uma ACV, podendo ser de fonte primária (*informações obtidas diretamente dos locais de produção*) ou secundária. Assim foram levantados os dados primários referentes a insumos como: agregados miúdos (*areia média e fina*), agregado graúdo (*brita*) e CP. Para tanto foram coletadas informações que possibilitassem a montagem de composições referentes a entradas e saídas, tanto em relação ao aspecto produtivo, bem como à unidade funcional metro cúbico de concreto.

Os dados secundários são utilizados por ocasião da impossibilidade de aquisição dos primários. Neste caso é necessário que sejam atendidas a representatividade da realidade local, bem como sua qualidade.

Em relação a ACV a disponibilidade na aquisição de dados secundários, em bases internacionais, deve estar “*nacionalizada*” afim de atender a realidade local. Todavia este tipo de alternativa somente deve ser utilizada por ocasião das bases de dados nacionais serem insuficientes para o estudo.

Dentro desta perspectiva foi lançado mão da base de dados Ecoinvent a qual contempla, de maneira plena, um inventário com metadados adaptados às características locais.

4.7.2.2 Análise do inventário do ciclo de vida (MCC)

Nesta fase são determinados os fluxos de entrada e saída de material e energia para cada unidade de processo do sistema relacionado ao produto. O cálculo é feito da seguinte forma: a) classificação dos fluxos elementares em “*entrada*” ou “*saída*”; b) uniformização dos dados em quantidade.período⁻¹, período pode ser ano, mês, dia; c) cálculo do total de material, combustível e energia envolvido em todo o processo unitário; d) divisão do total de cada insumo pelo total de material principal produzido, em quilograma (*kg*); e) obtenção dos fluxos de entrada e saída de cada unidade de processo.

A obtenção das informações para o inventário do ciclo de vida constituem uma associação entre dados diretos e indiretos. Em relação aos dados diretos tem-se os agregados graúdos (*brita 0*), agregados miúdos (*areia fina e média*) e CP. Já os dados indiretos referem-se a CH, FC e CV, aditivo e água.

Nesta fase do trabalho foram utilizados dados de Silva (2014) para a composição do inventário no que se refere aos dados diretos (APÊNDICE B). Os fluxos elementares de entradas e saídas são apresentados nos tópicos subsequentes.

4.7.2.2.1 Agregados miúdos do berço ao portão (MCC)

Para as informações referentes ao inventário do ciclo de vida dos agregados miúdos (*areia média e fina*) foram utilizados dados de uma empresa localizada na região do Passo do Rio Verde em Santa Maria, Rio Grande do Sul, onde a extração é realizada a partir de cavas diretamente no rio.

Conforme dados fornecidos há um consumo de óleo Diesel de 0,57 L.ton⁻¹ de areia extraída e de 80 L.ton⁻¹ de água a partir de um processo que utiliza a recirculação de água, sendo que a captação é própria com uma estimativa de perda da ordem de 10%.

Para o consumo de combustível foi estimado um valor médio de 5,5 km.L⁻¹ a partir de um caminhão com capacidade de 12 m³ (*areia média ou fina*) para uma distância média de percurso desde a empresa até as proximidades da UFSM de 38 km (*ida e volta*). Os dados de

entrada no programa SimaPro referente a 1 tonelada de areia média ou fina são 0,79 L de Diesel e 80,0 L de água

4.7.2.2.2 Agregados graúdos do berço ao portão (MCC)

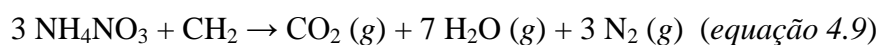
Para o fornecimento das informações referente ao inventário do ciclo de vida dos agregados graúdos (*brita 0*) foram utilizados dados de uma empresa localizada no município de Itaara próximo a Santa Maria, Rio Grande do Sul, onde coletou-se os dados referentes ao processo de britagem e transporte da pedra basáltica. A relação dos equipamentos utilizados como modelo e fabricante constam da Tabela 4.14 e foram fornecidos pela empresa. O consumo de cada equipamento foi obtido no catálogo do fabricante. Para os equipamentos movidos a energia elétrica não houve necessidade de consulta junto ao fabricante tendo em vista que a empresa forneceu o consumo médio de eletricidade ($84.000 \text{ kWh.mês}^{-1}$).

Tabela 4.14 – Equipamentos e consumo para extração de agregado graúdo (MCC)

Equipamento/modelo	Consumo
Escavadeira hidráulica - Case CX220	Diesel - 15 L.h^{-1}
Pá carregadeira - Case 721E	Diesel - $24,4 \text{ L.h}^{-1}$
Caminhão - Mercedes 2324	Diesel - $5,5 \text{ km.L}^{-1}$
Compressor de ar estacionário -Atlas Copco GA 160	Energia elétrica
Perfuratriz - PWHP 5000	Energia elétrica
Britador – Nordberg 100/80	Energia elétrica
Britador – 11/44 Nordberg 2 - 200 hp	Energia elétrica

Fonte: Silva (2014).

O explosivo utilizado para o desmonte da rocha apresenta-se sob a forma de lama sendo que a empresa optou por não informar as especificações, para tanto foi adotado um explosivo do tipo “*Slurry*” o qual é composto por Nitrato de Amônia e óleo Diesel. A quantidade de explosivo requerida por metro cúbico de rocha britada é de 350 g. Com o intuito de quantificar as emissões advindas do uso foi considerado a reação química da mistura de 94,5% de nitrato de amônio e 5,5% de óleo Diesel, conforme equação 4.9.



Com a equação 4.9 pode-se calcular a massa de cada uma das emissões. Na Tabela 4.15 estão as massas molares do Nitrato de Amônia, Diesel e demais substâncias da reação.

Tabela 4.15 – Massa molar do explosivo tipo “*slurry*” e dos produtos da reação (MCC)

Molécula	Massa molar ($g.mol^{-1}$)
NH ₄ NO ₃ - Nitrato de Amônia	80
CH ₂ - Óleo Diesel	14
CO ₂ - Dióxido de Carbono	44
H ₂ O – Vapor de água	18
N ₂ - Gás Nitrogênio	28

Fonte: Silva (2014).

Em relação ao consumo de óleo Diesel com transporte onde o consumo ocorre em km.L⁻¹, foram calculados as distâncias percorridas sendo 0,5 km do local de extração até o equipamento de britagem e de 30,2 km da empresa até as proximidades da UFSM (*ida e volta*), com um caminhão com capacidade de 12 m³.

O fluxo para 1 g de explosivo “*Slurry*” foi obtido considerando a quantidade de cada produto resultante da reação química dessa substância: calcularam-se quantos mols de Nitrato de Amônia e Diesel estão contidos em 1 g do explosivo e multiplicou-se a quantidade de mols pela massa molar de cada produto da reação conforme Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Substâncias químicas relacionadas a 1g de explosivo (MCC)

Emissão	Quantidade
NH ₄ NO ₃ - Nitrato de Amônia	0,945 g
CH ₂ - Óleo Diesel	0,055 g
CO ₂ - Dióxido de Carbono	0,173 g
H ₂ O - Vapor água	0,496 g
N ₂ - Gás Nitrogênio	0,331 g

Fonte: Silva (2014).

Conforme dados fornecidos pela empresa a produção é de 1.500 toneladas de pedra britada por dia caso nenhuma paralização ocorra. Todavia adotou-se uma produção de 1.000 toneladas dia para efeitos de cálculo considerando eventuais paralizações na produção. São apresentados o percentual mensal da produção de cada granulometria de pedra britada: brita 02 - 48%, brita 01 – 30%, brita 0 – 2% e pó de pedra 20%.

De posse dos dados referentes ao consumo de Diesel, energia elétrica e explosivo pode-se calcular a parcela referente a brita 0. Quanto ao consumo de Diesel foi adotado 22 dias úteis.mês⁻¹, com um fator de 7,33 horas diárias trabalhadas o que totaliza 161,26 horas.mês⁻¹. Com isso foi possível o cálculo do volume de combustível para os

equipamentos com consumo em $L.h^{-1}$. Foi adotado para a conversão de metro cúbico para tonelada e vice-versa o fator de $2,49 \text{ ton.m}^{-3}$.

Em relação a energia elétrica foi dividido o consumo mensal pela produção mensal de brita 0 resultando no consumo por tonelada desse material. Na Tabela 4.17 podem ser observados os dados de entrada no programa SimaPro referente a brita 0.

Tabela 4.17 – Insumos para obtenção de 1 tonelada de brita 0 (MCC)

Insumo	Quantidade	Unidade	Fluxo
Energia elétrica	0,25	kWh	Entrada
Diesel	0,19	L	Entrada
Explosivo	23	g	Entrada

Fonte: Silva (2014).

4.7.2.2.3 CPV-ARI do berço ao portão (MCC)

O CPV-ARI foi obtido em uma fábrica localizada no Paraná, sendo os dados referentes a uma média mensal de 12 meses. Juntamente com os dados de fabricação do CP são apresentados os de mineração. Na Tabela 4.18 são apresentadas as quantidades de material retiradas da jazida, bem como os insumos necessários para obtenção da massa total de material. A coluna de alocação refere-se à distribuição dos impactos ambientais potenciais referentes ao uso de insumos e consumo da matéria prima.

Tabela 4.18 – Dados de mineração da jazida de Calcário (MCC)

Material	Quantidade (ton)	Alocação (%)	Fluxo
Calcário para farinha	133.645,92	84,14	-
Quartzito	656,0	0,41	-
Filito	4.480,17	2,82	-
Calcário filer/cimento	9.843,42	6,20	-
Calcário para obras e estradas	1.448,25	0,91	-
Brita expedida	4.761,75	3,00	-
Solo brita expedido	672,25	0,42	-
Areia industrial expedida	3.331,42	2,10	-
Ext. rocha + decapeamento	107.872,33	-	-
Total	266.711,50	100,0	-
Insumo	Quantidade	Unidade	Fluxo
Diesel	94.018,87	L	Entrada
Explosivo	29.762,00	kg	Entrada

Fonte: Silva (2014).

O consumo de óleo Diesel inclui o combustível usado para realizar o transporte da jazida à fábrica. A alocação foi realizada, segundo ISO NBR 14040 (ABNT, 2014e), sendo que a repartição do fluxo de entrada e saída ocorre entre mais de um produto ou sistema.

Os impactos referentes a extração da rocha e o decapeamento foram divididos entre os demais produtos, pois esse é o primeiro processo para obtenção de todos os materiais listados.

O explosivo utilizado é o Trinitrotolueno (*TNT*), para quantificar o impacto de seu uso, sem considerar a carcaça do explosivo, considerou-se a reação química apresentada na equação 4.10. A partir da reação do TNT, calculou-se a massa de cada uma das emissões. As massas molares de TNT e de cada produto da reação estão apresentadas na Tabela 4.19.

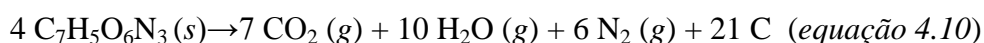


Tabela 4.19 – Massa molares de TNT e dos produtos da reação química (*MCC*)

Molécula	Massa molar ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)
$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$ - Trinitrotolueno	227
CO_2 – Dióxido de Carbono	44
H_2O - Água	18
N_2 – Gás Nitrogênio	28
C - Carbono	16

Fonte: Silva (2014).

O fluxo para 1 kg de TNT foi obtido considerando a quantidade de cada produto resultante da reação química dessa substância, assim calculou-se que: um kg de TNT equivale a, aproximadamente, 4,41 mols; multiplicou-se a quantidade de mols pela massa molar de cada produto da reação, obtendo a quantidade em massa de cada componente, apresentado na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Emissões relacionadas a 1 kg de explosivo TNT (*MCC*)

Emissão	Quantidade
CO_2	339,21 g
H_2O	198,24 g
N_2	185,02 g
C	277,53 g

Fonte: Silva (2014).

Tabela 4.21 – Resumo dos dados de fabricação do CPV-ARI até a clinquerização (MCC)

Cimento	CPV-ARI
Produção média (ton)	15.490,18
Teor de clínquer (%)	92,5
Clínquer produzido (%)	15,42
Energia consumida (kWh)	1.812.717,55
Consumo térmico – combustível (MJ.t ⁻¹)	2.452,38

Fonte: Silva (2014).

Os dados referentes ao processo produtivo foram agrupados em “até a clinquerização”, moagem e ensacamento. O consumo energético até a clinquerização foi obtido através da soma de todas as energias envolvidas, a divisão de consumo para o CPV-ARI foi realizada da seguinte forma (cada item corresponde a uma linha da Tabela 4.21):

- Produção média (ton): calculou-se a produção para o CPV-ARI;
- Teor de clínquer (%): estimou-se o teor de clínquer para o CPV-ARI;
- Clínquer produzido (%): calculou-se o total de clínquer;
- Energia consumida (kWh): multiplicou-se o resultado do item c pela energia total gasta pela fábrica até a clinquerização;
- Consumo térmico-combustíveis (kcal.ton⁻¹): multiplicou-se o resultado do item c pelo consumo térmico total no forno. Os valores apresentados já consideram o co-processamento, que corresponde a 20,70% do combustível utilizado.

O consumo energético da moagem do CP e ensacamento foi de 38,59 kWh.ton⁻¹, portanto, o consumo total de energia foi obtido a partir da soma da energia elétrica consumida até a clinquerização e o consumo dos processos posteriores. O consumo total de energia do CPV-ARI está listado na Tabela 4.22. O consumo térmico é a soma de coque de petróleo e carvão mineral, a proporção não foi fornecida, adotando-se 61,89% de carvão e 38,11% de coque. Considerou-se a extração do carvão e do coque utilizando dados do SimaPro.

Tabela 4.22 – Consumo total de energia do CPV-ARI (MCC)

Energia consumida (kWh.ton ⁻¹)	Consumo térmico de combustível (MJ.ton ⁻¹)
155,61	2.452,38

Fonte: Silva (2014).

Considerou-se o transporte do CP até as proximidades da UFSM à uma distância de 1000 km, para um caminhão com capacidade de 45 toneladas e consumo de 5,5 km.L⁻¹, resultando em 4,04 litros de Diesel por tonelada de CP.

4.7.2.2.4 Aditivo hiperplastificante e água (MCC)

O inventário de aditivo hiperplastificante, bem como da água utilizada foi proveniente da base de dados do Ecoinvent, tendo em vista que não foi possível a obtenção de dados locais. Procurou-se escolher os itens, constantes no banco de dados Ecoinvent, que fossem mais próximos dos insumos em questão. Para o aditivo hiperplastificante foi escolhido o item “40% active substance, polycarboxilates at plant” e para a água “tap water, at user”.

4.7.2.2.5 FC e CV (MCC)

O inventário do FC e da CV utilizados foi proveniente da base de dados do Ecoinvent, considerando que não foi possível a obtenção de dados locais. Procurou-se escolher os mais semelhantes possíveis, respectivamente: “limestone, milled, loose” e “fly ash dummy”.

4.7.2.2.6 CH (MCC)

O inventário da CH utilizado foi proveniente da base de dados do Ecoinvent, considerando que não foi possível a obtenção de dados locais. Procurou-se escolher o mais próximo possível “Lime hydrated, loose at plant”.

4.7.2.2.7 Combustível do berço ao portão (MCC)

Para calcular o fluxo elementar do combustível foi transformado volume em massa, e determinada a energia associada em g.kWh⁻¹ para poder calcular os fatores de emissão para um litro de óleo Diesel, considerando apenas o uso do combustível.

Os fatores de emissões da queima do óleo Diesel, Tabela 4.23, foram obtidos da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA 315/2002 (BRASIL, 2002). O poder calorífico do óleo Diesel utilizado foi de 9,87 MWh.m⁻³ e a massa específica adotada, de 0,825 kg.dm⁻³ (PETROBRAS, 2014). O fluxo elementar para 1 litro de Diesel foi obtido através da conversão do consumo de Diesel em massa para energia, o total de energia consumida foi multiplicado pelo fator de emissão para cada uma das substâncias emitidas conforme Tabela 4.24.

Tabela 4.23 – Fatores de emissão de óleo Diesel (*CONAMA 315/2002*) (*MCC*)

Elemento	Fator de emissão ($g.kWh^{-1}$)
CO – Monóxido de Carbono	5,45
HC - Hidrocarbonetos	0,78
NO(x) – Óxidos de Nitrogênio	5,0
MP – Material Particulado	0,16

Fonte: Silva (2014).

Tabela 4.24– Emissões relacionadas e 1 L de Diesel (*MCC*)

Emissão	Quantidade
CO	53,79 g
HC	7,7 g
NO _x	49,35 g
MP	1,58 g

Fonte: Silva (2014).

4.7.2.2.8 Energia elétrica do berço ao portão (*MCC*)

Para quantificar as emissões provenientes da energia elétrica, utilizou-se um fator de emissão médio mensal de uma série de dados de outubro de 2012 a setembro de 2013, publicados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2020b). A média resultou em $0,103 \text{ ton CO}_2.MWh^{-1}$. Para quantificar a energia elétrica necessária à elaboração do metro cúbico de concreto na obra foi utilizada a TCPO (2020). Para tanto foi considerado o uso de uma betoneira de 2 hp ($1,5 \text{ kW}$) com capacidade de 400 L e um fator de utilização por metro cúbico de concreto de 0,31, gerando um consumo de $0,47 \text{ kWh.m}^{-3}$.

4.7.3 Unidade funcional pilar estrutural de concreto (*PEC*)

Tendo em vista que o trabalho engloba o ciclo de vida da unidade funcional pilar estrutural de concreto, a metodologia básica para determinação da ACV constituiu na abordagem do berço ao túmulo. Para tanto foram utilizados os traços apresentados nos capítulos 4 e 5 sendo eles: REF, FC50, FC60 FC60P, FC60CH10 e FC70CV10P. Os traços FC70CV10 e FC70CV10CH10 não foram utilizados por terem apresentado uma vida útil de 4 e 29 anos, respectivamente conforme Item 5.2.3, inferiores ao que determina a NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

4.7.3.1 Metodologia da ACV referente a unidade funcional PEC

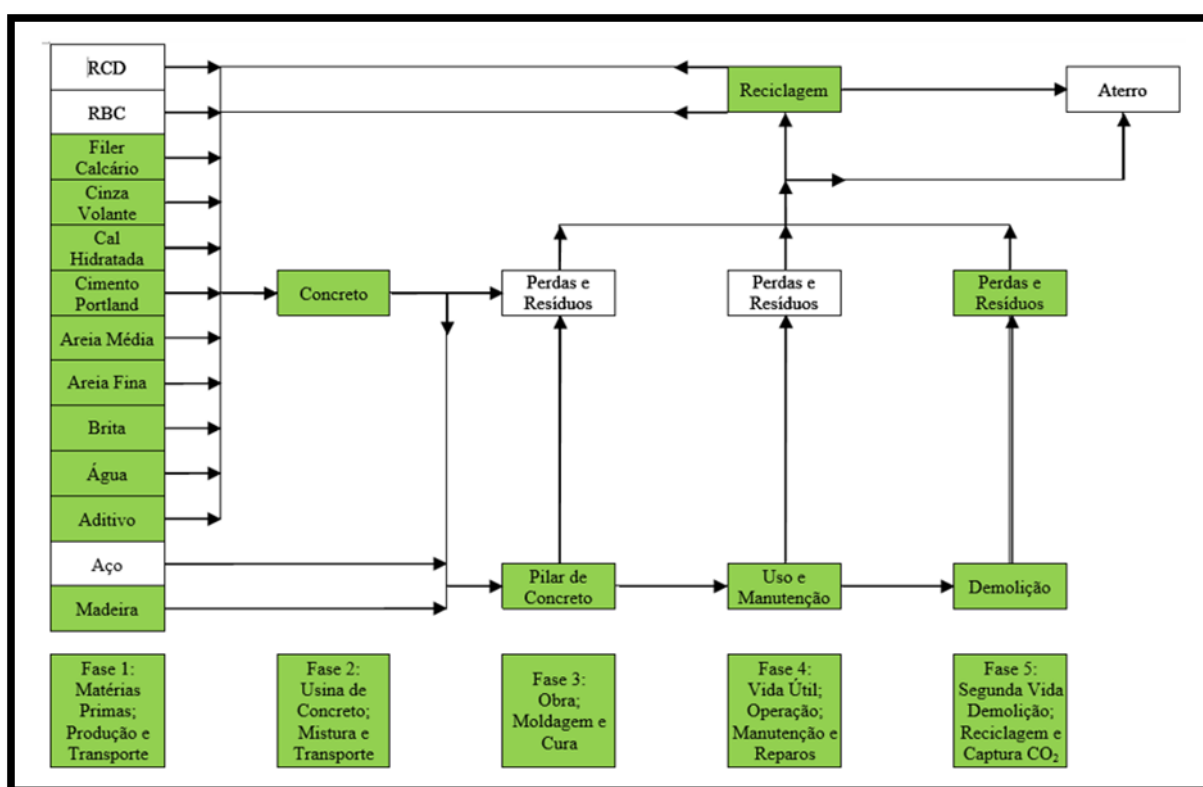
4.7.3.1.1 Definições de escopo e objetivos (PEC)

Esta parte do trabalho tem como objetivo avaliar e comparar fatores ambientais e econômicos de alternativas de um pilar estrutural de concreto disposto em uma região próxima à Universidade Federal de Santa Maria - RS.

4.7.3.1.2 Unidade funcional, fluxos de referência e fronteiras do sistema (PEC)

A Figura 4.24 mostra os fluxos de referência e as fronteiras que delimitam o escopo do estudo desta unidade funcional (*cor verde*).

Figura 4.24 – Unidade funcional pilar estrutural de concreto: fluxos e fronteiras (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Enquanto unidade funcional, o pilar estrutural de concreto será analisado do berço ao túmulo, sem levar em conta disposições e alternativas posteriores. Nesta fase, os impactos

considerados estão relacionados a extração, processamento e transporte das matérias primas, produção e transporte do concreto na obra, manutenção, desconstrução e reciclagem.

Assim foram selecionados os principais materiais da cadeia produtiva do concreto como: agregados graúdos e miúdos, água, aditivo, CP, CH, FC e CV, formas, tinta, bem como demais insumos necessários à manutenção, desconstrução e reciclagem da unidade funcional.

O pilar estrutural de concreto está em posição central no primeiro andar de uma edificação composta por oito pavimentos, sendo o primeiro deles pilotis. O pilar suporta as cargas provenientes da construção e está em situação coberta e exposto ao ar.

Estimou-se os esforços solicitantes com o auxílio do software Eberick V9 (ALTOQI, 2020), apresentados na Tabela 4.25. Conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014c) - Projetos de estruturas de concreto – Procedimento (APÊNDICE A), realizou-se o dimensionamento do pilar para cada traço estudado.

Por se tratar de região urbana foi definida a classe de agressividade ambiental II - moderada. O cobrimento adotado foi de 25 mm, pois se supôs agressividade mais branda em local coberto na região de Santa Maria.

Tabela 4.25 – Esforços solicitantes e definições de projeto (*PEC*)

Parâmetro	Valor
Esforço normal de cálculo (<i>Nd</i>)	1.260 kN
	REF – 120 MPa
	FC50 – 80 MPa
Resistência característica à compressão do concreto (<i>fck</i>)	FC60 e FC60P – 60 MPa
	FC60CH10 – 80 MPa
	FC70CV10P – 45 MPa
Momento fletor no eixo vertical y da seção do pilar (<i>Myd</i>)	18 kN.m
Momento fletor no eixo horizontal x da seção do pilar (<i>Mxd</i>)	18 kN.m
Cobrimento da armadura	25 mm
Altura do pilar	2,75 m

Fonte: Altoqi (2020).

O dimensionamento foi realizado com o auxílio do software P-Calc V1 4.0 da TQS (TQS, 2020). Tendo em vista que o carregamento é o mesmo, foi considerado uma armadura constante, desta forma a variável que define os pilares é a seção transversal. As características dos pilares (*seção transversal, volume de concreto e área de forma*) são mostradas na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Dimensionamento dos PEC

Especificações	REF	FC50	FC60 e FC60P	FC60CH10	FC70CV10P
Seção transversal (cmxcm)	19x19	23x24	25x26	23x24	28x28
Volume de concreto (m ³)	0,1	0,15	0,18	0,15	0,22
Área de forma (m ²)	2,09	2,59	2,81	2,59	3,08

Fonte: TQS (2020).

4.7.3.1.3 Avaliação e seleção de impactos (PEC)

A avaliação e seleção dos impactos possui a mesma metodologia aplicada a unidade funcional metro cúbico de concreto apresentada no Item 4.7.2.1.3.

4.7.3.1.4 Coleta de dados para o inventário (PEC)

A coleta de dados para o inventário possui a mesma metodologia aplicada a unidade funcional metro cúbico de concreto apresentada no Item 4.7.2.1.4.

4.7.3.2 Análise do inventário do ciclo de vida (PEC)

No presente item serão apresentados os dados complementares ao Item 4.7.2.2 para que seja realizado o inventário de ciclo de vida da unidade funcional pilar estrutural de concreto, associando-se os dados diretos e indiretos. Em relação aos dados diretos tem-se uso/manutenção e desconstrução/reciclagem. Já os dados indiretos referem-se a: madeira, execução da estrutura e pintura (APÊNDICE B). Os fluxos elementares de entradas e saídas são apresentados nos tópicos subsequentes.

Nesta fase do trabalho foram adaptados os dados de Silva (2014) e Lamberti (2015). Silva (2014) realizou sua pesquisa em um pilar de concreto com o ACV e CCV do berço ao portão, enquanto Lamberti (2015) realizou o mesmo estudo do portão ao túmulo.

4.7.3.2.1 Madeira (PEC)

O inventário da madeira utilizada foi proveniente da base de dados do Ecoinvent, considerando que não foi possível a obtenção de dados locais, escolheu-se o mais semelhante possível denominado “*plywood, outdoor use, at plant*”.

4.7.3.2.2 Execução da estrutura (PEC)

Nesta etapa foram calculados a energia elétrica referente aos equipamentos relacionados com a execução do pilar estrutural de concreto tais como: serra, guincho, betoneira e vibrador.

Para a etapa de concretagem do pilar estrutural de concreto (*elaboração do concreto, transporte, lançamento e adensamento*) foi utilizada a base de dados do SINAPI (2020) com um coeficiente de $2,23 \text{ kWh.m}^{-3}$.

Para a etapa de montagem do pilar estrutural de concreto (*montagem das formas*), foi utilizado a base de dados do SINAPI (2020) com um coeficiente para o consumo de energia de $0,2 \text{ kWh.m}^{-2}$.

4.7.3.2.3 Uso e manutenção do portão ao túmulo (PEC)

Como rotina de manutenção do pilar estrutural de concreto foi adotada a lavagem em intervalos de 3 anos dentro da vida útil prevista para atender a estética e manutenção. Para a água foi utilizado o banco de dado Ecoinvent no item “*tap water in use*”. Os pilares FC60P e FC70CV10P não receberam lavagem tendo em vista que foram pintados, sendo observado um intervalo de 10 anos entre cada repintura conforme especificação do fabricante, desta maneira foi assegurada a estética e vida útil dos pilares.

Para a quantidade de água de lavagem dos pilares, foi adotada as especificações da Tabela de Composições e Preços para Orçamentos (TCPO, 2020) a qual considera a lavagem com lava-jato (*pressão de 1.700 psi*). Um dos insumos na TCPO (2020) para a lavagem é a querosene, para tanto foi utilizado o banco de dados Ecoinvent no item: “*kerosene, at refinery/l/US*” com um coeficiente de $0,13 \text{ L.m}^{-2}$.

O consumo de água para a lavagem dos pilares foi feita através da TCPO (2020) que indica um fator de 360 L.h^{-1} ou de 6 L/m^2 , multiplicado pela área de cada pilar, pela vida útil e dividido por três (*periodicidade das lavagens*) resultando na água total consumida.

Para a energia elétrica do lava-jato, foram utilizados os dados do fabricante que indica uma potência de 1.500 W . A TCPO (2020) apresenta no item “*limpeza do substrato com aplicação de jato de água fria*” um coeficiente de $0,13 \text{ h.m}^{-2}$. Com isso a energia consumida para a limpeza de 1 m^2 de pilar de concreto é equivalente a $0,2 \text{ kWh.m}^{-2}$, o qual multiplicado pela área do pilar, pela vida útil e dividido por três, obtém-se a energia total consumida.

4.7.3.2.4 Fixação de CO₂ durante a vida útil do portão ao túmulo (PEC)

No decorrer do uso da estrutura há difusão do CO₂ do ambiente para o interior do pilar, sendo esta reação um ponto favorável, pois contribui para sua diminuição na atmosfera. Alguns autores pesquisaram à respeito da quantificação do CO₂ absorvido (COLLINS, 2010; LAGERBLAD, 2006; PADE; GUIMARAES, 2007), sendo o exemplo mais empregado apresentado na equação 4.11.

$$\text{CO}_2 = x \cdot C \cdot \text{CaO} \cdot R \cdot A \cdot M \quad (\text{equação 4.11})$$

Onde:

x: profundidade carbonatada em metros;

C: quantidade ($\text{kg}_{\text{Cq}} \cdot \text{m}^{-3}$) de clínquer no aglomerante;

CaO: proporção de Óxido de Cálcio, adotado 0,65 (COLLINS, 2010), onde o valor 1 (*um*) seria 100%;

R: proporção de CaO totalmente carbonatada e transformada em CaCO₃ assumido 0,75, (LAGERBLAD, 2006);

A: área de concreto exposta (m^2);

M: fração molar química adimensional de CO₂/CaO = 0,79 (COLLINS, 2010).

O valor da profundidade carbonatada (*x*) é 0,025 metros para todos os traços, pois esse é o cobrimento da armadura. A composição do CP foi apresentada no Item 4.3.1, sendo o teor de clínquer no CPV-ARI de 90%. A quantidade de clínquer por metro cúbico em cada traço é apresentada na Tabela 4.11.

4.7.3.2.5 Pintura do portão ao túmulo (PEC)

Foi considerada aplicação de tinta acrílica para os pilares FC60P e FC70CV10P. A tinta utilizada foi da marca Coral denominada “*Proteção sol e chuva pintura impermeabilizante*” sendo aplicada em 3 demãos (*primer mais 2 demãos*). Segundo o fabricante em ambiente externo abrigado a vida útil da tinta é de 10 anos, a qual foi utilizada nesta periodicidade. Foi utilizado o banco de dados do Ecoinvent para a determinação do inventário, sendo usado o item: “*acrylic varnish, 87,5% in H2O, at plant*”.

Para o consumo da tinta acrílica a TCPO (2020) indica o item “*pintura com tinta acrílica em concreto, 3 demãos, aplicada com rolo de lã*”, com coeficiente de $0,45 \text{ L.m}^{-2}$, multiplicado pela área do pilar e pelo número de vezes que o mesmo deverá ser pintado utilizando uma vida útil da pintura de 10 anos conforme o fabricante.

4.7.3.2.6 Desconstrução e reciclagem do portão ao túmulo (PEC)

Nas fases finais, estimou-se que os métodos de desconstrução e reciclagem serão conforme as práticas usuais atuais. Para realizar a desconstrução do pilar de concreto armado, considerou-se martelo rompedor alimentado por compressor de ar portátil acionado por motor a óleo Diesel. A TCPO (2020) possui o item “*demolição de concreto armado com utilização de martelo rompedor*”, que utiliza um compressor de ar de 63 hp (47 kw) e capacidade de $3,3 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$. O consumo de Diesel médio, por hora, adotado foi de 6 L.h^{-1} . A unidade desse item da TCPO (2020) é metro cúbico, com coeficiente de 5 horas, logo, o consumo de Diesel é de 30 L.m^{-3} .

Para o carregamento do entulho, foi considerada uma perda de 5% do material. Empregou-se o item “*carga mecanizada de entulho em caminhão basculante*” da TCPO (2020), em conjunto com uma carregadeira sobre rodas de 129 hp com capacidade de $2,10 \text{ m}^3$, que gasta 0,0104 horas para cada metro cúbico, consumindo 24,4 litros por hora.

Para o gerenciamento dos resíduos a empresa especializada que atua na região de Santa Maria (RS), utiliza caminhões com capacidade de 6 e 12 m^3 , optando-se pela utilização do caminhão de 6 m^3 para o transporte do entulho da UFSM (Camobi), até a sede da empresa. A distância é de 14,3 km, sendo, portanto, o total é de 28,6 km com tempo de transporte de 1 hora, aproximadamente. O consumo de óleo Diesel do caminhão basculante para 1 hora é de 36,5 litros (TCPO, 2020). Com carga máxima (6 m^3), cada metro cúbico exige o equivalente a 6,08 litros de óleo Diesel.

Na empresa, o entulho é descarregado em local pré-estabelecido, o aço é separado e enviado à sucata e, posteriormente, retorna à siderúrgica. O concreto é manuseado por retroescavadeira modelo BL60B até o britador, que carrega $0,8 \text{ m}^3$, consumindo 8 litros de Diesel por hora, e levando, em média, 5 minutos para carregar e descarregar o material.

Todos os equipamentos da central de britagem são movidos por um gerador de 50 KVA acionado por motor a Diesel. O consumo do gerador é de 5 L.h^{-1} , com capacidade de separar $25 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Portanto, o gerador gasta 0,2 litros para cada metro cúbico de RCD produzido, com um consumo total, na etapa de desconstrução e reciclagem, de $37,41 \text{ L.m}^{-3}$.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

São expostos, neste capítulo, os dados da segunda etapa do planejamento experimental conforme Item 4.1 dos ensaios em concretos, referentes à resistência à compressão como: evolução (%) da resistência à compressão com a idade, intensidade de clínquer, intensidade de ligante e resistência à compressão unitária nas duas idades de controle (28 e 91 dias).

Após são apresentados os resultados do ensaio de carbonatação acelerada nas idades de 3, 6, 9 e 12 semanas, onde são analisados e discutidos os dados das profundidades e dos coeficientes de carbonatação (kc), bem como a estimativa da vida útil.

Na sequência são mostrados os dados relacionados à microestrutura dos concretos por meio da difração de raios-X (DRX) e termogravimetria analítica e diferencial (TG/DTG). Mediante este conjunto de resultados, analisa-se as mudanças nos produtos da hidratação do CP levando em consideração a presença das AM (FC e CV) e da CH, bem como o cálculo dos teores de água quimicamente combinada, Portlandita e teor de Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$).

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

No presente item são apresentados os resultados da resistência à compressão dos concretos em relação aos 6 traços estudados, além da evolução (%) da resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias. São apresentados, também, os resultados da intensidade de clínquer, intensidade de ligante e resistência à compressão unitária, seguidos pela análise e discussão dos dados, bem como a análise estatística dos mesmos.

5.1.1 Resistência à compressão

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias os quais são as médias de 4 (*quatro*) corpos de prova, com desvio máximo relativo de 10%. Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018b).

Os dados da Tabela 5.1 mostram a reduzida dispersão dos resultados de resistência à compressão tanto aos 28 como aos 91 dias de idade, tendo em vista dos valores dos coeficientes de variação, inferiores a 4%. Observa-se que o maior coeficiente de variação, aos 28 dias, foi de 3,1% para os traços REF e FC70CV10CH10. Já aos 91 dias observou-se um coeficiente de variação um pouco maior, 3,9% para o FC60CH10.

Tabela 5.1 – Resistência à compressão dos cps aos 28 e 91 dias

Traços	Média (MPa)	28 dias Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Média (MPa)	91 dias Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	118,1	3,6	3,1	127,2	1,2	1,0
FC50	80,1	1,7	2,1	87,8	2,1	2,4
FC60*	56,3	0,6	1,0	65,7	1,6	2,4
FC60CH10	70,2	0,9	1,3	88,6	3,5	3,9
FC70CV10*	28,0	0,4	1,6	51,8	0,5	1,0
FC70CV10CH10	31,3	1,0	3,1	43,5	0,3	0,7

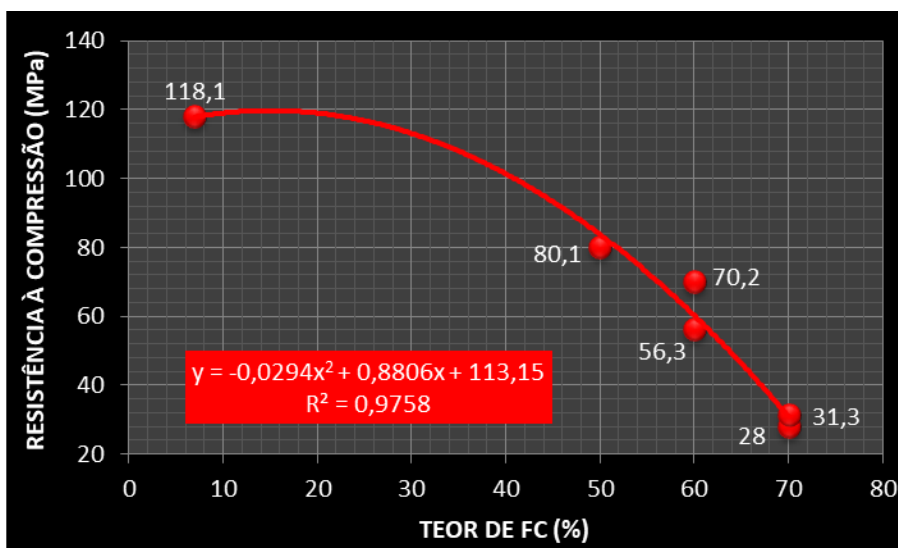
* A resistência à compressão do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

5.1.1.1 Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias

A Tabela 5.1 apresentam os valores para as resistências à compressão aos 28 dias de idade. Observa-se que todos os traços apresentaram resistência à compressão diminuída com o aumento do teor de FC (Figura 5.1), assim como nenhum apresentou resistência igual ou superior ao REF.

Figura 5.1 – Teor de FC x resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Com os resultados obtidos não foi possível corroborar as afirmações de Feltrin et al. (2016) e Soroka e Setter (1977) onde ocorreu um incremento na resistência à compressão mesmo com o aumento da substituição de FC para um mesmo fator a/ag. Também não foi

possível comprovar os estudos de Damineli (2013) onde todas as misturas com FC apresentaram resistências à compressão superiores quando comparadas com a referência para um fator a/ag de 0,5.

Entretanto, os dados indicam uma conformidade com os trabalhos de Dhir et al. (2007), Madani et al. (2016) e Zhao et al. (2015) onde a resistência à compressão foi reduzida, em todas as idades, com o aumento do teor de FC. No trabalho de Dhir et al. (2007), os autores justificaram a diminuição das resistências à compressão, com o aumento dos teores de FC, por meio da redução no teor de CP.

A razão da diminuição de resistência à compressão na idade de 28 dias, pode ser encontrada no trabalho de Bonavetti et al. (2001) onde constata-se (Figura 3.5) que, a partir dessa idade, inicia a formação, de maneira mais acentuada, dos teores de Monocarboaluminatos e Etringita. Conforme Lothenbach et al. (2008) o aumento do teor do primeiro, conduz a uma estabilização da Etringita o que leva a uma majoração do volume total da fase hidratada e, por consequência, uma diminuição da porosidade do sistema, o que pode levar a um aumento da resistência à compressão.

A explicação para o aumento do teor de Monocarboaluminato e da Etringita, a partir dos 28 dias de idade, deve-se a maior disponibilidade de íons Carbonato no sistema por meio do FC porque, a partir desta idade, inicia-se, de maneira mais acentuada, a transformação de Monosulfoaluminato em Monocarboaluminato, tendo em vista que o segundo é mais estável que o primeiro. Com isso há uma reconversão do Monosulfoaluminato em Etringita, assim, a partir deste momento, há um aumento no teor destes compostos.

Outra explicação relaciona-se ao fato de que a alta superfície específica (*BET*) e o alto teor de FC pode ter levado a uma aglomeração na mistura, aumentando a dificuldade do contato com a água, que, por sua vez, reduz a reatividade do FC. Uma reatividade mais baixa do FC leva a formação de menores quantidades de Carboaluminatos não permitindo uma diminuição na porosidade e consequentemente aumento na resistência à compressão. No caso de fatores a/ag baixos (0,25) esta situação pode vir a ser intensificada (PERLOT et al., 2013).

Ao comparar-se os valores da resistência à compressão do REF (118,1MPa) com o FC50 (80,1MPa), este último possui pouco mais da metade da quantidade de clínquer do primeiro (56%), sendo que a diferença de resistência à compressão, entre ambos, foi 47,4%, ou seja, o REF precisou, quase do dobro de clínquer para conseguir 50% a mais de resistência à compressão em relação ao FC50.

Desta forma pode-se notar que, mesmo sem a contribuição do aumento da resistência à compressão propiciada pelo incremento no teor de Carboaluminatos, a partir dos 28 dias de

idade, conforme Bonavetti et al. (2001), o FC50 apresentou um bom desempenho. Nota-se, assim que os traços com AM tiveram seu incremento de resistência à compressão baseado, possivelmente, na redução do tamanho dos poros devido ao empacotamento de partículas, ou seja, por efeito físico (RAMEZANIANPOUR; HOOTON, 2014; TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010).

No traço FC60CH10 a resistência à compressão de 70,2 MPa foi 24,7% maior do que a do FC60 (56,3 MPa), sendo que esta diferença deve-se à adição de 10% de CH, atuando para o aumento da resistência à compressão tanto do ponto de vista físico como químico. Do ponto de vista físico o processo ocorreu pela atuação da fração residual silicosa, ou seja, a fração inerte da CH funcionou como um agente de nucleação para a precipitação dos Hidratos de CP (HOPPE FILHO, 2008; QUARCIONI, 2008).

Quanto ao aspecto químico a CH propiciou uma aceleração na hidratação do CP levando a um aumento no grau da reação com os Silicatos e, conseqüentemente, um incremento na formação dos compostos hidráulicos (HOPPE FILHO, 2008; QUARCIONI, 2008).

A aceleração das reações de hidratação do CP está relacionada com um aumento na precipitação dos Aluminatos de Cálcio Hidratado devido a maior solubilidade do C_3A , tendo em vista um incremento na disponibilidade de íons hidroxila no meio aquoso, propiciada pela incorporação da CH (QUARCIONI, 2008). Ainda, segundo esse mesmo autor o aumento na precipitação dos Aluminatos de Cálcio Hidratado é amplificada na presença da CH Calcítica que é a mesma utilizada no presente trabalho. Desta forma, com maior disponibilidade de Aluminatos de Cálcio Hidratado, ocorreu aumento na interação com o Carbonato de Cálcio do FC levando a um incremento na formação de Carboaluminatos, conduzindo a redução na porosidade e a elevação da resistência à compressão como já foi abordado no caso do FC60CH10.

Assim como nos traços com 60% de FC, observa-se o melhor desempenho do FC70CV10CH10 (31,3 MPa) em relação ao FC70CV10 (28,0 MPa), todavia com diferença menor (11,8%) quando comparados com a diferença das resistências à compressão dos traços com 60% de FC. Neste caso, o melhor desempenho do traço com CH, está relacionado com a interação dos Aluminatos de Cálcio Hidratado da CV e do C_3A do CP, com o Carbonato de Cálcio do FC para a formação de Carboaluminatos (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017; BONAVETTI et al., 2003; HOPPE FILHO, 2008).

No caso do FC70CV10CH10 (31,3 MPa) a presença da CH propiciou maior solubilização dos Aluminatos do CP e da CV levando a uma rápida interação (*até os 28 dias de idade*) com o Carbonato de Cálcio do FC permitindo, assim, a formação de uma maior

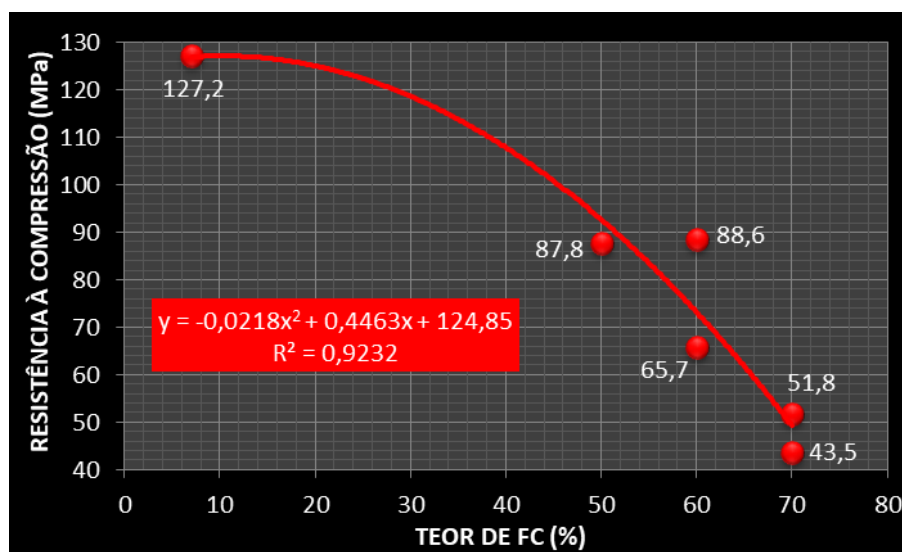
quantidade de Carboaluminatos que, por sua vez, levou a uma diminuição da porosidade e um aumento na resistência à compressão quando comparado com o FC70CV10 (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017; HOPPE FILHO, 2008; QUARCIONI, 2008).

Por outro lado, o FC70CV10 (28 MPa), apresentou uma menor disponibilidade de Aluminatos, aos 28 dias de idade, devido a diminuição da reatividade da CV tendo em vista a ausência de CH. Com isso, a formação de Carboaluminatos, nesta idade, ficou restrita a interação do Carbonato de Cálcio do FC com os Aluminatos do CP (C_3A), resultando em uma diminuição da resistência à compressão em relação ao FC70CV10CH10 (31,3 MPa).

5.1.1.2 Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão aos 91 dias

A Tabela 5.1 apresenta as resistências à compressão aos 91 dias de idade, para os quais não foi possível corroborar as afirmações realizadas no item anterior (28 dias), a não ser as de Dhir et al. (2007), Madani et al. (2016) e Zhao et al. (2015), conforme Figura 5.2.

Figura 5.2 – Teor de FC x resistência à compressão aos 91 dias



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A diminuição da resistência à compressão com o aumento no teor de FC na idade de 91 dias pode ser explicada por Courard et al. (2018), conforme Figura 3.4. Os autores esclarecem que, nas misturas cimentícias com FC, primeiro há formação de Etringita por consumo do Monossulfato; o qual, num segundo momento, é exaurido formando-se Monocarboaluminato pelo consumo do Hemicarboaluminato e num terceiro momento a fase

Hemicarboaluminato é esgotada por Carbonato de Cálcio adicional, não reagindo mais, embora permaneça como uma fase estável.

Tanto o primeiro momento como segundo resultam em preenchimento dos poros, redução da porosidade e, por consequência, um aumento da resistência à compressão, enquanto quantidades adicionais de Carbonatos na reação aumentam a porosidade e conseqüentemente impedem a elevação da resistência à compressão. É importante lembrar que, nos traços estudados, o teor mínimo de substituição de CPV-ARI por FC foi de 50%. Desta forma, as misturas cimentícias possuem quantidades substanciais de Carbonatos sendo elas, possivelmente, as responsáveis pelo aumento da porosidade o que pode ter comprometido o desenvolvimento da resistência à compressão.

Assim, Courard et al. (2018) explicam o motivo pelo qual a previsão de Bonavetti et al. (2001) não pode ser confirmada. Bonavetti et al. (2001) estudaram a substituição de CP por 20% de FC, ou seja, teor onde a maior parte dos Carbonatos foi consumida para a formação de Carboaluminatos. Com isso, não ocorreu a disponibilidade de quantidades adicionais de Carbonatos responsáveis pelo aumento da porosidade e diminuição na resistência à compressão.

Também foi aventada, no item anterior, a explicação de Perlot et al. (2013) na qual a evolução da resistência à compressão poderia ter sido afetada pelo alto teor de FC (> 50%) o que conduziria a aglomeração da mistura diminuindo a reatividade do FC, inibindo a formação de Carboaluminatos e contribuindo para o aumento da porosidade e diminuição da resistência à compressão.

Não obstante as questões levantadas por Courard et al. (2018) e Perlot et al. (2013), uma explicação bastante plausível e simples consiste nas conclusões de Dhir et al. (2007) onde os autores justificam a diminuição da resistência à compressão com o aumento dos teores de FC por meio da redução no teor de CP. Neste caso pode ter ocorrido o efeito “diluição”, tendo em vista a substituição de partículas de um material mais reativo (CPV-ARI), por outras de menor reatividade e/ou inerte (FC) (IRASSAR, 2009). Como consequência do efeito de diluição ocorre a diminuição dos produtos de hidratação, resultando na minoração da resistência à compressão do concreto em todas as idades.

Importante observar que o FC60CH10 apresentou resistência à compressão (88,6 MPa) maior que o FC50 (87,9 MPa) sendo que este último possui um teor de CP 24% maior que o primeiro. A explicação para o bom desempenho do FC60CH10 está relacionada com a adição de 10% de CH, haja vista que o FC60, sem esta incorporação, apresentou uma

resistência à compressão de 65,7 MPa. Assim, constata-se que a adição de 10% de CH no traço com 60% de FC propiciou um aumento na resistência à compressão de 34,9%.

Ao consultar a Tabela 4.11 pode-se constatar que a diferença no consumo de CP entre os traços FC50 e FC60 foi de 46 kg.m^{-3} , ou seja, valor muito próximo da quantidade de CH adicionada ao FC60CH10 que foi de 42 kg.m^{-3} . Com isso é possível afirmar que a quantidade de CH adicionada ao traço com 60% de FC desempenhou um papel semelhante ao do CP conferindo ao FC60CH10 uma resistência ligeiramente superior ao FC50.

Quanto ao traço FC70CV10CH10 (*43,5 MPa*) observa-se uma redução de 16% na resistência à compressão em relação ao FC70CV10 (*51,8 MPa*) apesar do primeiro possuir adição de 10% de CH. O menor desempenho do traço com CH, aos 91 dias, está relacionada ao aumento no teor de Carbonatos não combinados na matriz cimentícia conjugado a uma menor disponibilidade de Aluminatos para a formação de Carboaluminatos.

Conforme colocado no item anterior a presença da CH propiciou uma maior solubilização dos Aluminatos do CP e da CV permitindo um incremento na formação de Carboaluminatos até a idade de 28 dias o que proporcionou ao FC70CV10CH10 uma maior resistência à compressão em relação ao FC70CV10 nesta idade.

Desta maneira, a partir dos 28 dias de idade, ocorreu uma menor disponibilidade de Aluminatos na matriz cimentícia diminuindo a formação de Carboaluminatos o que levou a uma minoração na resistência à compressão aos 91 dias.

Também contribuiu para a diminuição da resistência à compressão do FC70CV10CH10 aos 91 dias, o aumento no teor de Carbonatos não combinados. Conforme Hoppe Filho (2008), a adição de CH aumenta o teor de Carbonato que, aliado a uma diminuição na disponibilidade de Aluminatos, levou a incremento na concentração de Carbonatos não combinados na matriz cimentícia.

Conforme Courard et al. (2018), a presença de Carbonatos não combinados em matrizes cimentícias contendo FC, leva a um aumento na porosidade e uma diminuição na resistência à compressão.

Destaca-se que o aumento no teor de Carbonatos não ocorreu a partir dos 28 dias de idade, estando presente na matriz cimentícia desde o início das reações. Não obstante, até os 28 dias de idade, ocorreu uma compensação entre o aumento da resistência à compressão dada pela formação de Carboaluminatos e a diminuição da mesma através do incremento no teor de Carbonatos.

Este equilíbrio foi possível devido ao consumo de parte dos Carbonatos, provenientes da adição de CH nas reações para a formação de Carboaluminatos. Este mecanismo pode

explicar, em parte, a pequena diferença (11,8%) entre as resistências à compressão do FC70CV10CH10 e FC70CV10 aos 28 dias de idade.

Outro aspecto, a ser destacado, diz respeito ao traço FC70CV10CH10 ser mais suscetível ao aumento no teor de Carbonatos que o FC60CH10, tendo em vista o primeiro possuir uma maior concentração de Carbonatos (70% de FC) e um menor teor de alumina ($C_3A - 20\% CP$), enquanto o segundo apresentar uma menor quantidade de Carbonatos (60% de FC) e possuir um teor mais elevado de alumina ($C_3A - 40\% CP$).

Quanto ao traço FC70CV10, conforme já colocado, observa-se uma resistência à compressão maior do que o FC70CV10CH10. Os motivos para o melhor desempenho do traço FC70CV10, aos 91 dias de idade, estão relacionados a redução no teor de Carbonatos não combinados na matriz cimentícia devido à ausência da CH, bem como a maior disponibilidade de alumina da CV para a formação de Carboaluminatos.

Desta forma é possível observar o efeito sinérgico entre a CV e o FC conforme descrito por Deschener et al. (2012) e De Weerd et al. (2011). A sinergia ocorre pela interação do FC com os Aluminatos fornecidos pela CV durante a reação pozolânica, levando a formação de Carboaluminatos, desta maneira há uma redução na porosidade e um aumento da resistência à compressão.

Contudo, a manifestação dos efeitos sinérgicos entre o a CV e o FC não ocorreu até os 28 dias, como pode ser observado pela evolução da resistência à compressão. A explicação para o mecanismo de interação entre o FC e a CV é dada por Detwiler e Mehta (1989), quando explicam que há uma preeminência do efeito físico nas primeiras idades (*até 7 dias*) e que, somente após os 28 dias, a sinergia entre efeitos físicos e químicos se tornam relevantes.

5.1.2 Evolução da resistência à compressão

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados da evolução da resistência à compressão, na forma de porcentagem, para cada um dos traços estudados. Todos os traços apresentaram a maior parcela de evolução na resistência à compressão aos 28 dias de idade, bem como à medida que o teor de FC aumentou, ocorreu um incremento na evolução da resistência à compressão aos 91 dias de idade.

A evolução da resistência à compressão do traço REF, aos 28 dias, apresentou um percentual de 92,8%. Esta evolução era esperada tendo em vista que o CPV-ARI possui alta resistência inicial conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018a).

Tabela 5.2 – Evolução (%) da resistência à compressão aos 28 e 91 dias

Traços	28 dias		91 dias	
	MPa	%	MPa	%
REF	118,1	92,8	127,2 (9,1)	7,2
FC50	80,1	91,2	87,8 (7,7)	8,8
FC60*	56,3	85,7	65,7 (9,4)	14,3
FC60CH10	70,2	79,2	88,6 (18,4)	20,8
FC70CV10*	28	54	51,8 (23,8)	46,0
FC70CV10CH10	31,3	72	43,5 (12,2)	28,0

* A evolução da resistência à compressão do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Em relação ao FC50 a maior parcela da evolução na resistência à compressão ocorreu aos 28 dias com um percentual de 91,2%. Entre os motivos que levaram a uma evolução mais relevante nesta idade podem estar: a) a diminuição do tamanho dos poros pelo empacotamento de partículas, ou seja, pela contribuição do efeito físico (LOTHENBACH et al., 2008; RAMEZANIANPOUR; HOOTON, 2014; TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010); b) a nucleação heterogênea que pode levar a um aumento na resistência à compressão nas idades iniciais (KRISHNAN et al., 2018; MEDJIGBODO et al., 2018).

Assim, para o FC50, a reatividade do FC parece estar atrelada ao desenvolvimento de resistências à compressão, com mais intensidade, até os 28 dias de idade tendo em vista a reduzida evolução aos 91 dias (8,8%).

Observa-se que a evolução alcançada pelo FC50 (91,2%), aos 28 dias, foi muito próxima ao REF (92,8%). A explicação para o desenvolvimento mais intenso da resistência à compressão, do FC50, aos 28 dias em relação ao REF, pode estar relacionada ao elevado teor de FC na matriz cimentícia, atrelado à alta finura BET, quase 5 vezes mais alta que a do CP, ao índice de atividade pozolânica (92,4% - FC e 92% - CV) o que colabora para a aceleração das reações resultando em um ganho de resistência à compressão em idades precoces (TAYLOR, 1997).

Em relação a evolução da resistência à compressão nos traços com 60% de FC observou-se um maior crescimento, aos 28 dias, no FC60 (85,7%), comparado ao FC60CH10 (79,2%). O menor percentual do FC60CH10 pode estar relacionado a presença da CH.

Neste caso, a alta superfície específica (BET) da CH e do FC pode ter acarretado uma aglomeração na mistura, dificultando o contato da água com estas partículas e diminuindo, portanto, a evolução da resistência à compressão nesta idade. Conforme Perlot et al. (2013),

em concretos com baixo fator a/ag (0,25 no caso do presente trabalho) esta situação pode ser intensificada.

Com relação ao FC70CV10 pode-se dizer que a evolução da resistência à compressão foi “*dividida*”, praticamente ao meio, ou seja, 54% aos 28 dias e 46% aos 91 dias. Aos 28 dias ocorreu o predomínio da formação de Carboaluminatos em relação aos Aluminatos do CP (C_3A) (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017). Por outro lado, aos 91 dias, ocorreu o predomínio da formação de Carboaluminatos em relação aos Aluminatos da CV (DESCHENER et al., 2012; DE WEERDT et al., 2011).

Quanto ao FC70CV10CH10 constatou-se uma maior evolução da resistência à compressão aos 28 dias (72%) proveniente da formação de Carboaluminatos em relação aos Aluminatos do CP (C_3A) e da CV devido a ação da CH (HOPPE FILHO, 2008).

Por outro lado, a menor evolução, aos 91 dias (28%), está relacionada com o aumento no teor de Carbonatos que elevou a porosidade da matriz cimentícia e diminuiu o crescimento da resistência à compressão (COURARD et al., 2018).

5.1.3 Intensidade de clínquer

Conforme apresentado no Item 4.4.1.1, a Tabela 5.3 mostra os resultados da intensidade de clínquer ($I_{cq} - kg_{cq}.m^{-3}.MPa^{-1}$) para os traços estudados.

Tabela 5.3 – Intensidade de clínquer (I_{cq}) aos 28 e 91 dias

Traços	Resistência à compressão (MPa)		$kg_{cq}.m^{-3}$	$I_{cq} (kg_{cq}.m^{-3}.MPa^{-1})$	
	28 dias	91 dias		28 dias	91 dias
REF	118,1	127,2	382	3,23	3,00
FC50	80,1	87,8	214	2,67	2,44
FC60*	56,3	65,7	173	3,07	2,63
FC60CH10	70,2	88,6	173	2,46	1,95
FC70CV10*	28,0	51,8	87	3,11	1,68
FC70CV10CH10	31,3	43,5	87	2,78	2,00

* A intensidade de clínquer do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na I_{cq} é estabelecida uma relação entre a quantidade de aglomerante (kg clínquer) necessária para a obtenção de uma unidade de resistência à compressão (MPa). Desta forma, quanto menor o valor da I_{cq} melhor será o desempenho do traço estudado, pois será necessária uma quantidade menor de aglomerante (kg clínquer) para a unidade de resistência à compressão (MPa).

5.1.3.1 Análise e discussão dos resultados da intensidade de clínquer aos 28 dias

Na Tabela 5.3 é possível observar que todos os traços com AM apresentaram uma I_{cq} menor do que o REF. A explicação para o bom desempenho dos traços com AM está relacionada a redução do consumo de clínquer (*diminuição da I_{cq}*) propiciada pelo baixo fator a/ag (0,25). A partir da redução do fator a/ag ($< 0,4$) uma parcela do CP permanece sem hidratação, pois não há espaço para alojar os compostos Hidratados, especialmente a Portlandita, desta forma o CP pode ser substituído por partículas mais econômicas como o FC (BENTZ, 2006; BONAVETTI et al., 2003). Com isso, à medida que o fator a/ag diminui a resistência à compressão aumenta levando a uma diminuição da I_{cq} .

Pode-se observar que, aos 28 dias de idade, os dois traços com CH (*FC60CH10 e FC70CV10CH10*) juntamente com o FC50 apresentaram os menores valores para a I_{cq} , abaixo de $3 \text{ kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, valor este considerado bastante adequado, pela literatura, nesta idade de controle, conforme será demonstrado no Item 5.1.3.3. No caso dos traços FC50 e FC60CH10 o bom desempenho no quesito resistência à compressão (*80,1 e 70,2 MPa respectivamente*) contribuiu para os baixos valores de I_{cq} encontrados (*2,67 e 2,46 $\text{kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ respectivamente*). No caso do FC70CV10CH10, o baixo consumo de clínquer (*87 $\text{kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3}$*) foi determinante para os $2,78 \text{ kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ de I_{cq} alcançado pelo traço.

Em relação aos traços REF, FC60 e FC70CV10, os valores encontrados para a I_{cq} , um pouco superior a $3 \text{ kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, também podem ser considerados adequados, todavia demonstram que os mesmos não apresentaram um desempenho, neste quesito, similar as demais misturas.

5.1.3.2 Análise e discussão dos resultados da intensidade de clínquer aos 91 dias

A Tabela 5.3 apresenta os valores para a I_{cq} aos 91 dias de idade. Em relação a evolução da I_{cq} dos 28 para os 91 dias, pode-se observar uma redução no valor referente a cada traço. Este comportamento ocorre devido a quantidade de clínquer ($\text{kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3}$) ser constante em relação a idade, desta maneira o numerador da equação não muda. A variação ocorre no denominador (*resistência à compressão – MPa*) que aumenta com o tempo, logo a I_{cq} diminui com o tempo, também.

Observou-se uma tendência no comportamento na I_{cq} aos 91 dias de idade, ou seja, a medida que o teor de FC (%) aumentou nas misturas, os valores da I_{cq} tenderam a diminuir. Este comportamento está relacionado a diminuição da quantidade de aglomerante (*clínquer*) à

medida que o teor de FC aumenta. Considerando que as resistências à compressão dos traços estudados aumentaram dos 28 para os 91 dias de idade, observou-se uma tendência de diminuição da I_{cq} com o aumento no teor de FC.

Um aspecto a ser colocado, refere-se ao aumento da diferença na I_{cq} em relação aos traços com 60 e 70% de FC dos 28 para os 91 dias de idade. No caso dos traços com 60% de FC, a diferença entre ambos foi de 24,8% aos 28 dias e de 34,9% aos 91 dias. Em relação aos traços com 70% de FC, a diferença foi de 11,9% e 19% no mesmo período, respectivamente.

Este aumento na diferença está relacionado ao crescimento da resistência à compressão observada no FC60CH10 e FC70CV10 nas duas idades de controle. No FC60CH10, o crescimento ocorreu devido a presença da CH que disponibilizou uma maior quantidade de Aluminatos para a reação de formação de Carboaluminatos. No FC70CV10 ocorreu o mesmo mecanismo, todavia o responsável pela disponibilização dos Aluminatos foi a CV.

Cabe destaque para o FC70CV10 tendo em vista que a I_{cq} reduziu 46% entre os 28 e os 91 dias de idade diminuindo de 3,11 para 1,68 $kg_{cq}.m^{-3}.MPa^{-1}$, devido a um aumento relevante na resistência à compressão passando de 28 para 51,8 MPa entre as duas idades de controle, ou seja, um incremento de 85%, resultando na menor I_{cq} ($1,68 kg_{cq}.m^{-3}.MPa^{-1}$) obtida no presente trabalho e, frente aos números da literatura, encontra-se entre as mais baixas.

5.1.3.3 Análise e discussão dos resultados da intensidade de ligantes

Conforme apresentado no Item 4.4.1.1, Damineli (2013) propôs a criação de um índice que pudesse representar o consumo de materiais aglomerantes realizando a correlação com a resistência à compressão do concreto, denominando este indicador de eficiência ambiental do CP de “*Intensidade de Ligantes (IL - $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$)*”. O índice correlaciona o consumo total de ligantes em $kg.m^{-3}$, com a resistência à compressão em MPa, aos 28 dias de idade. O autor elaborou um estudo no qual calculou a IL em 156 trabalhos publicados no âmbito nacional, internacional e de mercado.

No cálculo da IL não foi computado as substituições por FC tendo em vista o material ser considerado inerte do ponto de vista da reatividade. No caso do CP foi considerada uma reatividade (k) igual a 1 e para as demais AM o valor foi proporcional à reatividade do material (CV e CH 0,6) (HABERT, 2012). Com base na IL proposta por Damineli (2013), este trabalho adotou uma releitura do índice o qual foi denominado de “*Intensidade de Clínquer ($I_{cq} - kg_{cq}.m^{-3}.MPa^{-1}$)*”.

Neste item os valores de I_{cq} , foram convertidos para IL com o intuito de realizar uma comparação entre os valores apresentados por Daminieli (2013) e demais exemplos da literatura. Primeiramente, foram apresentados os valores mais relevantes do trabalho de Daminieli (2013) e da literatura, e num segundo momento, foram comparados com a I_{cq} convertida para IL, conforme apresentado na Tabela 5.4 e Figura 5.3. Num terceiro momento foi realizada uma análise comparativa entre os valores apresentados.

Tabela 5.4 – Determinação da IL conforme metodologia de Daminieli (2013)

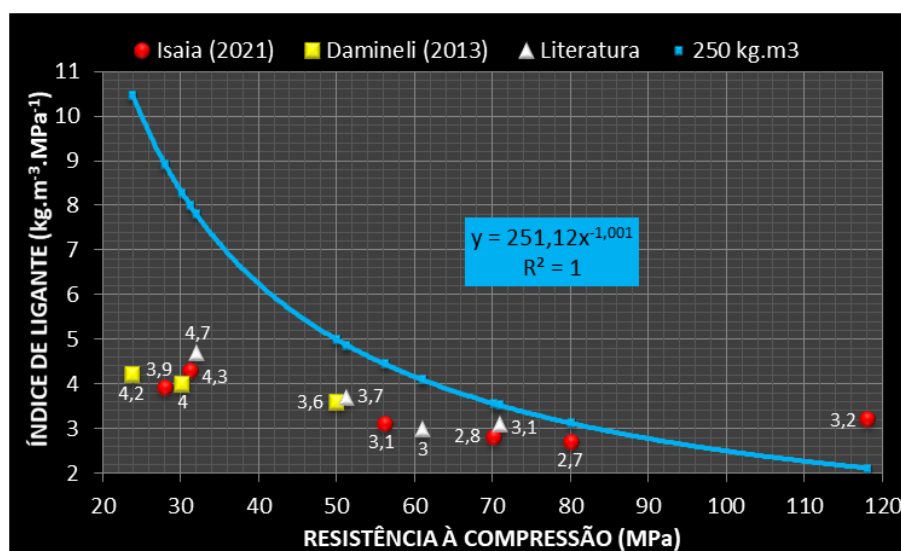
Traços	Teor de clínquer ($kg.m^{-3}$)	Demais ligantes ($kg.m^{-3}$) . k	Total de ligantes ($kg.m^{-3}$)	f_{c28} (MPa)	IL ($kg.m^{-3}.MPa^{-1}$)
REF	382	-	382	118,1	3,2
FC50	214	-	214	80,1	2,7
FC60*	173	-	173	56,3	3,1
FC60CH10	173	25 (CH)	198	70,2	2,8
FC70CV10*	87	22 (CV)	109	28,0	3,9
FC70CV10CH10	87	22 (CV) 25 (CH)	134	31,3	4,3

$k(CP) = 1 / k(FC) = 0 / k(CV) = 0,6 / k(CH) = 0,6$ (HABERT, 2012)

* A intensidade de clínquer do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 5.3 – Intensidade de ligante x resistência à compressão (comparativo)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

No estudo de Daminieli (2013) observou-se que o valor mínimo da IL foi de $5 kg.m^{-3}.MPa^{-1}$ para concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa. Para resistências à compressão inferiores a 50 MPa o valor da IL foi maior que $5 kg.m^{-3}.MPa^{-1}$. Posteriormente, Scrivener et al. (2018) ampliaram o estudo propondo novos parâmetros para a IL. Para

concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa a IL mínima seria de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$; para 30 MPa a IL seria de $8 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$; enquanto a média global para todas as resistências seria de $12 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$.

Damineli (2013) apresenta em seu trabalho um concreto de ultra alto desempenho (*Ductal*) obtido através do uso de empacotamento sob alta pressão, cura térmica e agregados diferenciados com um consumo de ligantes de $1.194,5 \text{ kg.m}^{-3}$ e resistência à compressão de 800 MPa, resultando em uma IL de $1,49 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ (CHEYREZY et al., 1995; VERNET, 2004). O valor da IL é relevante, todavia o concreto não pode ser considerado convencional.

Entre os concretos convencionais Damineli (2013) destaca os seguintes exemplos como sendo os mais eficientes encontrados na literatura: a) 100 kg.m^{-3} de clínquer com 23,9 MPa (*IL de $4,2 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*); b) 100 kg.m^{-3} de clínquer mais 20 kg.m^{-3} de Sílica Ativa (SA) com 30,2 MPa (*IL de $4 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*); c) 150 kg.m^{-3} de clínquer mais 30 a 45 kg.m^{-3} de SA com 50 a 56 MPa (*IL de $3,6 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (VOGT, 2010).

Em outros trabalhos publicados na literatura, no mesmo período de Damineli (2013), ou em datas posteriores foram encontrados os seguintes exemplos com IL inferior a $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$: a) 150 kg.m^{-3} de ligantes com 32 MPa (*IL de $4,7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (UYSAL et al., 2012); b) 180 kg.m^{-3} de ligantes com 61 MPa (*IL de $3 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (WONGKEO et al., 2014); c) 220 kg.m^{-3} de ligantes com 71 MPa (*IL de $3,1 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (ANJOS et al., 2015); d) 188 kg.m^{-3} de ligantes com 51,3 MPa (*IL de $3,7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (REBMANN, 2016).

Nota-se que o FC50 e o FC60CH10 com IL de 2,7 e 2,8 $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, respectivamente, apresentaram o menor valor encontrado quando comparados com os dados apresentados por Damineli (2013) e demais exemplos da literatura (WONGKEO et al., 2014) – ($3 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$). Desta forma, a IL do FC50 e FC60CH10 apresentam-se como uma das menores encontradas na literatura, demonstrando o bom desempenho dos concretos com elevados teores de FC frente a redução do teor de ligantes.

Neste sentido, Damineli (2013) coloca que somente 2,2% dos dados analisados em seu estudo foram referentes a concretos com consumo de ligantes inferior a 250 kg.m^{-3} , indicando a dificuldade da elaboração de misturas abaixo deste valor com IL inferior a $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$. Em relação a este aspecto foi possível verificar que todos os traços do presente trabalho, a exceção do REF, apresentaram IL abaixo de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ e consumo de ligante inferior a 250 kg.m^{-3} .

Continuando, uma IL abaixo de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ocorre em concretos com resistência à compressão acima dos 50 MPa. Para resistências abaixo dos 50 MPa o consumo de ligantes mínimo é de 250 kg.m^{-3} . A NBR 12655 (ABNT, 2015a) define para concretos convencionais

um consumo mínimo de CP de 260 kg.m^{-3} , em relação à classe de agressividade I, classificada como fraca pela NBR 6118 (ABNT, 2014c).

Para este valor o concreto deverá apresentar uma resistência à compressão mínima de 20 MPa no caso de elementos estruturais. No presente trabalho, a exceção do REF, todos os traços apresentaram um consumo de ligantes inferior ao prescrito pela norma com resistências superiores a exigida pela mesma.

Damineli (2013) discorre que uma das causas para concretos com resistência à compressão abaixo de 50 MPa possuírem IL acima de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ está relacionada a uma necessidade mínima de finos com o intuito de garantir uma reologia adequada, bem como propiciar uma boa aderência entre aço e concreto (HABERT; ROUSSEL, 2009; WASSERMANN et al., 2009). Neste sentido, no presente trabalho, foi Elaborada o FC70CV10 com 109 kg.m^{-3} de consumo de ligantes, 28 MPa e IL de $3,9 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}$. O autor coloca ainda que a diminuição da IL abaixo de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ para concretos com resistência à compressão inferior a 50 MPa está relacionada com o entendimento de que é possível utilizar-se outros finos no concreto do que somente o CP. Esta colocação visa à obtenção de uma reologia adequada.

Assim, devido às restrições colocadas, concretos com resistência à compressão mais elevadas (*acima de 50 MPa*) tendem a ser mais eficientes no que se refere a IL (*abaixo de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$*) (HABERT; ROUSSEL, 2009; MULLER; HARNISH, 2008). Neste sentido, no presente trabalho, os concretos foram Elaboradas com altos teores de FC (*área BET de $8.220 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$*) e abatimento de 100+20 mm.

A IL dos concretos, apresentados no presente trabalho, estão no mesmo patamar dos mostrados por Damineli (2013) e demais exemplos encontrados na literatura. Entre os motivos para o bom desempenho pode-se citar: a) diminuição do tamanho dos poros pelo empacotamento de partículas, ou seja, pela contribuição do efeito físico (LOTHENBACH et al., 2008; RAMEZANIANPOUR; HOOTON, 2014; TSIVILIS; ASPROGERASKAS, 2010); b) o baixo fator a/ag que consiste no principal parâmetro para concretos com altos teores de FC (PALM et al., 2016).

De modo geral, pode-se dizer que a estratégia de elaboração de concretos através do empacotamento de partículas e reduzido fator a/ag tende a apresentar um melhor desempenho em relação a IL quando comparada aos concretos produzidos pela metodologia tradicional. Sendo assim, esta estratégia contribui para a obtenção de concretos com maior sustentabilidade, tendo em vista que a produção de CP possui um papel de destaque na emissão de GEE's.

5.1.4 Resistência à compressão unitária

Conforme apresentado no Item 4.4.1.2, a Tabela 5.5 mostra os resultados da resistência à compressão unitária ($f_{c_{unit}} - MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$) para cada uma dos traços estudados.

Tabela 5.5 – Resistência à compressão unitária ($f_{c_{unit}}$) aos 28 e 91 dias

Traços	Resistência à compressão (MPa)		$kg_{cq}.m^{-3}$	$f_{c_{unit}} (MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3})$	
	28 dias	91 dias		28 dias	91 dias
REF	118,1	127,2	382	0,31	0,33
FC50	80,1	87,8	214	0,38	0,41
FC60*	56,3	65,7	173	0,33	0,38
FC60CH10	70,2	88,6	173	0,41	0,51
FC70CV10*	28	51,8	87	0,32	0,60
FC70CV10CH10	31,3	43,5	87	0,36	0,50

* A resistência à compressão unitária do FC60 e FC60P, bem como do FC70CV10 e FC70CV10P, são iguais

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

5.1.4.1 Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão unitária aos 28 dias

A Tabela 5.5 apresenta os valores para a $f_{c_{unit}}$ aos 28 dias de idade, observa-se que todos os traços com AM apresentaram uma $f_{c_{unit}}$ maior que o REF. Este comportamento ocorre porque na $f_{c_{unit}}$ os efeitos físicos, químicos e sinérgicos (*misturas ternárias e quaternária*) são realçados indicando que, proporcionalmente à quantidade de clínquer, a resistência é maior com altos teores de FC na mistura.

Assim, o desenvolvimento da $f_{c_{unit}}$ pode ter ocorrido por meio do “efeito filer”, ou seja, o FC interferiu nas reações de hidratação do CP por meio do potencial elétrico superficial, potencial zeta (BERODIER; SCRIVENER, 2015; SCRIVENER et al., 2015). Destaca-se o desempenho do FC70CV10 com uma $f_{c_{unit}}$ de $0,32 MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$, 3% abaixo do FC60 com uma $f_{c_{unit}}$ de $0,33 MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$. É importante lembrar que o FC70CV10 possui a metade do teor de clínquer do FC60 e, mesmo assim, a diferença da $f_{c_{unit}}$ foi muito pequena. O bom desempenho do traço pode ser atribuído, em parte, ao efeito sinérgico entre o FC e CV.

Neste caso, os Óxidos de Alumínio trazidos pela CV contribuem com Aluminatos adicionais para a reação pozolânica, amplificando o efeito de interação com o FC na produção de Carboaluminatos, contribuindo assim para uma redução na porosidade do concreto e consequentemente um incremento de resistência à compressão unitária (DESCHENER et al., 2012; DE WEERDT et al., 2011). Considerando que, aos 28 dias de idade, a CV não

desenvolveu, na plenitude, sua contribuição para a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014), pode-se dizer que, em baixos fatores a/ag (0,25), a contribuição do efeito físico da CV tende a ser mais relevante do que a reação pozolânica (MINDESS et al., 2003).

Destacam-se, também, os valores da $f_{c_{unit}}$ para os traços com adição de CH, com 0,41 e 0,36 $MPa.kg_{c_{cq}}^{-1}.m^{-3}$ para o FC60CH10 e FC70CV10CH10, respectivamente. Neste caso, os motivos para o bom desempenho dos traços são distintos. Para o traço com 60% de FC destaca-se a adição de CH que contribuiu para o crescimento da resistência à compressão (70,2 MPa) aos 28 dias de idade. Quanto ao traço com 70% de FC destaca-se o baixo consumo de clínquer ($87 kg.m^{-3}$) e a presença de CV e CH que contribuíram para a elevação da $f_{c_{unit}}$.

Conforme Su e Miao (2003), uma $f_{c_{unit}}$ entre 0,11 e 0,14 $MPa.kg^{-1}$ é indicada para concretos de média resistência e baixo teor de CP, já para Yu et al. (2015) valores entre 0,16 e 0,19 $MPa.kg^{-1}$ caracterizam concretos de alta performance (*eco amigáveis*). No caso do presente trabalho a média de todos os traços para a $f_{c_{unit}}$ foi de 0,35 $MPa.kg_{c_{cq}}^{-1}.m^{-3}$ ou 84,2% maior que o limite superior proposto por Yu et al. (2015).

Sendo assim, de maneira geral, pode-se dizer que os traços estudados tiveram um bom desempenho em relação à $f_{c_{unit}}$, sendo que os valores encontrados situaram-se acima dos intervalos propostos pelos autores citados.

5.1.4.2 Análise e discussão dos resultados da resistência à compressão unitária aos 91 dias

A Tabela 5.5 apresenta os valores para a $f_{c_{unit}}$ aos 91 dias de idade. Em relação a evolução da $f_{c_{unit}}$ dos 28 para os 91 dias observa-se um aumento no valor de cada traço, devido a quantidade de clínquer ($kg_{c_{cq}}.m^{-3}$) ser constante em relação a idade, assim o denominador da equação não muda. A variação ocorre no numerador (*resistência à compressão – MPa*) que aumenta com o tempo, logo a $f_{c_{unit}}$ aumenta com o tempo também.

Em relação ao REF, FC50 e FC60, o aumento da $f_{c_{unit}}$ no período foi pequena com um incremento médio de 9,8%. Este comportamento deve-se ao fato da evolução da resistência à compressão ter sido pequena nos traços citados com um crescimento médio de 10,1%. Com isso, a evolução da $f_{c_{unit}}$ foi impactada proporcionalmente aos valores médios mencionados. Assim, para estes traços, não ocorreram modificações relevantes no comportamento da $f_{c_{unit}}$ em relação ao abordado no item anterior, tendo em vista o pequeno aumento médio ocorrido no período.

Em relação aos demais traços, constata-se que os maiores incrementos na $f_{c_{unit}}$ ocorreram na seguinte ordem, em $MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$: FC70CV10 0,60, FC60CH10 0,51 e FC70CV10CH10 0,5. O FC70CV10 obteve um aumento da $f_{c_{unit}}$ relevante no período com um aumento de 87,5%.

Este comportamento deve-se ao fato da evolução da resistência à compressão, no período, ter sido relevante para o traço citado com um crescimento de 85%, com isso a evolução da $f_{c_{unit}}$ foi impactada proporcionalmente aos valores mencionados.

A evolução da resistência à compressão do FC70CV10 já foi discutida anteriormente, todavia cabe destacar o desempenho do traço frente a $f_{c_{unit}}$, salientando que, a partir de uma resistência à compressão, aos 91 dias, de 51,8 MPa e um consumo de clínquer de $87 kg_{cq}.m^{-3}$, obteve-se uma $f_{c_{unit}}$ de $0,6 MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$. Este valor constitui-se no maior obtido no presente trabalho.

O bom desempenho do FC70CV10, além dos motivos já apresentados, está relacionado a presença da CV. Conforme Isaia et al. (2003) a $f_{c_{unit}}$ aumenta consideravelmente com a presença desta pozolana nas misturas de concreto explicando o desempenho do FC70CV10, o qual ocorreu pela ação híbrida, combinada e sinérgica entre o “efeito de hidratação” do CP, o “efeito pozolânico” da CV e, principalmente, o “efeito físico” do FC.

Ocorreu também um aumento relevante na $f_{c_{unit}}$ dos traços com adição de CH, com um incremento médio no período de 31,6%. No caso do FC60CH10, a adição de CH contribuiu para o bom desempenho do traço frente a $f_{c_{unit}}$, já no caso do FC70CV10CH10 o maior responsável pelo bom desempenho foi o baixo teor de clínquer ($87 kg.m^{-3}$) na mistura.

No período a média de todos os traços para a $f_{c_{unit}}$ foi de $0,46 MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$, acima dos valores propostos por Su e Miao (2003) e Yu et al. (2015). Em relação ao FC70CV10, o valor da $f_{c_{unit}}$ ($0,60 MPa.kg_{cq}^{-1}.m^{-3}$) foi mais de 3 vezes o limite superior proposto por Yu et al. (2015) o que configura um concreto “eco amigável de alta performance”.

5.1.5 Análise estatística integrada da resistência à compressão aos 28 e 91 dias

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 é possível observar análise estatística integrada dos resultados da resistência à compressão, evolução da resistência à compressão, intensidade de clínquer, intensidade de ligante e resistência à compressão unitária nas idades de 28 e 91 dias.

É possível observar que o valor de “F” foi relevantemente superior ao “ $F_{crítico}$ ” (2,77) indicando que as variáveis em questão possuem uma influência significativa nos resultados do

ponto de vista estatístico. Ou seja, as alterações na quantidade de CP, CH, tipo e teor das AM (*FC e CV*) geraram variações significativas nas variáveis estudadas tanto aos 28 como aos 91 dias de idade.

Tabela 5.6 – ANOVA análise estatística integrada da resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F _{crítico}	R ²
Resistência à compressão	22.578,81	5	4.515,76	1.459,61	8,12.10 ⁻²³	2,77	0,99
Intensidade de ligante	7,95	5	1,59	265,1	3,37.10 ⁻¹⁶	2,77	0,99
Intensidade de clínquer	1,75	5	0,35	82,75	8,86.10 ⁻¹²	2,77	0,96
Resistência à compressão unitária	2,72.10 ⁻²	5	5,44.10 ⁻³	66,44	5,75.10 ⁻¹¹	2,77	0,95
Evolução da resistência à compressão	4.228,74	5	845,75	58,51	1,68.10 ⁻¹⁰	2,77	0,94

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.7 – ANOVA análise estatística integrada da resistência à compressão aos 91 dias

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F _{crítico}	R ²
Resistência à compressão	18.453,27	5	3.690,66	451,57	2,96.10 ⁻¹⁸	2,77	0,99
Intensidade de clínquer	4,52	5	0,9	153,33	4,21.10 ⁻¹⁴	2,77	0,98
Resistência à compressão unitária	0,18	5	3,55.10 ⁻²	119,39	3,74.10 ⁻¹³	2,77	0,95

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Pode-se observar que a variável que possuiu a influência mais relevante foi a resistência à compressão aos 28 dias, logo a seguir encontra-se a resistência à compressão aos 91 dias, seguida da intensidade de ligante, intensidade de clínquer aos 91 dias, resistência à compressão unitária aos 91 dias, intensidade de clínquer aos 28 dias, resistência à compressão unitária aos 28 dias e evolução da resistência à compressão. Nota-se que quanto maior o valor de “*F*”, menor o “*Valor-P*” e mais próximo de 1 encontra-se o coeficiente de determinação R².

Para a resistência à compressão aos 28 dias o valor de “*F*” foi 1.459,61 (*maior valor de “F”*), o “*Valor-P*” foi 8,12.10⁻²³ (*menor “Valor-P”*) e R² foi 0,99 (*maior valor de R²*). Já

em relação à evolução da resistência à compressão o valor de “ F ” foi 58,51 (*menor valor de “ F ”*), o “*Valor- P* ” foi $3,74 \cdot 10^{-13}$ (*maior “ P ”*) e R^2 foi 0,95 (*menor valor de R^2*).

Com base nestes dados é possível perceber que, apesar do valor de “ F ” ter sido superior ao “ $F_{crítico}$ ” em todas as variáveis, a significância foi maior na resistência à compressão aos 28 dias quando comparada com a evolução da resistência à compressão, por exemplo. Neste caso, pode-se dizer que as variações na quantidade de CP, CH, tipo e teor das AM (*FC e CV*) geraram um impacto maior na resistência à compressão aos 28 dias quando comparado com a evolução da resistência à compressão.

5.2 CARBONATAÇÃO ACELERADA

No presente item são apresentados os resultados da profundidade carbonatada, do coeficiente de carbonatação (*kc*) e da vida útil estimada, para os 8 traços estudados. Também é realizada a análise e discussão dos resultados.

5.2.1 Determinação da profundidade carbonatada

A Tabela 5.8 apresenta os resultados médios das profundidades carbonatadas.

Tabela 5.8 – Profundidade média de carbonatação acelerada

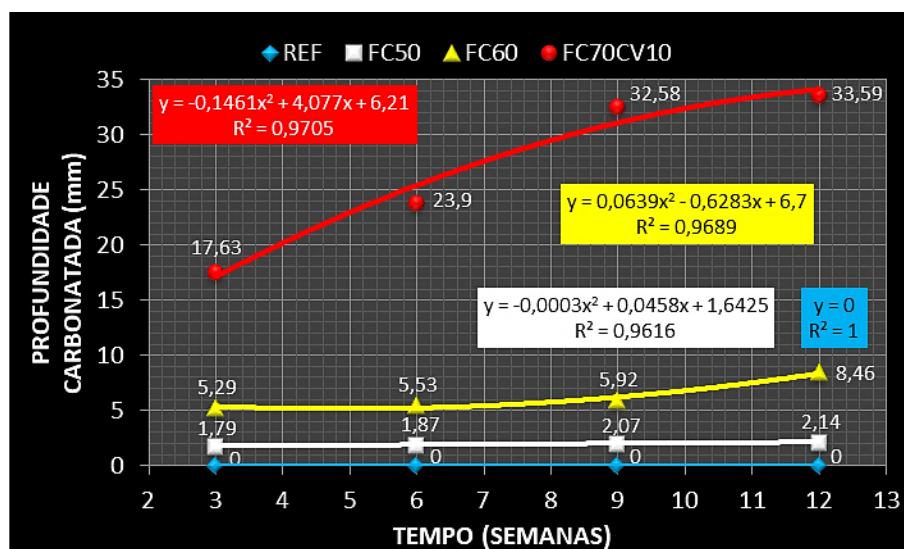
Traço	Resistência à compressão (MPa)		a/ag	Profundidades (mm)			
	28 dias	91 dias		Semanas			
				3	6	9	12
REF	118,1	127,2	0,25	0	0	0	0
FC50	80,1	87,8	0,25	1,79	1,87	2,07	2,14
FC60	56,3	65,7	0,25	5,29	5,53	5,92	8,46
FC60P	56,3	65,7	0,25	0	0	0	0
FC60CH10	70,2	88,6	0,25	0,95	1,14	1,44	1,50
FC70CV10	28,0	51,8	0,25	17,63	23,90	32,58	33,59
FC70CV10P	28,0	51,8	0,25	1,14	1,48	1,59	1,60
FC70CV10CH10	31,3	43,5	0,25	7,06	11,02	11,83	13,85

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na Tabela 5.8, cada resultado apresentado representa, pelo menos, 200 valores de profundidade calculados pelo analisador de imagens, tratados estatisticamente e com descarte dos coeficiente de variação $\geq 30\%$. Com os dados da Tabela 5.8 foram elaboradas as Figuras 5.4 e 5.5 que mostram o avanço da profundidade carbonatada com o tempo, bem

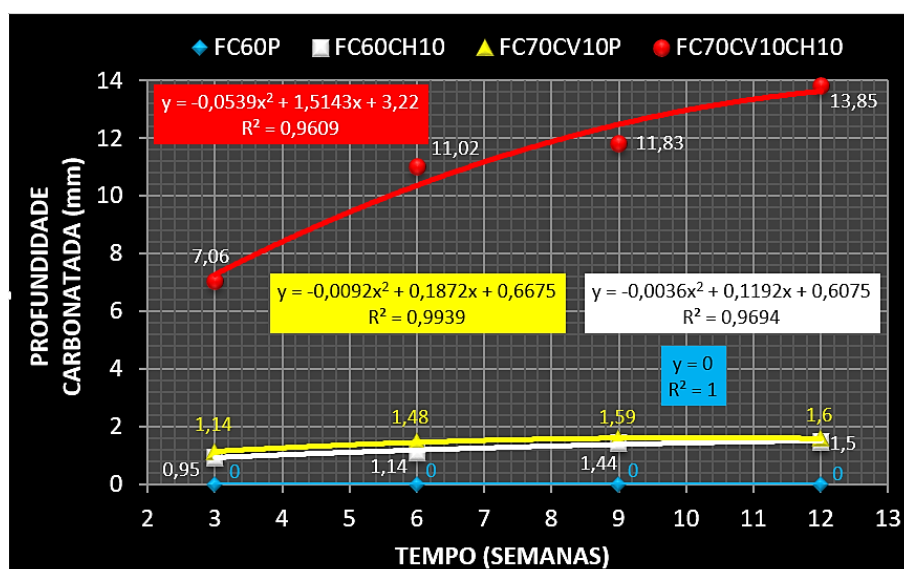
como a variação da profundidade entre períodos de medição para cada um dos traços estudados.

Figura 5.4 – Profundidade carbonatada x tempo em semanas (*REF*, *FC50*, *FC60* e *FC70CV10*)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 5.5 – Profundidade carbonatada x tempo em semanas (*FC60P/FC60CH10/FC70CV10P/FC70CV10CH10*)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Para Wesche (1991) o processo de carbonatação possui a tendência de estabilização com o tempo, desta forma a função que mostra a convergência dos pontos relacionados as

profundidades de carbonatação possui um viés assintótico. Para demonstrar este comportamento foram elaboradas as Figuras 5.4 e 5.5 com o intuito de realizar um ajuste polinomial de segundo grau em relação as profundidades carbonatadas e o tempo, a fim de visualizar a tendência das parábolas. Assim as equações possuem o formato (*equação 5.1*):

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (\text{equação 5.1})$$

Neste caso o termo “*a*” possui a função de determinar a curvatura da parábola, indicando através do seu sinal (+ ou -) se a mesma é crescente ou decrescente. Desta maneira é possível prever o comportamento assintótico da curva. Corroborando este conceito Benítez et al. (2019) colocam que, em função do tempo, a taxa de carbonatação progride de maneira assintótica a zero, tendo em vista a redução gradativa da difusão do CO₂.

5.2.1.1 Profundidade carbonatada REF

Conforme a Tabela 5.8, o REF não apresentou carbonatação no período estudado devido a quantidade e características dos materiais constituintes, em especial o teor de CP. Conforme Ribeiro et al. (2018) e Saviija e Lukovic (2016), quanto maior o teor de CP em um traço de concreto, menor será a profundidade carbonatada, tendo em vista o elevado teor de Portlandita formado. Assim, a presença da Portlandita, em teores elevados, conduz a um amortecimento do processo de carbonatação fazendo com que o mesmo seja menos intenso.

Desta maneira, para teores mais elevados de Portlandita na pasta cimentícia, menor será o desenvolvimento da profundidade carbonatada. Para Phung et al. (2015) a carbonatação do CSH diminui de maneira relevante em pastas com altos teores de Portlandita. Com isso, pode-se afirmar que a profundidade carbonatada é uma função do teor de Portlandita na matriz cimentícia antes do início do processo de carbonatação (PRABAKAR et al., 2016).

Pode-se justificar o comportamento do REF frente a profundidade de carbonatação a partir do teor de CP contido na mistura (424 kg.m^{-3}) e do baixo fator a/ag usado (0,25), resultando em uma elevação da resistência à compressão (127,2 MPa aos 91 dias) que contribuiu para a formação de uma microestrutura com baixa porosidade para a percolação do CO₂.

Neste caso pode-se notar que resistências à compressão mais elevadas contribuem para um aumento na compacidade do concreto a qual se reflete na diminuição da profundidade carbonatada. Tendo em vista que o processo de carbonatação está relacionado

com a difusibilidade do CO₂ na pasta cimentícia e esta característica relaciona-se diretamente com a compacidade do material, é natural que concretos com maior resistência estejam sujeitos a menor influência da penetração do CO₂.

Para Baroghel-Bouny e Larrard (2000) o processo de carbonatação não é observado em concretos de alta resistência ($CAR \geq 50 \text{ MPa}$) como o caso do REF (127,2 MPa), ou seja, com o aumento da resistência à compressão ocorre uma diminuição da profundidade carbonatada. Atis (2003) corrobora as afirmações feitas e completa dizendo que há uma relação inversamente proporcional entre resistência à compressão e profundidade carbonatada. Isaia (1995) afirma que a principal causa da diminuição da profundidade carbonatada em CAR, diz respeito a compacidade das misturas. Sendo que o aumento da compacidade e a desconectividade dos poros constituem nos fatores mais importantes para a redução da carbonatação e não necessariamente a redução do fator a/ag.

Com isso pode-se dizer que o REF, devido ao seu elevado teor de CP, baixo fator a/ag e alta resistência à compressão, reuniu as características necessárias para propiciar que a profundidade de carbonatação fosse nula no período estudado.

5.2.1.2 Profundidade carbonatada FC50

Conforme a Tabela 5.9 o FC50 apresentou uma reduzida profundidade carbonatada no período estudado. Em 12 semanas foi observada uma profundidade carbonatada de 2,14 mm indicando um excelente desempenho. Conforme demonstrado no Item 4.4.2, uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, assim pode-se dizer que o FC50 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 10,7% da espessura do cobrimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

Tabela 5.9 – Profundidade carbonatada FC50

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ
Profundidade carbonatada	mm	1,79	0,08	1,87	0,2	2,07	0,07	2,14	
	%	83,64	4,47	87,38	10,7	96,73	3,38	100	

(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Observa-se na Tabela 5.9 que a maior parte da profundidade carbonatada (83,64%) ocorreu até a 3^o semana. A partir dela o processo de crescimento da profundidade de carbonatação continua de maneira menos intensa. Na transição da 9^o para a 12^o semana

pode-se observar uma desaceleração na profundidade carbonatada com uma variação de 3,38% frente a 10,7% ocorrido entre a 6ª e a 9ª semana.

A desaceleração do processo de carbonatação ocorre no momento que os Carbonatos formados (*primários e secundários*) colmatam os poros o que diminui a difusão do CO₂ na rede de poros. Assim, pode-se dizer que um “efeito colateral” da carbonatação constitui na diminuição da difusibilidade do CO₂ na matriz cimentícia. Na mesma linha Hussain et al. (2017) colocam que a percolação do CO₂ não ocorre de maneira linear devido à falta de homogeneidade na estrutura dos poros, bem como pelo aumento da densidade na zona carbonatada, tornando, desta forma, a difusão do CO₂ mais difícil.

O processo de desaceleração está relacionado, entre outros fatores, com a deposição de uma camada de Carbonato de Cálcio na superfície dos cristais de Portlandita (CIZER et al., 2012). Este processo resulta em um preenchimento dos poros da pasta cimentícia devido ao volume molar do Carbonato de Cálcio (22,4 mols/L) ser maior que a Portlandita (5,4 mols/L) (BAROGHEL-BOUNY et al., 2014; MORANDEAU et al., 2014).

Um dos motivos que podem ter levado as reduzidas profundidades de carbonatação do FC50, bem como a desaceleração do processo a partir da 9ª semana está relacionada à superfície específica do FC, ou seja, as dimensões reduzidas dos grãos propiciaram uma colmatção da rede de poros através do efeito filer, resultando em resistência à compressão mais elevada (87,8 MPa aos 91 dias) ocasionando desconectividade nos poros e dificultando a difusão do CO₂.

5.2.1.3 Profundidade carbonatada FC60

Na Tabela 5.10 o FC60 apresenta pequena profundidade carbonatada tendo em vista que, em 12 semanas, foi observado um valor de 8,46 mm. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, pode-se dizer que o FC60 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 42,3% da espessura do cobrimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

A Tabela 5.10 mostra que a maior parte da profundidade carbonatada (62,53%) ocorreu até a 3ª semana, a partir dela o crescimento continuou de maneira menos intensa. Na transição da 9ª para a 12ª semana houve forte aceleração com uma variação de 42,91% frente a 7,05% ocorrido entre a 6ª e a 9ª semana.

Tabela 5.10 – Profundidade carbonatada FC60

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ
Profundidade carbonatada	mm	5,29	0,24	5,53	0,39	5,92	2,54	8,46	
	%	62,53	4,54	65,37	7,05	69,98	42,91	100	
(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada									

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na transição da 3^o para a 6^o, bem como para a 9^o semana os incrementos de carbonatação foram bem menores (0,24/0,39 mm) quando comparados com a transição da 9^o para a 12^o semana (2,54 mm) indicando uma aceleração substancial. Esta aceleração parece estar relacionada com modificações nas características da matriz cimentícia a partir dos 6 mm de profundidade e/ou em mudanças na porosidade da camada carbonatada.

Uma explicação para este fenômeno pode estar relacionada ao efeito “diluição” causado pela presença do FC. Neste caso as finas partículas do material podem propiciar uma diluição no sistema de poros levando a uma elevação localizada na porosidade. Este efeito pode ocorrer independentemente da diminuição da porosidade total advinda do efeito “filer”. Com isso, o processo de diluição pode acarretar um pequeno incremento na porosidade total da matriz cimentícia, bem como interferir na conexão entre os poros, propiciando a abertura de novos locais para a difusão do CO₂ (SHAH; BISHNOI, 2018).

Uma outra explicação é dada por Wu e Ye (2017), onde a carbonatação do CSH pode levar a uma elevação da porosidade na camada carbonatada tendo em vista sua descalcificação/polimerização, bem como a formação de sílica gel. Neste caso, deve-se levar em consideração que o FC60 possui um teor de Portlandita menor devido a substituição de 60% do CP por FC. Assim, ocorre uma carbonatação mais intensa do CSH levando a uma camada carbonatada com mais porosidade em relação a não carbonatada o que poderia explicar a aceleração do processo de carbonatação a partir da idade de 9 semanas.

5.2.1.4 Profundidade carbonatada FC70CV10

Na Tabela 5.11 o FC70CV10 apresentou elevada carbonatação observada, principalmente, na idade de 12 semanas com profundidade de 33,59 mm. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, pode-se dizer que o FC70CV10 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 167,95% da espessura do cobrimento útil (20 mm) para um período presumível de 12 anos.

Tabela 5.11 – Profundidade carbonatada FC70CV10

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ
Profundidade carbonatada	mm	17,63	6,27	23,9	8,68	32,58	1,01	33,59	
	%	52,49	35,56	71,15	36,32	96,99	3,1	100	
(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada									

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Observa-se que a maior parte da profundidade carbonatada (52,49%) ocorreu até a 3ª semana, a partir dela o crescimento da profundidade continuou de maneira menos intensa. Na transição da 9ª para a 12ª semana observa-se forte desaceleração na carbonatação com uma variação de 3,1% frente a 36,32% ocorrido entre a 6ª e a 9ª semana.

Importante notar que na transição da 3ª para a 6ª, bem como para a 9ª semana os incrementos na profundidade de carbonatação foram bem maiores (35,56/36,32 mm) quando comparados com a transição da 9ª para a 12ª semana (1,01 mm) indicando uma desaceleração substancial no processo de carbonatação neste período. A desaceleração parece estar relacionada com a presença da CV no traço.

Nos estudos de Kasai et al. (1983) sobre a carbonatação em argamassas com CV, os autores concluíram que o fenômeno progredia rapidamente até os 3 meses de idade e depois reduzia sua velocidade como no presente caso. Na mesma linha Nagataki e Ohga (1992) concluíram que, em períodos mais prolongados de tempo, as taxas de carbonatação foram menores para argamassas contendo CV. Assim os autores concluíram que os resultados alcançados condizem com uma taxa de hidratação mais lenta de sistemas de poros descontínuos em pastas de CP com CV.

Papadakis et al. (1992) relataram o mesmo tipo de conclusão dos autores anteriores, ou seja, a diminuição da profundidade carbonatada em idades posteriores em comparação com a medição inicial para concretos contendo CV. Os pesquisadores atribuíram esse comportamento ao fenômeno do refinamento dos poros.

Apesar da contribuição da CV para a desaceleração da carbonatação, a partir da 9ª semana, os valores da profundidade carbonatada foram relevantemente altos indicando uma deficiência na composição do traço no que se refere a resistência do mesmo frente a difusão do CO₂ na matriz cimentícia.

O comportamento do FC70CV10 frente à carbonatação acelerada deve-se, provavelmente, a reduzida reserva de Portlandita (20% de CP) a qual foi consumida, em parte, pelas reações com a CV para a formação do CSH secundário. Desta maneira, a reserva

alcalina foi diminuída sensivelmente conduzindo a um rápido avanço da frente de carbonatação.

Neste sentido, a afirmação de Shah e Bishnoi (2018) pode ser constatada, ou seja, que a incorporação de AM ($FC+CV$) acarreta uma redução da reserva alcalina, sendo a mesma mais determinante que o teor de água (*fator a/ag*) do traço, podendo ocorrer uma elevação da taxa de carbonatação.

Com isso, pode-se constatar uma prevalência da aceleração da carbonatação devido à diminuição da reserva alcalina em detrimento da inibição do processo por meio do aumento da compacidade do concreto (*redução do fator a/ag*) (CZARNECKI et al., 2018). Da mesma forma, Jia et al. (2012) afirmam que o teor de AM ($FC+CV$) é mais importante para a carbonatação do que a contribuição das mesmas para a diminuição da porosidade devido ao reduzido fator a/ag.

Apesar de Scrivener et al. (2015) colocarem que a incorporação de AM ($FC+CV$) contribuem para a diminuição da carbonatação tendo em vista o preenchimento dos poros e consequente limitação na difusão de CO_2 , no presente caso, a reduzida reserva alcalina (20% de CP) somada à presença de CV, contribuíram para as acentuadas profundidades de carbonatação.

5.2.1.5 Profundidade carbonatada FC60P

O FC60P não apresentou carbonatação no período estudado devido a aplicação da película protetora (*tinta acrílica*) a qual propiciou uma barreira física que diminuiu a difusão do CO_2 na camada de cobrimento do concreto. Conforme Kazmierczak e Helene (1995) a depender do tipo de película protetora (*tinta acrílica, verniz acrílico, etc.*) pode ocorrer uma diminuição da profundidade carbonatada de 2 a 3 vezes quando comparado com o concreto de referência (FC60).

Neste caso, ocorreu uma redução maior tendo em vista que não foi constatado carbonatação do concreto no período estudado. No traço referência (FC60) foi observado uma profundidade de carbonatação de 8,46 mm em 12 semanas, indicando um desempenho adequado desta mistura. Não obstante o mesmo traço com película protetora apresentou um desempenho significativamente maior, indicando que a utilização deste tipo de barreira física (*tinta acrílica*) em conjunto com as características do traço (*empacotamento de partículas e baixo fator a/ag*) conferiram a mistura (FC60P) uma excelente proteção contra a carbonatação do concreto.

Tendo em vista que, usualmente, grande parte das estruturas de concreto são pintadas, principalmente, por razões estéticas, a utilização deste tipo de barreira viabiliza, ainda mais, a utilização do traço FC60, tendo em vista a excelente durabilidade contra a carbonatação conferida por este tipo de proteção. Com uma profundidade de carbonatação nula em 12 semanas, resistência à compressão de 65,7 MPa aos 91 dias de idade, bem como uma substituição de 60% de CP por FC, pode-se dizer que o FC60P reúne condições para ser uma opção competitiva ao concreto estrutural do ponto de vista de durabilidade, desempenho mecânico e sustentabilidade.

5.2.1.6 Profundidade carbonatada FC60CH10

Na Tabela 5.12 o traço FC60CH10 apresentou reduzida carbonatação no período estudado, tendo em vista que, em 12 semanas, foi observada uma profundidade de 1,5 mm indicando excelente desempenho. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, pode-se dizer que o FC60CH10 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 7,5% da espessura do revestimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

Tabela 5.12 – Profundidade carbonatada FC60CH10

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	
Profundidade carbonatada	mm	0,95	0,19	1,14	0,30	1,44	0,06	1,5	
	%	63,33	20	76	26,31	96	4,17	100	
(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada									

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Observa-se que a maior parte da profundidade carbonatada (63,33%) ocorreu até a 3ª semana. A partir dela o processo de crescimento da profundidade de carbonatação continua de maneira menos intensa. Na transição da 9ª para a 12ª semana houve desaceleração na profundidade carbonatada com uma variação de 4,17% frente a 26,31% ocorrido entre a 6ª e a 9ª semana.

Um dos motivos que podem ter levado as reduzidas profundidades de carbonatação do FC60CH10, bem como a desaceleração do processo a partir da 9ª semana está relacionada a maior reserva alcalina, bem como a redução da porosidade aberta e permeabilidade advindas da adição de CH. Conforme Anjos et al. (2015), Cadore (2008) e Dalla Lana (2005) a

incorporação de CH contribui para a diminuição da profundidade de carbonatação, tendo em vista a reposição da alcalinidade da solução através da CH.

Segundo o último autor a adição de 20% de CH reduz a profundidade de carbonatação em relação ao traço de referência. No presente estudo ocorreu uma redução para, aproximadamente, 18%, todavia com uma adição de somente, 10% de CH. Esta diferença em relação ao estudo de Dalla Lana (2005) deve-se a maior compacidade do traço FC60CH10 traduzida em uma resistência à compressão de 88,6 MPa aos 91 dias, ou seja, 38,86% maior que a mistura sem CH (FC60).

Conforme abordado no Item 5.1.1.1 a incorporação de CH no traço FC60CH10 contribuiu para uma maior precipitação de Hidratos de CP, o que levou ao aumento na formação de compostos hidráulicos conduzindo a um incremento na resistência à compressão da mistura quando comparada aquela sem adição de CH (HOPPE FILHO, 2008; QUARCIONI, 2008).

Outro aspecto a ser observado refere-se ao aumento na precipitação dos Aluminatos de Cálcio advindos da adição de CH Calcítica (*utilizada no presente trabalho*) que conduziu a uma majoração na interação com o Carbonato de Cálcio do FC, propiciando uma elevação na formação de Carboaluminatos que conduziram uma redução na porosidade, incremento na resistência à compressão e, conseqüentemente, uma minoração da profundidade de carbonatação (QUARCIONI, 2008).

5.2.1.7 Profundidade carbonatada FC70CV10P

Conforme a Tabela 5.13 o FC70CV10P apresentou reduzida carbonatação, em 12 semanas sendo observada uma profundidade de 1,6 mm indicando um excelente desempenho. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, o traço apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 8% da espessura do revestimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

Tabela 5.13 – Profundidade carbonatada FC70CV10P

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ
Profundidade carbonatada	mm	1,14	0,34	1,48	0,11	1,59	0,01	1,6	
	%	71,25	29,82	92,5	7,44	99,38	0,62	100	

(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A Tabela 5.13 mostra que a maior parte da profundidade (71,25%) ocorreu até a 3ª semana enquanto que a transição da 6ª para a 9ª e desta para a 12ª semana ocorreu uma desaceleração com uma variação de 7,44% e 0,62%, respectivamente, frente a 29,82% ocorrido entre a 3ª e 6ª semana.

A explicação para o desempenho do traço FC70CV10P é o mesmo do FC60P, ou seja, a aplicação de uma película protetora (*tinta acrílica*) formando uma barreira física, diminui a difusão do CO₂ na camada de cobertura. Todavia, o desempenho do FC70CV10P foi inferior ao do FC60P tendo em vista que este último apresentou profundidade de carbonatação nula em 12 semanas.

O menor desempenho do traço FC70CV10P comparado ao FC60P está relacionado a menor reserva alcalina do primeiro, tendo em vista que o FC60P possui 40% de CP e o FC70CV10P apresenta a metade deste valor (20%). Aliado a isto, tem-se as reações pozolânicas para formação de CSH secundário no FC70CV10P advindas da presença da CV as quais consomem uma parte da reduzida reserva alcalina do traço.

Por outro lado, é inegável o desempenho da película protetora de tinta acrílica, propiciando redução na profundidade carbonatada (1,6 mm em 12 semanas) no traço FC70CV10P. Neste caso, em particular, ocorreu uma redução de 21 vezes, ou seja, 33,59 mm (FC70CV10) para 1,6 mm (FC70CV10P) em 12 semanas de carbonatação acelerada.

Desta maneira, o traço FC70CV10 (*sem pintura*) que mostrou um desempenho aquém do esperado, apresentou uma reversão devido a película protetora, passando a apresentar uma performance competitiva tanto do ponto de vista de durabilidade (*carbonatação*) como de resistência mecânica (51,8 MPa aos 91 dias) e sustentabilidade (20% de CP).

5.2.1.8 Profundidade carbonatada FC70CV10CH10

Conforme a Tabela 5.14, o traço FC70CV10CH10 apresentou profundidade carbonatada mediana pois, em 12 semanas, foi observada profundidade de 13,85 mm indicando desempenho intermediário, equivalente a 69,25% do cobrimento útil (20 mm) para período de 12 anos.

Tabela 5.14 – Profundidade carbonatada FC70CV10CH10

Fonte da variação	Unidade	3 semanas		6 semanas		9 semanas		12 semanas	
		Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	Δ	Prof.	
Profundidade carbonatada	mm	7,06	3,96	11,02	0,81	11,83	2,02	13,85	
	%	50,97	56,11	79,57	7,35	85,42	17,07	100	

(Prof.) Profundidade carbonatada / (Δ) Variação da profundidade carbonatada

Através dos números apresentados na Tabela 5.14 é possível observar que, aproximadamente, a metade da profundidade carbonatada (50,97%) ocorreu até a 3ª semana, sendo o restante da carbonatação distribuído entre a 6ª, 9ª e 12ª semanas. Na transição da 6ª para a 9ª semana pode-se observar uma desaceleração na profundidade carbonatada com uma variação de 7,35%, contudo da 9ª para a 12ª semana ocorreu uma aceleração, com uma variação de 17,07%.

Observa-se que a profundidade carbonatada do FC70CV10CH10, em 12 semanas (13,85 mm) foi 58,77% inferior ao do FC70CV10 (33,59 mm), indicando que a adição de CH cumpriu a função de repor parte da reserva alcalina propiciando ao traço maior resistência à carbonatação quando comparada a mistura sem CH. Por outro lado, o FC70CV10CH10 apresentou uma profundidade carbonatada 8,66 vezes maior do que o FC70CV10P indicando que a proteção física (*pintura acrílica*) possui uma eficácia maior do que a proteção química (*adição de CH*).

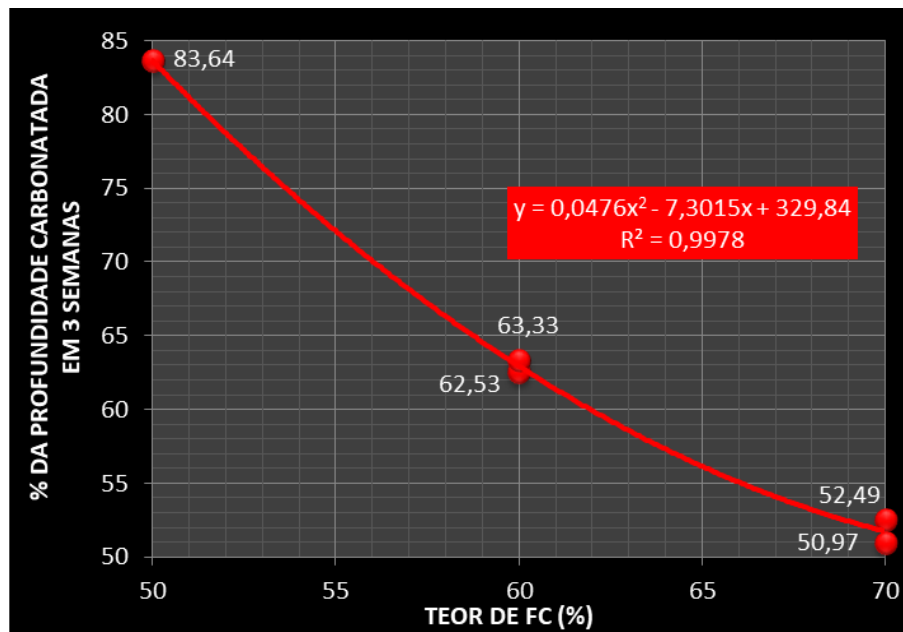
5.2.1.9 Análise integrada da profundidade carbonatada

A partir da Tabela 5.8 é possível realizar uma análise integrada das profundidades carbonatadas nos traços estudados, constatando-se que, à medida que o teor de FC cresceu (*decrece o teor de CP*), as profundidades de carbonatação aumentaram. Esta avaliação é válida tanto para os traços “puros” (*FC50, FC60 e FC70CV10*), como para as misturas com proteção física ou química (*FC60P, FC70CV10P, FC60CH10 e FC70CV10CH10*).

Esta constatação ratifica as colocações de Phung et al. (2015) e Prabakar et al. (2016), onde a carbonatação é função do teor de Portlandita na matriz cimentícia antes do início do processo de carbonatação. Ou seja, quanto maior o teor de Portlandita (*teores mais elevados de CP e CH*) menor será a profundidade carbonatada.

Ao analisar as Tabelas 5.9 a 5.14 pode-se constatar que o percentual total da profundidade carbonatada, em 3 semanas, diminuiu com o aumento do teor de FC, conforme pode ser observado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Percentual total da profundidade carbonatada em 3 semanas x teor de FC



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A explicação para este comportamento está relacionado com a colmatção dos poros na matriz cimentícia reduzindo a difusão do CO_2 . Assim, os traços que possuem menores teores de FC apresentam uma matriz cimentícia mais compacta o que leva a uma redução, na difusibilidade do CO_2 advinda da carbonatação das camadas mais próximas à superfície.

No caso dos traços com maiores teores de FC a matriz cimentícia é menos compacta e o efeito da colmatção dos poros não é tão significativo, levando a uma difusibilidade maior do CO_2 nas camadas mais próximas à superfície.

Este comportamento fica mais evidenciado na comparação entre os traços FC50 e FC70CV10, ou seja, no primeiro 83,64% da profundidade carbonatada (*total*) ocorreu até a 3ª semana e apenas 16,36% da profundidade carbonatada (*total*) ocorreu entre a 4ª e a 12ª semanas.

No segundo, 52,49% da profundidade carbonatada (*total*) ocorreu até a 3ª semana, ou seja, 47,51% (*quase a metade*) da profundidade carbonatada (*total*) ocorreu entre a 4ª e a 12ª semanas.

Também é possível observar na Tabela 5.8 que os traços “*puros*” FC60 e FC70CV10 apresentaram profundidades totais carbonatadas maiores que suas versões com proteção física (*pintura acrílica*) e química (*adição de CH*), sendo que o melhor desempenho ocorreu nas misturas com pintura acrílica.

5.2.2 Determinação do coeficiente de carbonatação (kc)

Conforme Item 4.4.2 e a partir do dados da Tabela 5.8 é possível traçar uma reta (equação 5.2) que correlaciona à profundidade carbonatada x \sqrt{t} tempo (TORRES et al., 2017).

$$f(x) = ax + b \quad (\text{equação 5.2})$$

Onde “ a ” diz respeito ao coeficiente angular da reta de ajuste, que corresponde ao coeficiente de carbonatação (kc) do concreto em $\text{mm} \cdot \sqrt{t}^{-1}$. Hills et al. (2015) classificam as variáveis que influenciam na constante kc em dois grupos: a) variáveis relativas ao meio ambiente do concreto; b) variáveis relativas aos constituintes do concreto.

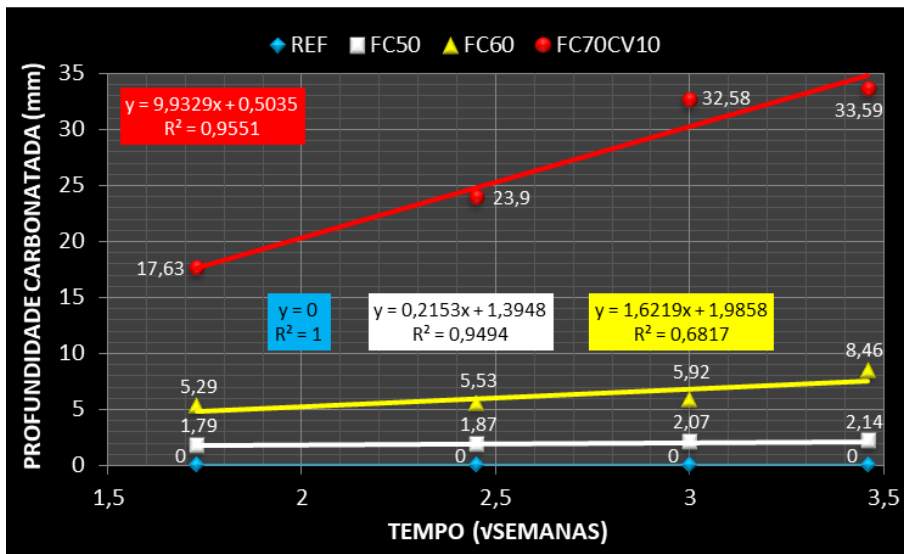
Assim o valor de kc considera tanto as características do meio ambiente, quanto as intrínsecas do concreto, correspondendo, portanto, a aceleração da frente de carbonatação (PHAM, 2013). O autor sublinha que o coeficiente kc constitui em um resumo de todos os fatores que compõe o desenrolar do processo de carbonatação.

Um importante aspecto do kc diz respeito à sua natureza de indicador da resistência do concreto à carbonatação, sendo o indicador mais preciso e confiável para determinação da influência dos fatores relacionados ao concreto no processo de carbonatação (SILVEIRA, 2019).

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram as médias plotadas em um gráfico, raiz quadrada do tempo pela profundidade carbonatada, e dele foram obtidas linhas de tendência para a equação do tipo $f(x) = ax + b$ (equação 5.2).

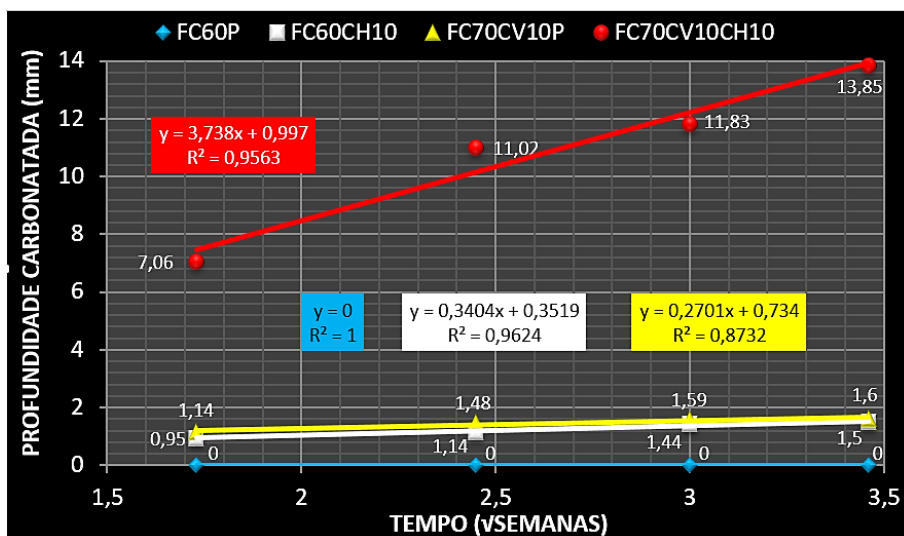
Onde o coeficiente angular da reta, calculado por regressão linear (\sqrt{t} em semanas versus “ e ” em mm), “ a ” é o coeficiente de carbonatação (kc) em cada traço, e o valor “ b ” retrata o ponto em que as retas cruzam o eixo das ordenadas, resultado da liberdade da função (HENTGES et al., 2016).

Figura 5.7 – Profundidades de carbonatação acelerada e linhas de tendência (REF/FC50/FC60/FC70CV10)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 5.8 – Profundidades de carbonatação acelerada e linhas de tendência (FC6P/FC60CH10/FC70CV10P/FC70CV10CH10)



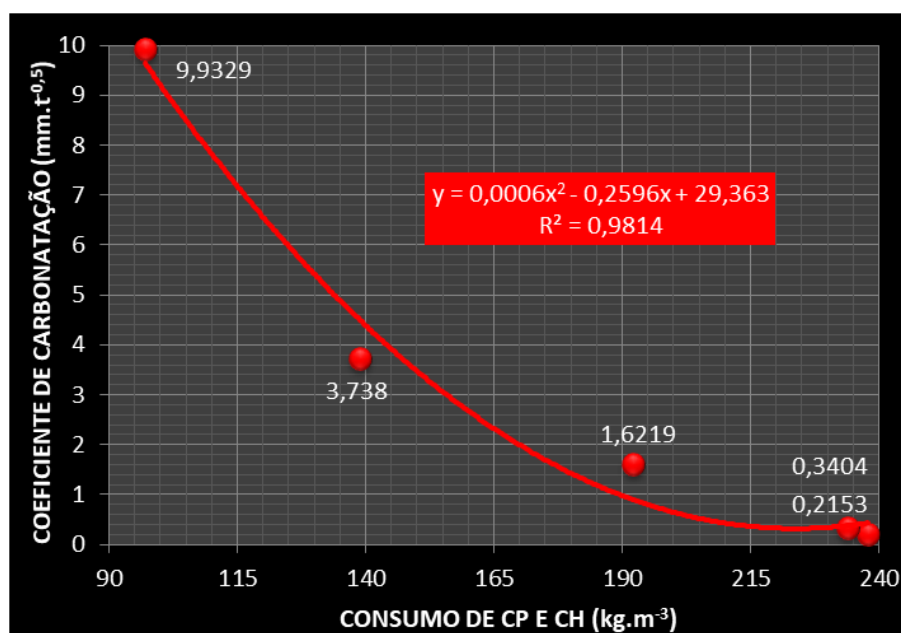
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A partir das Figuras 5.7 e 5.8 foi elaborada a Tabela 5.15 onde foram compilados os valores referentes ao coeficiente de carbonatação (k_c) e o coeficiente de determinação (R^2) de cada traço estudado. Conforme pode ser observado na Tabela 5.15 o coeficiente de carbonatação (k_c) é inversamente proporcional ao teor de CP e CH, ou seja, com o aumento do teor de FC, há um incremento no valor de k_c como pode ser constatado na Figura 5.9.

Tabela 5.15 – Coeficientes de carbonatação (kc) e determinação (R^2) dos traços estudados

Traço	Coeficiente de carbonatação ($kc - mm.tempo^{-0,5}$)	Coeficiente de determinação (R^2)
REF	0	1
FC50	0,2153	0,9494
FC60	1,6219	0,6817
FC60P	0	1
FC60CH10	0,3404	0,9624
FC70CV10	9,9329	0,9551
FC70CV10P	0,2701	0,8732
FC70CV10CH10	3,738	0,9563

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 5.9 – Coeficiente de carbonatação (kc) x o consumo de CP e CH

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Não obstante os dados constantes na Figura 5.9, esta tendência era prevista tendo em vista que vários trabalhos relacionados ao assunto abordam que a medida que o teor de AM (FC e CV) cresce no concreto, decai a concentração de Portlandita, acarretando um crescimento no valor do kc o que gera uma carbonatação mais rápida e intensa (RIBEIRO et al., 2018; SAVIJA; LUKOVIC, 2016).

Desta maneira é possível verificar na Tabela 5.15, a exceção dos traços com pintura acrílica, que o FC70CV10CH10 e FC70CV10 (*menores teores de Portlandita*) apresentaram os maiores valores de kc , 3,738 e 9,9329 $mm.t^{-0,5}$, respectivamente. Nesta mesma linha,

pode-se notar que traços que contém teores próximos de Portlandita (*FC50 e FC60CH10*) também apresentaram valores de k_c pouco distanciados ($0,2153$ e $0,3404 \text{ mm.t}^{-0,5}$).

Ao analisar os k_c dos traços estudados, pode-se dizer que, a exceção das misturas *FC70CV10* e *FC70CV10CH10*, os valores obtidos são muito bons. Sanjuan e Olmo (2001) e Torres et al. (2017) classificam um concreto como sendo de alta qualidade à carbonatação aquele que apresente um k_c inferior a $3 \text{ mm.t}^{-0,5}$. Neste sentido, os traços *FC50*, *FC60*, *FC60P*, *FC60CH10* e *FC70CV10P* apresentaram um k_c médio de $0,49 \text{ mm.t}^{-0,5}$ ou 6,12 vezes menor que o valor máximo indicado pelos autores para a carbonatação de concretos de alta qualidade.

Importante observar que o traço *FC60P* apresentou k_c “zero”, tendo em vista que a profundidade carbonatada no período foi nula. Outro ponto de destaque nos traços citados com k_c médio de $0,49 \text{ mm.t}^{-0,5}$, refere-se ao alto teor de FC contidos nas misturas com uma concentração média de 60%, indicando a possibilidade de elaboração de concretos onde uma grande parte do CP pode ser substituída por esta AM ao mesmo tempo em que é possível obter-se resistências mecânicas compatíveis com concretos de alta resistência ($CAR \geq 50 \text{ MPa}$) e uma excelente durabilidade frente à carbonatação através de reduzidos valores de k_c .

5.2.3 Determinação da vida útil

A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) versa sobre a vida útil de projeto mínima para as diversas partes do edifício, e considera 40 anos como o limite mínimo para as estruturas habitacionais no país. A norma estabelece uma vida útil de projeto superior à 60 anos, de modo a balizar o setor da construção em relação ao que é tecnicamente possível de obter atualmente. Este estudo adotou uma vida útil mínima de 50 anos que compreende a estrutura de uma edificação habitacional.

Para analisar o limite superior da vida útil de uma estrutura habitacional de concreto armado, tomou-se por base o estudo de O'Connor (2004) que verificou a razão pela qual 227 edifícios (25% estruturados em concreto armado), situados em uma grande cidade norte americana, foram demolidos.

A autora sugere que, por meio dos dados obtidos pela pesquisa, não há relação relevante entre o sistema estrutural e vida útil real do edifício. Apenas oito edifícios apresentaram falha estrutural específica, enquanto que falta de manutenção de vários componentes não estruturais, de adequação do prédio para as necessidades atuais e alteração de valores da terra estão entre as razões para a demolição. Essas razões são, principalmente,

vistas em países emergentes. Exceto edificações históricas, os prédios entram em desuso antes de atingirem sua vida última.

Para não supervalorizar a vida útil da estrutura e permitir a potencialidade de um concreto durável, este estudo fixou um valor máximo de 100 anos, pois adotar um valor muito prolongado é problemático, tendo em vista a dinamicidade da sociedade atual e as incertezas das gerações futuras.

Foi possível estimar a vida útil de cada traço analisado, baseando-se nas especificações de projeto e os resultados obtidos de carbonatação pelo método acelerado. Na Tabela 5.16 são apresentadas as estimativas da frente de carbonatação de cada traço estudado, correspondendo um avanço de 20 mm referente a espessura de cobrimento útil. Na última coluna observa-se o tempo estimado provável.

Tabela 5.16 – Estimativa da vida útil dos traços estudados com um cobrimento de 20 mm

Traço	Resistência à compressão (MPa)		a/ag	Coeficiente - kc (mm x semana ^{-0,5})	Tempo estimado teórico (anos) $t = (x.kc^{-1})^2$	Tempo estimado provável (anos)
	28 dias	91 dias				
REF	118,1	127,2	0,25	0	-	100
FC50	80,1	87,8	0,25	0,2153	8.629	100
FC60	56,3	65,7	0,25	1,6219	152	100
FC60P	56,3	65,7	0,25	0	-	100
FC60CH10	70,2	88,6	0,25	0,3404	3.452	100
FC70CV10	28,0	51,8	0,25	9,9329	4	4
FC70CV10P	28,0	51,8	0,25	0,2701	5.483	100
FC70CV10CH10	31,3	43,5	0,25	3,738	29	29

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Conforme descrito anteriormente a camada de cobrimento é de 25 mm, todavia considerou-se uma espessura “útil” de 20 mm. O motivo desta diferença está relacionado com uma frente de carbonatação 5 mm à frente do ensaio colorimétrico tendo em vista a variação de pH entre o ponto de viragem da fenolftaleína e o menor valor que provoca a despassivação ($pH < 11$).

Este critério é importante porque o ensaio colorimétrico oferece uma faixa de variação de cores entre as profundidades carbonatada e não carbonatada, compreendida entre os valores do pH que fornecem matizes desde não coloridos até coloridos, com máxima intensidade. Esta é a razão para utilizar-se a metodologia apresentada por ser mais apurada através de recursos computacionais, como o software Phtoshop, ou qualquer outra, que forneça resultado mais preciso para a real medida da carbonatação, com aumento da significância para atingir a vida útil estrutural de projeto.

Conforme os dados apresentados na Tabela 5.16 pode-se verificar que, à exceção dos traços FC70CV10 e FC70CV10CH10, todas as misturas apresentaram vida útil estimada superior a 100 anos. Como era esperado, o REF e o FC60P apresentaram os maiores valores tendo em vista as profundidades nulas de carbonatação. Também merecem destaque os traços FC50, FC70CV10P e FC60CH10 com valores elevados de vida útil estimada, advindos dos reduzidos valores de k_c (0,2153; 0,2701 e 0,3404 respectivamente).

Com exceção dos traços com 70% de FC com 10% de CV e/ou CH, sem pintura, todos os demais apresentaram um excelente desempenho, demonstrando que a utilização de elevados teores de FC em substituição ao CP podem ser utilizados em concretos, conferindo ótima durabilidade frente a carbonatação. Constata-se, assim, que os traços com 50 e 60% de FC podem ser utilizados sem qualquer tipo de proteção (*física e/ou química*), por outro lado a mistura com 70% de FC deve ser utilizada, somente, com proteção física (*pintura acrílica*).

Tendo em vista os resultados, aquém do esperado, apresentados pelos traços FC70CV10 e FC70CV10CH10, os mesmos não foram utilizados para a o estudo da ACV e CCV da unidade funcional pilar estrutural de concreto, visto que foi empregado uma vida útil estimada mínima de 50 anos.

5.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

No presente item são apresentados os resultados da difração de raio-X (DRX) para cada traço estudado, nos itens subsequentes são realizadas análises dos resultados dos difratogramas das camadas não carbonatada (CN) e carbonatada (CS), bem como realizadas análises integradas da difração de raios-X.

5.3.1 Pré-análise dos resultados

Em análise dos resultados da DRX, nos oito traços estudados, foram encontrados diferentes compostos e/ou fases constituintes na microestrutura da pasta cimentícia, sendo elas: a) Carbonatos (*Vaterita e Carbonato de Cálcio*); b) Óxido (*Quartzo- α*); c) CSH (*Xonotita, Girolita e Rustumita*); d) Carboaluminatos (*Mono*); e) CAH (*Aluminato de Tetracálcio Hidratado*); f) Óxido Hidratado (*Brucita*).

A verificação de cada um dos compostos e/ou fases constituintes citadas foi determinada através de consulta ao Highway Research Board (1972) e a Vazquez (1971), para tanto foram considerados, de modo geral, os dez picos mais representativos no difratograma de cada traço em relação a CN e CS.

Em todos os difratogramas apresentados é possível observar um descolamento da linha de base através da presença de halo de amorfismo entre os ângulos 15° e 35° , indicando a presença de material amorfo, exceto no REF. Conforme Gobbo (2009) a presença do halo amorfo é comum em difratogramas de materiais pozolânicos, CP com pozolanas ou, ainda, com materiais de fase vítrea.

O FC apresentou um índice de desempenho com o CP de 92,39%, acima do valor observado para a CV (90%). Um dos fatores que contribuíram para este valor foi a finura BET ($8,22 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) propiciando reações químicas mais intensas e rápidas com os compostos aluminosos da CV e do CP, como também à maior atração devida ao potencial zeta.

Neste caso Courad et al. (2018) consideram que o FC pode ser denominado material cimentício suplementar (*material pozolânico*) quando apresentar superfície específica maior do que $400 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$, sendo este o caso.

Assim, pode-se considerar que a incorporação de FC, nas misturas estudadas (*inclusive o REF*), apresentou um comportamento próximo ao das pozolanas o que justifica o aparecimento do halo amorfo nos difratogramas de todos os traços (GOBBO, 2009).

A tipificação do halo amorfo como altura de background e intensidade da contagem estão relacionados com a presença das AM incorporadas às misturas, bem como a interação das mesmas na formação dos compostos e/ou fases da matriz cimentícia.

Um ponto a ser destacado, em todos os difratogramas, diz respeito a presença de um pico característico na posição interplanar $3,34 \text{ nm}$ e/ou $1,54 \text{ nm}$ referente ao Quartzo- α (SiO_2) o qual está relacionado ao agregado miúdo (*areia fina*) cujo principal componente é o SiO_2 . Conforme a Tabela 4.4 o SiO_2 pode ser encontrado, também, como um componente traço no CP (19,89%), FC (1,04%), CV (68,81%) e CH (1,77%).

Um outro ponto importante observado, em todos os difratogramas, especialmente na CN, é a ausência da Portlandita (*nas posições interplanares $2,63^{10}$, $4,9^7$, $1,93^4$, $1,8^3$, $3,11^2$, $1,69^2 \text{ nm}$*). Neste caso a justificativa, em especial o REF (CN), para a não detecção pode estar relacionada ao grande tamanho dos cristais deste componente.

Ou seja, a alta compacidade da matriz cimentícia advinda do baixo fator a/ag (*resistência superiores a 50MPa aos 91 dias na grande maioria dos traços*) não propiciou o espaço necessário para a formação dos cristais de Portlandita inibindo desta maneira sua formação (BENTZ, 2006; BONAVENTTI et al., 2003).

Para os demais traços, conforme Anjos et al. (2012), concretos com elevados teores de AM podem apresentar baixos teores, ou mesmo, ausência de Portlandita em idades superiores

a 28 dias, este comportamento pode ser explicado pelo consumo deste composto nas reações com as AM.

No presente caso podem ter contribuído para os baixos teores de Portlandita: a) as reações pozolânicas com a CV nas misturas com 70% de FC (LOTTHENBACH et al., 2011); b) a formação de Brucita (SOUZA, 2006).

Santos (2020) coloca que a presença de Carbonatos na matriz cimentícia pode afetar a formação da Portlandita. De fato, foram constatados na CN, de todos os traços, a presença de Carbonatos o que pode ter contribuído para a diminuição no teor de Portlandita.

Ainda em relação a presença de Carbonatos (*Vaterita e Carbonato de Cálcio*) na CN, Silveira (2019) e Thiéry et al. (2007) mostram que a presença destes compostos pode ser explicada devido a fronteira da frente de carbonatação não ser bem definida, observando-se uma porção de difícil determinação visual, podendo o concreto estar, neste caso, parcialmente carbonatado.

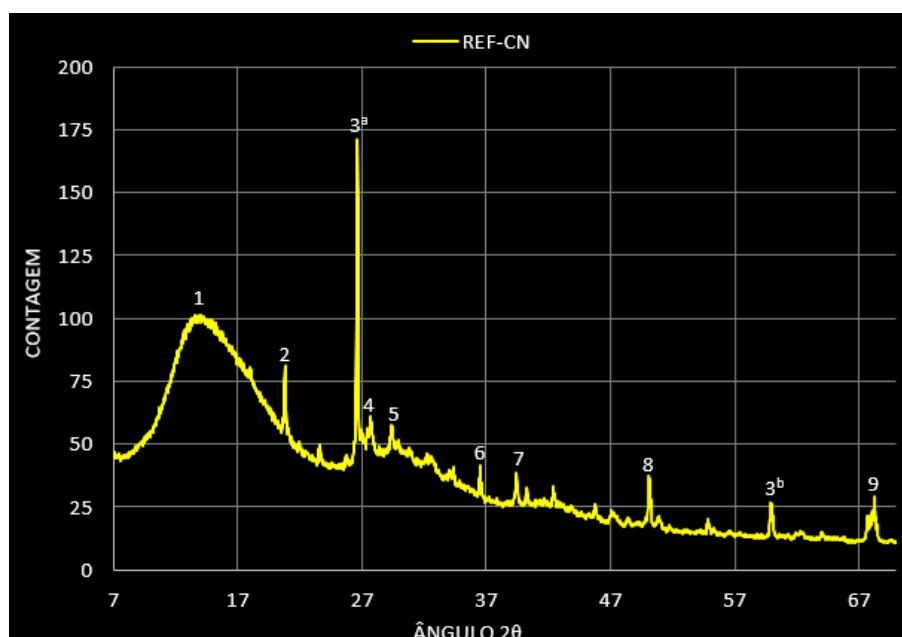
Ainda segundo Silveira (2019) e Thiéry et al. (2011) a carbonatação dos concretos pode iniciar na fase de moldagem dos corpos de prova, propiciando, desta forma, a presença de Carbonatos mesmo em regiões não carbonatadas.

Um outro fator que pode ter contribuído para a presença de Carbonatos na CN refere-se a incorporação do FC em todas as misturas estudadas. Devido aos altos teores de Cálcio contidos no FC, pode ter ocorrido uma interação com o CO₂ proveniente do ambiente (*moldagem*) e/ou incorporado na matriz cimentícia contribuindo, assim, para a presença deste composto na CN (SILVEIRA, 2019; THIÉRY et al., 2011).

5.3.2 Difratoograma do traço REF

Na Figura 5.10 e Tabela 5.17 são apresentados os resultados referentes à camada não carbonatada (CN) do traço REF, observando-se halo amorfo pronunciado na posição 1 – CN, o qual pode estar relacionado ao CSH da matriz cimentícia apresentando uma conformação menos cristalina conforme Brekailo et al. (2019). O ponto máximo do halo amorfo acontece em “*d*” 6,46 e intensidade do pico 8, indicando a posição do CSH Afwillita.

Figura 5.10 – Difratoograma da camada CN traço REF



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.17 – Resultados da DRX da camada CN do traço REF

Número CN	2θ	Contagem e variação %	% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 - CN	-	-	-	-	-	-	-	Halo de Amorfismo
2 - CN	20,81	80,98	-	14,89	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato Vaterita ^b
3 ^a - CN	26,63	171,04	-	31,46	3,34	10	SiO ₂	Óxido Quartzo-α ^b
3 ^b - CN	59,9	26,73	-	4,91	1,54	2		
4 - CN	27,61	60,81	-	11,18	3,23	7	Ca ₆ (Si ₆ O ₁₇)(OH) ₂ .2H ₂ O	CSH ^a Xonotitla ^b
5 - CN	29,38	57,57	-	10,58	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
6 - CN	36,51	41,78	-	7,68	2,46	6	Ca ₂ Al(OH) ₆ OH.3H ₂ O	CAH ^a Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^b
7 - CN	39,41	38,69	-	7,11	2,28	2	CaCO ₃	Carbonato Carbonato de Cálcio ^c
8 - CN	50,08	37,39	-	6,87	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅)(OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a Girolita ^b
9 - CN	68,26	28,92	-	5,32	1,37	2	Mg(OH) ₂	Óxidos Hidratados Brucita ^b

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972); (c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 2 e 7 – CN, encontram-se a Vaterita e Carbonato de Cálcio, respectivamente, indicando a presença de Carbonatos na CN conforme apresentado no Item

5.3.1. Nas posições 3^a e 3^b - CN pode-se observar a presença do Quartzo- α , também, conforme indicado no mesmo item.

Nas posições 4 e 8 – CN apresentam-se, respectivamente, a Xonotitla e Girolita que são CSH bem cristalizados, ricos em SiO₂, sendo muito resistentes melhorando a estabilidade e integridade da matriz cimentícia (ORTIZ, 2017). A Xonotitla tem sua formação relacionada a compostos Sílico-Calcários, ou seja, neste caso particular, a incorporação de FC no CP (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1972). Destaca-se que a presença da Xonotitla ocorreu, dentre todos os traços estudados, somente no REF e FC60P, os quais apresentaram uma CS nula, desta forma pode-se supor que este composto seja mais suscetível à carbonatação.

Na posição 5 – CN constata-se a presença de Carboaluminatos devido a incorporação do FC no CP, ocorrida pela reação do FC com as fases de alumina do CP o qual fornece um aumento na resistência mecânica por meio da produção de mais Hidratos, os quais tendem a preencher os poros (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017; BONAVETTI et al., 2003).

Na posição 6 – CN observa-se o pico do Aluminato de Tetracálcio Hidratado. Conforme Garrido e Vega (2019) a disponibilidade de íons de Cálcio pela incorporação de FC na matriz cimentícia leva à reação com compostos Aluminatos Hidratados para a formação do Aluminato de Tetracálcio Hidratado. Segundo Rojas e Cabrera (2002) o Aluminato de Tetracálcio Hidratado formado a partir de reação pozolânicas é um composto metaestável que sofre uma conversão para a fase estável de Hidrogranada com o passar do tempo.

Conforme Item 4.3.1.2 o FC é classificado como Calcítico ($MgO = 0,31\%$), bem como o CP apresenta um teor de MgO (3,4%) inferior a 6,5% conforme prescrição da NBR 16697 (ABNT, 2018a). A presença de MgO no FC e CP levou a formação de Brucita [$Mg(OH)_2$] conforme demonstra a posição 9 – CN no difratograma do traço REF.

Conforme Souza et al. (2013) a formação da Brucita é acompanhada de expansão volumétrica tendo em vista a diferença de densidade entre a Magnésia ($\rho_{MgO} = 3,53 \text{ g.cm}^{-3}$) e o produto da reação de hidratação, o Hidróxido de Magnésio [$\rho_{Mg(OH)_2} = 2,4 \text{ g.cm}^{-3}$]. Esta expansão pode acarretar patologias no concreto referente ao aparecimento de fissuras e/ou a desintegração da pasta. Segundo os autores a utilização de partículas mais finas na matriz cimentícia (FC) propiciam acomodação na expansão da Brucita diminuindo, de maneira significativa, os efeitos deletérios. Desta maneira, a presença do FC, por ser uma partícula mais fina, pode explicar o não aparecimento de qualquer patologia nos cp do traço REF mesmo com a formação de Brucita.

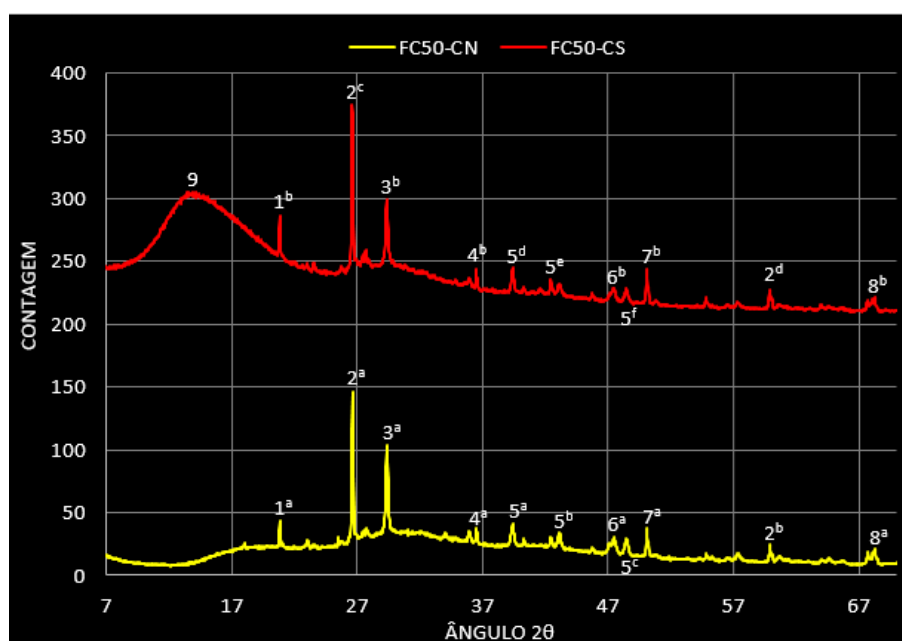
Outro aspecto da Brucita diz respeito ao consumo de Portlandita, pois conforme Souza (2006), para sua formação há consumo acentuado da Portlandita à qual fornece os íons

hidroxila havendo, portanto, uma redução no pH da matriz cimentícia. Afim de manter o equilíbrio no pH o CSH libera Portlandita, sendo que este processo contribui para a descalcificação da matriz cimentícia. A partir do processo descrito por Souza (2006) pode-se complementar os motivos citados no Item 5.3.1 a respeito da ausência de picos de Portlandita no difratograma do traço REF. Desta forma, a presença da Brucita pode ter contribuído para uma redução, ainda maior, no teor de Portlandita da matriz cimentícia.

5.3.3 Difratoograma do traço FC50

Na Figura 5.11 e Tabela 5.18 são apresentados os resultados da DRX da camada carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC50. Nas posições 1^a – CN e 1^b – CS identifica-se a presença do Carbonato Vaterita com variação positiva de 97,52%. Conforme Wu e Ye (2017) a Vaterita, em traços com AM, resulta da carbonatação do CSH com baixas relações Ca/Si. Esta afirmação faz sentido visto que ocorreu aumento no teor de Girolita (14,73%) que é um CSH mais bem cristalizado e estável (ORTIZ, 2017), bem como uma diminuição no teor de Rustumita (8,99%). Possivelmente, neste caso, a carbonatação ocorreu na Portlandita, Rustumita e nos CSH's com menores relações Ca/Si e que não apresentaram picos relevantes no difratograma.

Figura 5.11 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC50



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.18 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC50

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %		% Total	“d” pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 ^a - CN	20,84	43,61	+97,52	7,92	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato	Vaterita ^b
1 ^b - CS		86,14		13,7					
2 ^a - CN	26,63	146,4	+18,78	26,6	3,34	10	SiO ₂	Óxido	Quartzo-α ^b
2 ^c - CS		173,89		27,64					
2 ^b - CN	59,93	24,6	+13,05	4,47	1,54	2			
2 ^d - CS		27,81		4,42					
3 ^a - CN	29,38	103,75	-4,4	18,85	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ . CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato	Mono ou Hemi Carboaluminato
3 ^b - CS		99,19		15,77					
4 ^a - CN	36,51	37,52	+17,99	6,82	2,46	6	Ca ₂ Al(OH) ₆ OH.3H ₂ O	CAH ^a	Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^c
4 ^b - CS		44,27		7,04					
5 ^a - CN	39,41	41,46	+7,67	7,53	2,28				
5 ^d - CS		44,64		7,1					
5 ^b - CN	43,13	34,21	-5,58	6,21	2,09	2	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
5 ^e - CS		32,3		5,14					
5 ^c - CN	48,49	29,42	-4,32	5,34	1,88				
5 ^f - CS		28,15		4,48					
6 ^a - CN	47,47	30,91	-8,99	5,62	1,91	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	CSH ^a	Rustumita ^b
6 ^b - CS		28,17		4,47					
7 ^a - CN	50,11	37,69	+14,73	6,85	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅) (OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a	Girolita ^b
7 ^b - CS		43,24		6,88					
8 ^a - CN	68,26	20,89	+1,1	3,79	1,37	2	Mg(OH) ₂	Óxidos Hidratados	Brucita ^b
8 ^b - CS		21,12		3,36					
9 - CS	-	-	-	-	-	-	-	-	Halo de Amorfismo

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Também há grande disponibilidade de Cálcio na matriz cimentícia visto que o FC50 possui uma substituição de 50% de CP por FC. Desta maneira, pode ter ocorrido uma reação entre o CO₂ advindo do processo de carbonatação acelerada com o Cálcio proveniente do FC para a formação da Vaterita (SILVEIRA, 2019; THIÉRY et al., 2011).

Ainda em relação aos Carbonatos destaca-se a variação negativa entre CN e CS (média de 4,95%) no Carbonato de Cálcio nas posições 5^b, 5^c - CN e 5^e, 5^f - CS. Conforme Wolf (2010), a incorporação de altos teores de FC em matrizes cimentícias pode alterar o pH da solução e afetar os mecanismos de carbonatação. Segundo o autor existe a possibilidade da reserva alcalina da matriz cimentícia minorar a carbonatação do concreto, todavia esta propositura estaria atrelada a um aumento na solubilidade do Carbonato de Cálcio. O aumento da solubilidade poderia ser propiciado em soluções básicas e/ou com elevados teores de álcalis. Parece plausível que concretos com elevados teores de FC possam ensejar este tipo de ambiente propício ao aumento da solubilidade do Carbonato de Cálcio visto a reduzida carbonatação apresentada pelo FC50.

O aumento da solubilidade do Carbonato de Cálcio já é contemplada na literatura através da possibilidade de reação de parcela deste composto com os Hidratos da matriz cimentícia conforme Massazza e Daimon (1992) os quais sugerem que de 3 a 8 % (*média de 5%*) do Carbonato de Cálcio presente na matriz cimentícia reage com os Hidratos do CP para a formação de novos compostos. A variação negativa (*média de -6,3%*) no teor de Carbonato de Cálcio entre CN e CS está contida no intervalo proposto por Massazza e Daimon (1992), indicando que a diminuição no teor do composto, possivelmente, está relacionada à reação com os Hidratos da matriz cimentícia.

Nas posições 5^a – CN e 5^d – CS ocorreu incremento de +7,67% no Carbonato de Cálcio. Deve ser observado que a classificação que melhor retratou a escolha do composto foi a de Vazquez (1971) que não contempla, em sua relação, a diferenciação entre as diversas fases do CaCO₃ denominando todas de Carbonato de Cálcio. Desta forma, a fase com “*d*” 2,28 deve estar relacionada a um composto metaestável que possui o mesmo comportamento da Vaterita (SAUMAN, 1971).

Nas posições 2^a, 2^b – CN e 2^c, 2^d – CS observa-se os picos de Quartzo- α que, estão relacionados com o agregado miúdo e/ou com o componente traço do CP e FC (HOPPE FILHO et al., 2014). Todavia, ocorreu uma variação positiva, entre CN e CS, de +18,78% e +13,05% em “*d*” 3,34 e 1,54, respectivamente, indicando um aumento no teor de SiO₂. Este aumento pode estar relacionado a maior disponibilidade de Si advinda da carbonatação da Rustumita e dos CSH com menores relação Ca/Si e que não apresentaram picos relevantes da mesma maneira que o correu com a Vaterita.

Nas posições 3^a – CN e 3^b – CS constata-se uma diminuição de -4,4% no teor de Carboaluminatos tendo em vista que a medição ocorreu aos 175 dias de idade, pode-se dizer que o composto presente na mistura é o Monocarboaluminato, considerando que o Hemicarboaluminato é metaestável, sendo observado somente em idades iniciais segundo Ipavec et al. (2011).

Apesar do Monocarboaluminato ser uma fase estável, não está imune ao processo de carbonatação, neste sentido Pauletti (2009) coloca que o mesmo sofre pequena carbonatação por ocasião do processo atingir os demais Hidratos da matriz cimentícia.

Nas posições 4^a – CN e 4^b – CS encontra-se o Aluminato de Tetracálcio Hidratado que apresentou elevação de +17,99%. Este composto (*metaestável*) indica que, ainda, não ocorreu a transição para a fase de Hidrogranada (*estável*) (ROJAS; CABRERA, 2002). Conforme Pauletti (2009), a carbonatação não interfere no teor de Aluminatos Hidratados disponíveis, por outro lado, há disponibilidade de Aluminatos provenientes da diminuição no teor de

Carboaluminatos, sendo plausível que seja verificado incremento do Aluminato de Tetracálcio Hidratado entre a CN e CS.

Nas posições 6^a – CN e 6^b – CS destaca-se a presença da Rustumita com uma diminuição de -8,99%. Conforme será demonstrado nos itens subsequentes a formação da Rustumita está atrelada a uma maior carbonatação do traço haja vista que o incremento no seu teor ocorre nas misturas com maior carbonatação.

Este comportamento está ligado com sua gênese, pois conforme o Highway Research Board (1972) sua formação está relacionada a minerais com teores mais elevados de Carbonatos. Tendo em vista que o traço FC50 apresentou uma carbonatação reduzida, justificando, assim, a diminuição na Rustumita.

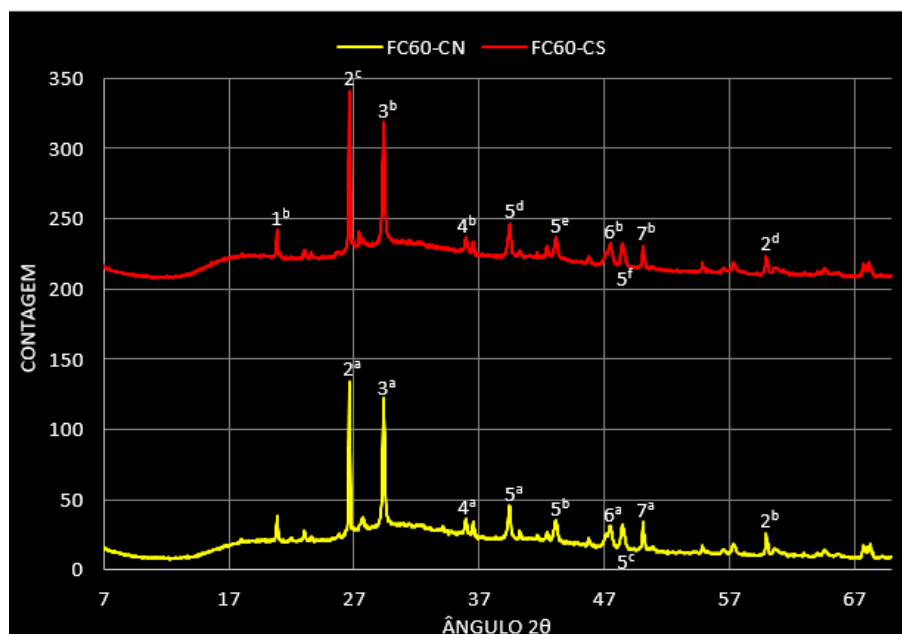
Nas posições 7^a – CN e 7^b – CS há presença da Girolita com variação positiva de +14,73%. Esta variação positiva pode estar relacionada com a maior disponibilidade de SiO₂ advinda da carbonatação da Rustumita e dos CSH com menores relação Ca/Si e que não apresentaram picos relevantes no difratograma, bem como uma quantidade relevante de Cálcio oriundo da incorporação de 50% de FC. Desta forma, é plausível que seja verificado um incremento da Girolita entre a CN e CS. Na posição 9 – CN encontra-se um halo amorfo pronunciado que está relacionada ao CSH da matriz cimentícia apresentando uma conformação mais amorfa conforme Brekailo et al. (2019). O ponto máximo do halo amorfo acontece na posição “*d*” 6,46 e intensidade de pico 8, indicando a posição do CSH Afwillita.

5.3.4 Difratograma do traço FC60

Na Figura 5.12 e Tabela 5.19 são apresentados os resultados referentes à camada carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC60. Nas posições 1^a – CN e 1^b – CS é possível observar variação positiva de +22,16% no teor do Carbonato Vaterita possivelmente devido à carbonatação do CSH, considerando a diminuição no teor de Girolita de -9,33%.

Nas posições 2^a – CN e 2^c – CS constata-se variação positiva de +5,87% no Quartzo- α , todavia o mesmo comportamento não é verificado nas posições 2^b – CN e 2^d – CS onde ocorreu uma diminuição de -11,03%. Contudo, a tendência é de aumento no teor de Quartzo- α tendo em vista a maior contagem nas posições 2^a – CN e 2^c – CS. A origem do SiO₂ pode estar relacionada com a carbonatação da Girolita que apresentou uma redução de -9,33% entre CN e CS.

Figura 5.12 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC60



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.19 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC60

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %	% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 ^a - CN	20,81	38,53	7,2	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato	Vaterita ^b
1 ^b - CS		42,07						
2 ^a - CN	26,63	133,46	24,94	3,34	10	SiO ₂	Óxido	Quartzo-α ^b
2 ^c - CS		141,29						
2 ^b - CN	59,93	26,11	4,88	1,54	2			
2 ^d - CS		23,23						
3 ^a - CN	29,35	121,93	22,78	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato	Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
3 ^b - CS		118,33						
4 ^a - CN	36,51	33,84	6,75	2,46	8	Ca ₂ A1(OH) ₆ OH.6H ₂ O	CAH ^a	Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^b
4 ^b - CS		33,45						
5 ^a - CN	39,44	45,65	8,53	2,28	2			
5 ^d - CS		46,08						
5 ^b - CN	43,10	35,67	6,67	2,09	2	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
5 ^e - CS		36,35						
5 ^c - CN	48,49	32,22	6,02	1,88	2			
5 ^f - CS		32,51						
6 ^a - CN	47,47	31,28	5,84	1,91	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	CSH ^a	Rustumita ^b
6 ^b - CS		32,5						
7 ^a - CN	50,11	34,2	6,39	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅)(OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a	Girolita ^b
7 ^b - CS		31,01						

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 3^a – CN e 3^b – CS houve pequena redução de -2,95% no teor de Carboaluminatos (*Mono*), conforme descrito por Pauletti (2009). Em relação ao teor de Aluminato de Tetracálcio Hidratado, observa-se leve redução de -1,15%, entre CN e CS, conforme descrito nas posições 4^a – CN e 4^b – CS, a qual reflete uma possível transição para a fase de Hidrogranada (*estável*) (ROJAS; CABRERA, 2002).

Nas posições 5^a, 5^b, 5^c – CN e 5^d, 5^e, 5^f – CS constata-se variação positiva média de +1,25% no teor de Carbonato de Cálcio, a qual pode estar relacionado com a carbonatação da Girolita, bem como a transformação da Vaterita que é uma fase metaestável. De acordo com Sauman (1971), em primeiro lugar forma-se a Vaterita, a qual converte-se em Carbonato de Cálcio com o tempo.

Nas posições 6^a – CN e 6^b – CS é detectada a presença da Rustumita com um incremento de +3,9% entre CN e CS. Conforme o Highway Research Board (1972), a formação deste composto está atrelada a uma maior carbonatação da matriz cimentícia.

Nas posições 7^a – CN e 7^b – CS apresenta-se a Girolita com a variação negativa de -9,33%, a qual pode estar relacionada com o processo de carbonatação mais intenso ocorrido no FC60 que atingiu os CSH's mais bem cristalizados e estáveis.

5.3.5 Difratoograma do traço FC60CH10

Na Figura 5.13 e Tabela 5.20 são apresentados os resultados de difração de raios-X da camada carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC60CH10.

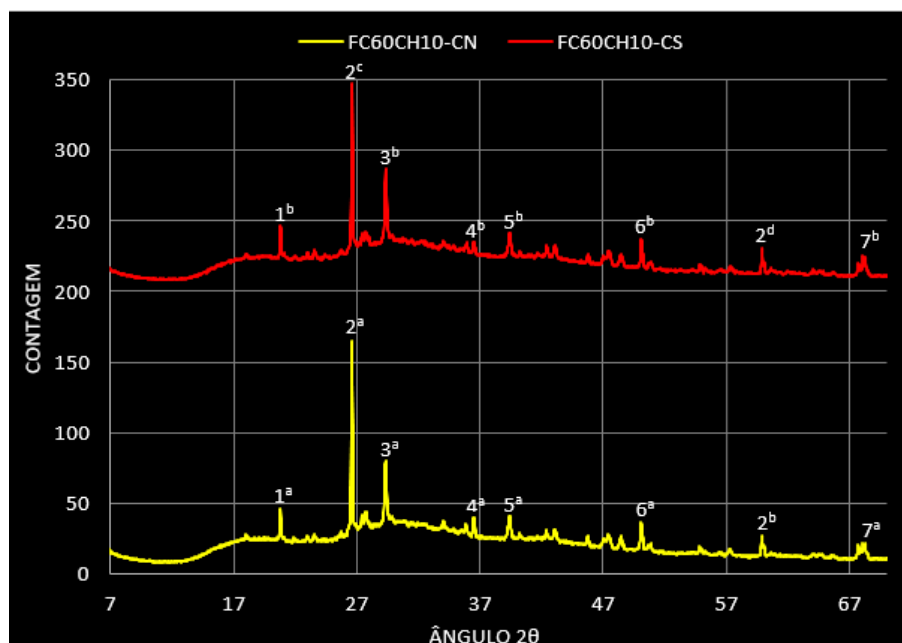
Nas posições 2^a – CN e 2^c – CS verifica-se redução no teor de Quartzo- α de -10,96%, já nas posições 2^b – CN e 2^d – CS o mesmo composto apresentou incremento positivo de +9,44% tendo ocorrido, assim, uma estabilidade no teor de Quartzo- α .

Nas posições 3^a – CN e 3^b – CS observa-se variação positiva de +9,06%, no Carboaluminato, possivelmente relacionado com a diminuição de 13,06%, entre CN e CS, no Aluminato Tetracálcio Hidratado.

Ainda em relação a diminuição no teor do Aluminato Tetracálcio Hidratado nas posições 4^a – CN e 4^b – CS, pode ter ocorrido uma conversão em Hidrogranada que é a fase estável deste composto (ROJAS; CABRERA, 2002).

Nas posições 5^a – CN e 5^b – CS constata-se a presença do Carbonato de Cálcio com pequena variação positiva de 0,98%, indicando que, possivelmente, ocorreu uma conversão da Vaterita neste composto (SAUMAN, 1971).

Figura 5.13 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC60CH10



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.20 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC60CH10

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %		% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 ^a - CN	20,81	46,24	-0,19	10,1	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato	Vaterita ^b
1 ^b - CS		46,15		10,3					
2 ^a - CN	26,6	165,24	-10,96	36,1	3,34	10	SiO ₂	Óxido	Quartzo-α ^b
2 ^c - CS		147,12		32,84					
2 ^b - CN	59,9	27,54	+9,44	6,02	1,54	2	3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato	Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
2 ^d - CS		30,14		6,73					
3 ^a - CN	29,35	79,81	+9,06	17,44	3,04	1	Ca ₂ Al(OH) ₆ OH.3H ₂ O	CAH ^a	Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^b
3 ^b - CS		87,04		19,43					
4 ^a - CN	36,51	39,89	-13,06	8,72	2,46	6	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
4 ^b - CS		34,68		7,74					
5 ^a - CN	39,41	40,81	+0,98	8,92	2,28	2	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅)(OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a	Girolita ^b
5 ^b - CS		41,21		9,2					
6 ^a - CN	50,08	36,3	+1,98	7,93	1,82	8	Mg(OH) ₂	Óxidos Hidratados	Brucita ^b
6 ^b - CS		37,02		8,26					
7 ^a - CN	68,26	21,82	+12,92	4,77	1,37	2			
7 ^b - CS		24,64		5,5					

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 6^a - CN e 6^b - CS observa-se a presença da Girolita com variação positiva de +1,98%, tendo em vista que há disponibilidade de SiO₂ advinda da formação de

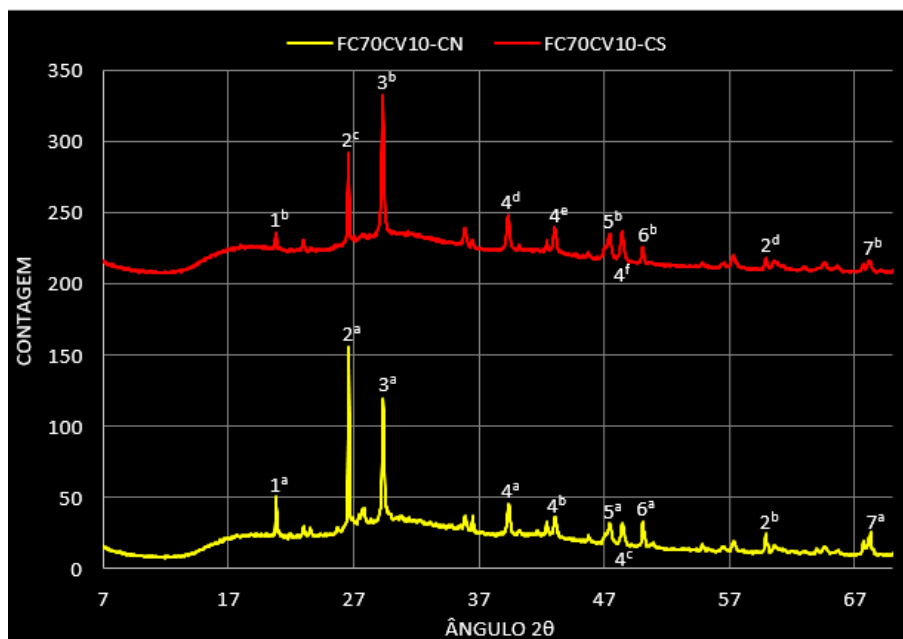
Quartzo- α , bem como quantidade relevante de Cálcio oriunda da incorporação de 60% de FC, desta forma parece plausível que tenha ocorrido incremento da Girolita.

Nas posições 7^a – CN e 7^b – CS constata-se um incremento de +12,92%, no teor de Brucita, a qual pode estar relacionada com o consumo da Portlandita incorporada ao traço na condição de CH e que não apresentou picos relevantes no difratograma (SOUZA, 2006).

5.3.6 Difratoograma do traço FC70CV10

Na Figura 5.14 e Tabela 5.21 são apresentados os resultados da DRX referentes à camada carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC70CV10.

Figura 5.14 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 1^a – CN e 1^b – CS há variação negativa de -27,59% no teor de Vaterita, que deve ter ocorrido por conversão em Carbonato de Cálcio (SAUMAN, 1971) haja visto que ocorreu um incremento no teor deste composto estável nas posições 4^a – CN e 4^d – CS (+7,25%), 4^b – CN e 4^e – CS (+8,67%), 4^c – CN e 4^f – CS (+13,63%), respectivamente.

Nas posições 2^a – CN e 2^c – CS, bem como 2^b – CN e 2^d – CS verifica-se uma forte retração no teor de Quartzo- α de -41,1% e -25,41%. Considerando que ocorreu diminuição no teor de Girolita nas posições 6^a – CN e 6^b – CS de -23,7%, devido à forte carbonatação sofrida por este traço, devido a maior disponibilidade de SiO_2 na matriz cimentícia. Todavia, este

incremento não foi detectado pela DRX tendo em vista que a descalcificação do CSH gera um gel de sílica com uma estrutura altamente porosa (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Tabela 5.21 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %		% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 ^a - CN	20,81	50,35	-27,59	9,06	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato	Vaterita ^b
1 ^b - CS		36,46		7,56					
2 ^a - CN	26,6	156,26	-41,1	28,11	3,34	10	SiO ₂	Óxido	Quartzo-α ^b
2 ^c - CS		92,04		19,09					
2 ^b - CN	59,9	24,56	-25,41	4,42	1,54	2			
2 ^d - CS		18,32		3,8					
3 ^a - CN	29,35	119,43	+11,44	21,49	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ . CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato	Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
3 ^b - CS		133,09		27,61					
4 ^a - CN	39,38	45,65	+7,25	8,21	2,28	2	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
4 ^d - CS		48,96		10,16					
4 ^b - CN	43,07	36,66	+8,67	6,6	2,1	2	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
4 ^e - CS		39,84		8,26					
4 ^c - CN	48,43	32,2	+13,63	5,79	1,88	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH)	CSH ^a	Rustumita ^b
4 ^f - CS		36,59		7,59					
5 ^a - CN	47,44	31,63	+11,44	5,69	1,91	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH)	CSH ^a	Rustumita ^b
5 ^b - CS		35,25		7,31					
6 ^a - CN	50,08	33,59	-23,7	6,04	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅) (OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a	Girolita ^b
6 ^b - CS		25,63		5,32					
7 ^a - CN	68,26	25,49	-37,5	4,59	1,37	2	Mg(OH) ₂	Óxidos Hidratados	Brucita ^b
7 ^b - CS		15,93		3,3					

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 3^a – CN e 3^b – CS identifica-se a presença de Carboaluminato apresentando um aumento no teor de +11,44%. Neste caso, constata-se o efeito sinérgico entre a CV e o FC conforme descrito por Deschener et al. (2012) e De Weerd et al. (2011). A sinergia ocorre pela interação do FC com os Aluminatos fornecidos pela CV durante a reação pozolânica, levando a formação de Carboaluminatos.

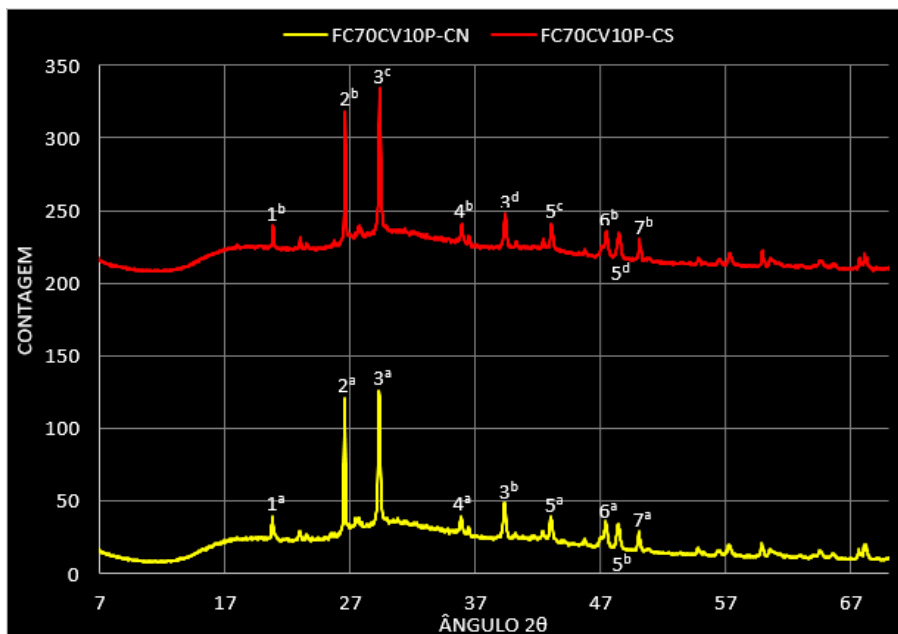
Nas posições 5^a – CN e 5^b – CS observa-se o incremento de +11,44% no teor de Rustumita. O composto é um CSH formado a partir de Carbonatos. A Rustumita identificada pode estar relacionada a maior carbonatação apresentada pelo traço FC70CV10 o qual apresenta uma maior concentração de Carbonatos.

Nas posições 7^a – CN e 7^b – CS houve diminuição significativa (-37,5%) no teor de Brucita, devido à forte carbonatação sofrida pela mistura que conduziu a uma redução na concentração de Portlandita (SOUZA, 2006).

5.3.7 Difratoograma do traço FC70CV10P

Na Figura 5.15 e Tabela 5.22 são apresentados os resultados das camadas carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC70CV10P.

Figura 5.15 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10P



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 1^a – CN e 1^b – CS identifica-se a presença da Vaterita que apresentou variação de +2,18%. Conforme Wu e Ye (2017), em traços com AM, o composto resulta da carbonatação do CSH com baixas relações Ca/Si.

Neste traço, ocorreu um aumento da Girolita (6,75%) que é um CSH mais bem cristalizado e estável, por outro lado a Rustumita apresentou estabilidade (-0,33%). Possivelmente, neste caso, a carbonatação ocorreu na Portlandita e nos CSH com menores relações Ca/Si e que não apresentaram picos relevantes no difratograma.

Nas posições 2^a – CN e 2^b – CS houve redução de -2,02% no teor de Quartzo- α , possivelmente relacionado com o aumento de +6,75% no teor de Girolita nas posições 7^a – CN e 7^b – CS.

Nas posições 3^a – CN e 3^c – CS detecta-se uma elevação de +6,37%, em relação ao Carboaluminato, enquanto em 3^b – CN e 3^d – CS observa-se, estabilidade (-0,29%). Assim como no FC70CV10, o aumento no teor deste composto está relacionado com a interação do

FC com os Aluminatos fornecidos pela CV durante a reação pozolânica, conforme Deschener et al. (2012) e De Weerd et al. (2011).

Tabela 5.22 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10P

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %		% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 ^a - CN	20,81	39,08	+2,18	7,62	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato	Vaterita ^b
1 ^b - CS		39,93		7,61					
2 ^a - CN	26,57	120,93	-2,02	23,57	3,34	10	SiO ₂	Óxido	Quartzo-α ^b
2 ^b - CS		118,49		22,6					
3 ^a - CN	29,32	126,36	+6,37	24,63	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato	Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
3 ^c - CS		134,41		25,63					
3 ^b - CN	39,35	48,6	-0,23	9,48	2,29	1			
3 ^d - CS		48,49		9,25					
4 ^a - CN	35,87	39,63	+3,31	7,73	2,5	8	Ca ₂ Al(OH) ₆ OH.6H ₂ O	CAH ^a	Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^b
4 ^b - CS		40,91		7,8					
5 ^a - CN	43,07	39,26	+3,74	7,65	2,1	2	CaCO ₃	Carbonato	Carbonato de Cálcio ^c
5 ^c - CS		40,73		7,77					
5 ^b - CN	48,43	34,3	+1,6	6,69	1,88				
5 ^d - CS		34,85		6,65					
6 ^a - CN	47,41	35,98	-0,33	7,02	1,91	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	CSH ^a	Rustumita ^b
6 ^b - CS		35,86		6,84					
7 ^a - CN	50,08	28,75	+6,75	5,61	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅)(OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a	Girolita ^b
7 ^b - CS		30,69		5,85					

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 4^a - CN e 4^b - CS é possível constatar um incremento de 3,31% no teor de Aluminato de Tetracálcio Hidratado, provavelmente advindo da maior disponibilidade de Aluminatos fornecidos pela CV (LOTHENBACH et al., 2011). Nas posições 6^a - CN e 6^b - CS é possível observar uma estabilidade no teor de Rustumita.

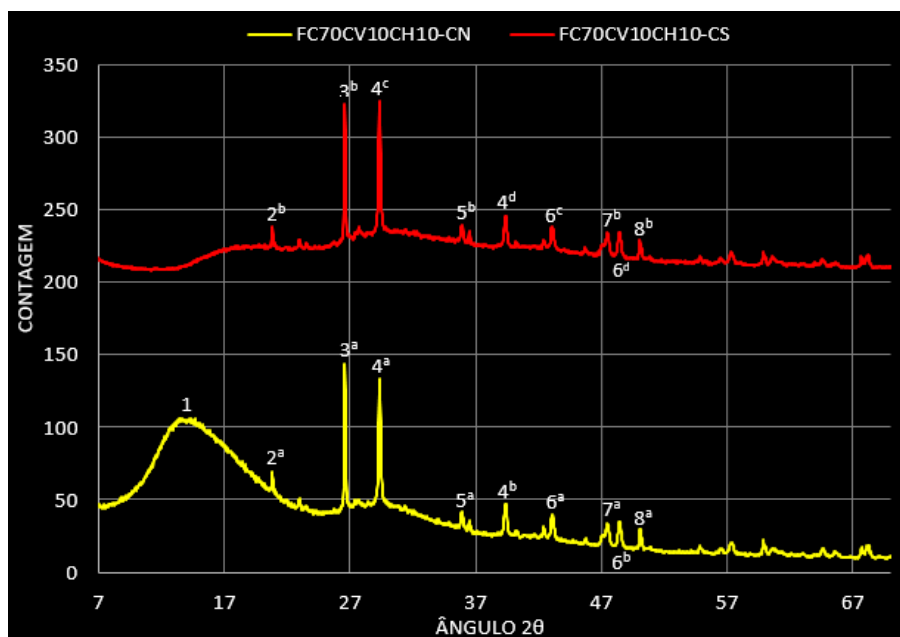
Com relação aos Carbonatos constata-se elevação nos teores, entre CN e CS, de Carbonato de Cálcio em +3,74% e +1,6%, respectivamente, nas posições 5^a - CN e 5^c - CS, bem como 5^b - CN e 5^d - CS. A elevação nos teores destes compostos pode estar relacionada com a transformação de parte da Vaterita (*metaestável*) em Carbonato de Cálcio (*estável*).

Nas posições 7^a - CN e 7^b - CS é possível observar a presença da Girolita com uma variação positiva de +6,75%. A disponibilidade de SiO₂ advinda da formação de Quartzo-α, bem como quantidade relevante de Cálcio oriunda da incorporação de 70% de FC, enseja que seja plausível um incremento da Girolita.

5.3.8 Difratoograma do traço FC70CV10CH10

A Figura 5.16 e a Tabela 5.23 apresentam os resultados das camadas carbonatada (CS) e não carbonatada (CN) do traço FC70CV10CH10.

Figura 5.16 – Difratoograma das camadas CN e CS do traço FC70CV10CH10



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na posição 1 – CN encontra-se um halo amorfo pronunciado relacionada ao CSH da matriz cimentícia apresentando uma conformação mais amorfa conforme Brekailo et al. (2019). O ponto máximo do halo acontece em “*d*” 6,46 e intensidade de pico 8, indicando a posição do CSH Afwillita.

Nas posições 2ª – CN e 2ª – CS observa-se forte variação negativa de -45,07% no teor de Vaterita. Tendo em vista que ocorreu diminuição no teor de Carbonato de Cálcio de -0,31% e -1,44%, respectivamente, nas posições 6ª – CN e 6ª – CS, e 6ª – CN e 6ª – CS, aparentemente não ocorreu a transformação da Vaterita (*metaestável*) em Carbonato de Cálcio (*estável*) (SAUMAN, 1971).

Pode-se justificar a diminuição da Vaterita com base no exposto por Massazza e Daimon (1992), neste caso pode ter ocorrido reação de parcela dos Carbonatos com os Hidratos da matriz cimentícia a qual acontece preferencialmente, através do aumento da solubilidade do Carbonato em soluções eminentemente básicas e/ou com elevados teores de álcalis. Desta maneira, parece plausível que concretos com elevados teores de FC

(FC70CV10CH10) possam ensejar este tipo de ambiente propício ao aumento da solubilidade do Carbonato, visto a adição de 10% de CH neste traço.

Tabela 5.23 – Resultados da DRX das camadas CN e CS do traço FC70CV10CH10

Número CN/CS	2θ	Contagem e variação %	% Total	"d" pico	Grandeza do pico	Fórmula química	Composto e/ou fase	Nome
1 - CN	-	-	-	-	-	-	-	Halo de Amorfismo
2 ^a - CN	20,81	69,22	-45,07	12,11	4,26	8	CaCO ₃	Carbonato
2 ^b - CS		38,02		7,51				Vaterita ^b
3 ^a - CN	26,6	143,67	-14,28	25,14	3,34	10	SiO ₂	Óxido
3 ^b - CS		123,15		24,32				Quartzo-α ^b
4 ^a - CN	29,35	133,78	-7,03	23,4	3,04	1	3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCO ₃ .11H ₂ O	Carboaluminato
4 ^c - CS		124,38		24,55				Mono ou Hemi Carboaluminato ^c
4 ^b - CN	39,41	46,7	-2,96	8,17	2,29	1		
4 ^d - CS		45,32		8,95				
5 ^a - CN	35,91	41,82	-5,14	7,32	2,5	8	Ca ₂ A1(OH) ₆ OH.6H ₂ O	CAH ^a
5 ^b - CS		39,67		7,83				Aluminato de Tetracálcio Hidratado ^b
6 ^a - CN	43,07	38,71	-0,31	6,77	2,09	2		
6 ^c - CS		38,59		7,62			CaCO ₃	Carbonato de Cálcio ^c
6 ^b - CN	48,46	34,63	-1,44	6,06	1,88	2		
6 ^d - CS		34,13		6,74				
7 ^a - CN	47,47	33,67	+1,02	5,89	1,91	7	Ca ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	CSH ^a
7 ^b - CS		34,32		6,78				Rustumita ^b
8 ^a - CN	50,08	29,4	-1,77	5,14	1,82	8	Ca ₄ (Si ₆ O ₁₅)(OH) ₂ .3H ₂ O	CSH ^a
8 ^b - CS		28,88		5,7				Girolita ^b

(a) Notação química do CP; (b) Classificação segundo Highway Research Board (1972);
(c) Classificação segundo Vazquez (1971)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nas posições 3^a – CN e 3^b – CS identifica-se uma redução de -14,28% no teor de Quartzo-α. Neste caso pode ter ocorrido carbonatação da Afwillita, visto que o halo amorfo não aparece no difratograma da CS. Todavia, este incremento no teor de SiO₂ não foi detectado pela DRX tendo em vista que a descalcificação do CSH gera a formação de um gel de sílica com uma estrutura altamente porosa (CASCUDO; CARASEK, 2011). Nas posições 4^a – CN e 4^c – CS, e 4^b – CN e 4^d – CS constata-se a redução de -7,03% e -2,96%, respectivamente, no teor de Carboaluminatos conforme indicação de Pauletti (2009).

Nas posições 5^a – CN e 5^b – CS observa-se redução de -5,14% no teor de Aluminato de Tetracálcio Hidratado, provavelmente a partir de conversão em Hidrogranada que é a fase estável deste composto (ROJAS; CABRERA, 2002).

Nas posições 7^a – CN e 7^b – CS, bem como 8^a – CN e 8^b – CS identifica-se aumento de 1,02% e uma redução de -1,77% no teor de Rustumita e Girolita, respectivamente. Tendo

em vista que as variações foram reduzidas, pode-se dizer que ocorreu estabilidade nos teores de CSH neste traço.

5.3.9 Análise integrada da difração de raios-X (DRX) na CS

Neste item é realizada análise integrada dos resultados da difração de raios-X (DRX) entre todos os traços estudados em relação a CS visando observar a tendência na formação dos compostos durante a carbonatação. Na Tabela 5.24 estão anotadas as principais características dos traços estudados como: a) coeficiente de carbonatação – kc ($mm.t^{0,5}$); b) Vaterita; c) Quartzo- α ; d) Xonotitla; e) Carboaluminato; f) Aluminato de Tetracálcio Hidratado; g) Carbonato de Cálcio; h) Rustumita; i) Girolita; j) Brucita.

Tabela 5.24 – Características dos traços estudados quanto a CS

Características dos traços - CS	Sentido	Traços “normais” (TN)				Traços com CH (TC)		Traços com pintura (TP)	
		A	B	C	D	E	F	G	H
Coeficiente de carbonatação (kc)**	^ (Sobe)	0	0,21	1,62	9,93	0,34	3,74	0	0,27
Vaterita* (“ d ” - 4,26)	∇ (Desce)	-	86,14	42,07	36,46	46,15	38,02	-	39,93
Quartzo- α * (“ d ” - 3,34; 1,54)	∇ (Desce)	-	201,7	164,52	110,36	177,26	144,43	-	118,49
Xonotitla* (“ d ” - 3,23)	∇ (Desce)	-	58,76	36,2	34,41	42,42	37,92	-	40,32
Carboaluminato* (“ d ” - 3,04; 2,29)	^ (Sobe)	-	143,83	164,41	182,05	129,25	169,7	-	182,9
Aluminato de Tetra Cálcio Hidratado* (“ d ” - 2,46; 2,5)	∇ (Desce)	-	81,42	69,83	66,86	69,12	68,28	-	73,77
Carbonato de Cálcio* (“ d ” - 2,28; 2,09; 1,88)	^ (Sobe)	-	105,09	114,94	125,39	99,71	118,04	-	124,07
Rustumita* (“ d ” - 1,91)	^ (Sobe)	-	28,17	32,5	35,25	28,76	34,32	-	35,86
Girolita* (“ d ” - 1,82)	∇ (Desce)	-	43,24	31,01	25,63	37,02	28,88	-	30,69
Brucita* (“ d ” - 1,37)	∇ (Desce)	-	21,12	16,77	15,93	24,64	18,86	-	17,9

A – REF; B – FC50; C – FC60; D – FC70CV10; E – FC60CH10; F – FC70CV10CH10; G – FC60P; H – FC70CV10P; *Contagem; ** $mm.t^{0,5}$

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A Tabela 5.24 mostra que à medida que o coeficiente de carbonatação acelerada (kc) aumenta nas misturas ocorre: a) redução na Vaterita, Quartzo- α , Xonotitla, Aluminato de

Tetracálcio Hidratado, Girolita e Brucita; b) elevação no Carboaluminato, Carbonato de Cálcio e Rustumita.

Também foi realizada a correlação das características de cada traço em relação ao kc. Foi observado R^2 médio de 0,95 nos traços normais (TN); 0,81 nos normais e CH (TN+TC); 0,46 nos normais, CH e pintura (TN+TC+TP).

A diminuição do R^2 nos diferentes traços mostra que os compostos e/ou fases formados durante a carbonatação acelerada não possuem a mesma gênese. Ou seja, a formação destes compostos possui uma dinâmica própria de formação quando da adição de CH e/ou incorporação da pintura. Desta maneira fica bastante claro que os 3 tipos de traços (*normal - TN, com CH - TC e com pintura - TP*) devem ser analisados de forma separada.

A análise dos traços normais é a mais adequada tendo em vista o número de misturas (FC50, FC60 e FC70CV10) o que propicia interpretação mais qualificada das relações entre os compostos e/ou fases formados e o processo de carbonatação acelerada como um todo.

A análise da contagem dos compostos e/ou fases formadas nos traços estudados e sua aderência com a carbonatação acelerada, indica que há grande correlação, em especial nos traços normais, ou seja, à medida que a carbonatação aumenta ocorre: a) elevação na contagem de Carbonato de Cálcio com $R^2=1$; b) diminuição no teor de Vaterita indicando a transformação em Carbonato de Cálcio com $R^2=0,89$; c) redução na contagem de Xonotila e Girolita indicando a descalcificação do CSH com um $R^2=0,92$ (*média*); d) elevação na contagem de Rustumita que é um CSH formado a partir de Carbonatos com $R^2=0,99$; e) diminuição na contagem de Brucita indicando o consumo de Portlandita com $R^2=0,9$.

Em relação a diminuição da Vaterita por ocasião do aumento na carbonatação, pode-se dizer que, ocorreu a transformação deste composto, menos estável, para sua forma mais estável (*Carbonato de Cálcio*) (SAUMAN, 1971), visto que houve aumento da contagem no Carbonato de Cálcio com a elevação da carbonatação.

Destaca-se, também, que a contagem da Vaterita nos traços com CH é maior do que nos sem CH, pois sua adição conduz à elevação no teor de Cálcio que, propicia maior formação de Vaterita. Por outro lado, há diminuição na contagem de Carbonato de Cálcio pode estar relacionada à redução na carbonatação observada nos traços com CH.

Observa-se ainda que a Vaterita possui contagem no FC70CV10P maior que no FC70CV10, cujo comportamento pode estar relacionado à carbonatação do traço com pintura ser inferior ao sem pintura.

A diminuição do Quartzo- α , à medida que a carbonatação aumenta, é devida à descalcificação do CSH o que implica em um maior teor de SiO_2 (SHAH; BISHNOI, 2018).

Todavia, este incremento no teor de SiO_2 não é detectado pela DRX tendo em vista que a descalcificação do CSH gera um gel de sílica com uma estrutura altamente porosa (CASCUDO; CARASEK, 2011). Desta maneira ocorre fenômeno inverso, ou seja, a diminuição na contagem de Quartzo- α .

Importante salientar que a contagem de Quartzo- α nos traços com CH é maior que nos sem CH, pois a contagem dos CSH's (*Xonotitla*, *Rustumita* e *Girolita*) é maior nos traços com CH elevando, assim, o teor de SiO_2 por ocasião da carbonatação do CSH. O mesmo comportamento pode ser observado quando da comparação do FC70CV10 com o FC70CV10P.

Quanto a *Xonotitla*, observa-se diminuição na contagem à medida que a carbonatação aumenta devido ao processo de descalcificação deste CSH. Também, neste caso, é possível constatar que os traços com CH apresentam uma contagem de *Xonotitla* maior que as misturas sem CH, possivelmente devido a incorporação do composto propiciar um aumento na contagem deste CSH. No traço com pintura ocorre a mesma situação, pois a contagem da *Xonotitla* é maior que na mistura sem pintura. Neste caso a menor carbonatação do traço com pintura, possivelmente, é a responsável pela maior contagem da *Xonotitla*.

A elevação na contagem de Carboaluminatos, por ocasião do aumento da carbonatação, está relacionada à maior disponibilidade de FC. Nos traços com CH observa-se diminuição no Carboaluminato em relação aos traços sem CH. Este comportamento está relacionado à adição da CH que diminuiu o processo de carbonatação dos traços FC60CH10 e FC70CV10CH10 contribuindo para maior disponibilidade de Cálcio na formação de Carboaluminatos. Já em relação ao traço com pintura há diminuta elevação de 0,47% na contagem de Carboaluminatos em relação ao traço sem pintura indicando estabilidade.

A diminuição na contagem do Aluminato de Tetracálcio Hidratado por ocasião do aumento da carbonatação está relacionada a migração dos Aluminatos para a formação dos Carboaluminatos. Observa-se que a contagem do traço com pintura é maior que a do sem devido a menor carbonatação da mistura com pintura.

Conforme apresentado anteriormente, o Carbonato de Cálcio aumenta sua contagem com a elevação da carbonatação devido a transformação da Vaterita. Os traços com CH possuem contagem de Carbonato de Cálcio inferior às misturas sem CH devido à menor carbonatação das primeiras.

No caso das misturas com pintura a diferença é muito pequena (1,06%) em relação as sem indicando que a menor carbonatação do traço FC70CV10P não possui influência na formação do Carbonato de Cálcio quando comparado ao FC70CV10.

Quanto a Rustumita é possível observar um crescimento na contagem por ocasião do aumento na carbonatação. Sua formação se dá, preferencialmente, a partir de Carbonatos, desta maneira quanto maior a quantidade deste composto na matriz cimentícia mais elevada será a contagem do CSH.

Assim, nos traços com CH a contagem da Rustumita é inferior às misturas sem CH devido à menor carbonatação das primeiras (*menor contagem de Carbonato de Cálcio*). No caso do traço com pintura, o teor de Carbonato de Cálcio é muito próximo da mistura sem (1,06%) levando a uma contagem da Rustumita igualmente próxima (1,73%).

Observa-se que há diminuição da Girolita por ocasião do aumento da carbonatação relacionada à descalcificação do CSH. É possível verificar que nos traços com CH e com pintura a contagem da Girolita é maior em relação aos traços sem CH e sem pintura. Este comportamento está relacionado aos traços com CH e pintura apresentarem carbonatação menos intensa diminuindo a descalcificação da Girolita.

Em relação a diminuição da Brucita por ocasião do aumento da carbonatação, este comportamento está relacionado com a carbonatação da Portlandita, porque quanto maior a carbonatação no traço menor o teor de Portlandita e mais reduzida será a contagem da Brucita.

Nota-se que nos traços com CH o teor de Brucita é maior que nas misturas sem, devido ao maior teor de Portlandita. Também no traço com pintura é possível constatar a mesma situação, pois o FC70CV10P apresenta uma contagem de Brucita maior que o FC70CV10 devido à menor carbonatação do primeiro.

5.3.10 Análise integrada da difração de raios-X (DRX) na CN

No presente item é realizada uma análise integrada dos resultados, entre todos os traços estudados, em relação a CN visando observar a tendência na formação dos compostos, em especial quanto a resistência à compressão.

Para tanto foi elaborada a Tabela 5.25 onde foram anotadas as principais características dos traços estudados como: a) resistência à compressão (*MPa*); b) Vaterita; c) Quartzo- α ; d) Xonotitla; e) Carboaluminato; f) Aluminato de Tetracálcio Hidratado; g) Carbonato de Cálcio; h) Rustumita; i) Girolita; j) Brucita.

Tabela 5.25 – Características dos traços estudados quanto a CN

Características dos traços - CN	Sentido	Traços “normais” (TN)				Traços com CH (TC)		Traços com pintura (TP)	
		A	B	C	D	E	F	G	H
Resistência a compressão	∇ (Desce)	127,2	87,8	65,7	51,8	88,6	43,5	65,7	51,8
Vaterita* (“d” - 4,26)	∇ (Desce)	80,98	43,61	38,53	50,35	46,24	69,22	50,8	39,08
Quartzo-α* (“d” - 3,34; 1,54)	∇ (Desce)	197,77	171	159,57	180,82	192,78	165,86	163,87	142,48
Xonotitla* (“d” - 3,23)	∇ (Desce)	60,81	37,38	36,92	36,21	44,42	50,1	42,62	38,16
Carboaluminato* (“d” - 3,04; 2,29)	∧ (Sobe)	96,26	145,21	167,58	165,08	120,62	180,48	135,69	174,96
Aluminato de Tetra Cálcio Hidratado* (“d” - 2,46; 2,5)	-	73,79	71,22	69,97	74,77	75,11	77,62	74,92	72,28
Carbonato de Cálcio* (“d” - 2,28; 2,09; 1,88)	∧ (Sobe)	84,76	105,09	113,54	114,51	98,79	123,97	107,29	114,53
Rustumita* (“d” - 1,91)	∧ (Sobe)	21,34	30,91	31,28	31,63	27,78	33,67	28,73	35,98
Girolita* (“d” - 1,82)	∇ (Desce)	37,39	37,69	34,2	33,59	36,3	29,4	40,58	28,75
Brucita* (“d” - 1,37)	∇ (Desce)	28,92	20,89	18,35	25,49	21,82	18,76	20,68	19,17

A – REF; B – FC50; C – FC60; D – FC70CV10; E – FC60CH10; F – FC70CV10CH10;
G – FC60P; H – FC70CV10P; *Contagem; **mm.t^{0,5}

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A Tabela 5.25 mostra que à medida que a resistência à compressão diminui nas misturas ocorre: a) redução na Vaterita, Quartzo-α, Xonotitla, Girolita e Brucita; b) elevação no Carboaluminato, Carbonato de Cálcio e Rustumita.

Também foi realizada a correlação das características de cada um dos tipos de traços (traços normais – TN, traços com CH – TC, traços com pintura – TP) em relação a resistência à compressão. Foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) para cada tipo, obtendo-se R^2 médio de 0,95 nos traços normais (TN); 0,83 nos normais e CH (TN+TC); 0,74 nos normais, CH e pintura (TN+TC+TP).

A diminuição do R^2 nos diferentes tipos de traço mostra que os compostos e/ou fases formados não possuem a mesma gênese, ou seja, cada composto possui uma dinâmica própria de formação quando da adição de CH e/ou incorporação da pintura. Desta maneira fica evidente que os 3 tipos de traços (normal- TN, com CH – TC e com pintura - TP) devem ser analisados de forma separada.

Neste sentido a análise dos traços normais (*sem CH ou pintura*) é a mais adequada tendo em vista o número de misturas (*REF, FC50, FC60 e FC70CV10*) o que propicia interpretação mais adequada das relações entre os compostos e/ou fases formados.

Assim, há correlações muito significativas, em especial nos traços normais, à medida que a resistência à compressão diminui ocorre: a) diminuição no CSH (*Xonotitla e Girolita*) com um R^2 médio de 0,95 corroborando a redução na resistência à compressão; b) diminuição na Brucita com um R^2 de 0,85 indicando uma menor quantidade de Portlandita, possivelmente associada a menor formação de CSH o que reduz a resistência à compressão do concreto; c) aumento na Rustumita com R^2 de 0,99 indicando a formação de um CSH relacionado a teores mais elevados de Carbonatos e que apresentam resistências à compressão inferiores.

Nas análises realizadas no Item 5.1.1.2 a respeito da resistência à compressão a 91 dias destaca-se a explicação de Courard et al. (2018) sobre as razões que levaram os traços com incorporação de FC a apresentarem uma resistência à compressão inferior ao REF. Os autores explanam que teores elevados de Carbonatos aumentam a porosidade e conseqüentemente impedem a elevação da resistência à compressão.

Na Tabela 5.25 observa-se que a medida que o teor de Rustumita aumenta ocorre diminuição da resistência à compressão, indicando disponibilidade maior de Carbonatos na matriz cimentícia. Assim, todos os traços com incorporação de FC apresentaram elevação nos teores de Carbonatos o que dificultou o desenvolvimento da resistência à compressão em relação ao REF.

Outra explicação para o menor desenvolvimento da resistência à compressão dos traços com FC em relação ao REF foi dada por Dhir et al. (2007), quando atribuem o fenômeno ao efeito “*diluição*”, tendo em vista a substituição de partículas de um material mais reativo (*CPV-ARI*), por outras de menor reatividade e/ou inerte (*FC*). Como consequência deste efeito ocorre a diminuição dos produtos de hidratação, resultando na minoração da resistência à compressão do concreto em todas as idades (IRASSAR, 2009).

Corroborando as afirmação de Dhir et al. (2007) e Irassar (2009), na Tabela 5.25 observa-se que à medida que a resistência à compressão diminui ocorre, igualmente, uma redução no CSH (*Xonotitla e Girolita*), indicando que, com o aumento no teor de FC, ocorre uma diminuição nos produtos de hidratação.

No Item 5.1.1.2 foi atribuído a adição de CH, ao FC60CH10, como sendo o principal motivo que levou esta mistura a apresentar uma resistência à compressão (*88,6 MPa*) 0,8% maior que o FC50 (*87,9 MPa*). Na Tabela 5.25 é possível constatar que o FC60CH10 apresentou um teor de CSH (*Xonotitla, Girolita e Rustumita*) 2,09% superior ao FC50. Esta pequena diferença na formação de CSH em favor do FC60CH10 está relacionada a CH que

propicia uma elevação no grau de reação com os Silicatos, incrementando a formação de compostos hidráulicos (HOPPE FILHO, 2008).

No mesmo Item 5.1.1.2, em relação a diferença de resistência à compressão de 16% entre o FC70CV10 e o FC70CV10CH10, levantou-se a possibilidade do fenômeno ter ocorrido pela maior disponibilidade de Carbonatos não combinados na matriz cimentícia conjugado a menor disponibilidade de Aluminatos para a formação de Carboaluminatos.

Na Tabela 5.25 é possível constatar que o traço com CH apresentou um teor de 11,57% e 5,98% de CSH (*Xonotitla, Girolita e Rustumita*) e Carboaluminato, respectivamente, maior que a mistura sem CH o que indicaria uma resistência maior do FC70CV10CH10.

Este mesmo traço apresentou teores de 37,48%, 8,26% e 6,45% de Vaterita, Carbonato de Cálcio e Rustumita, respectivamente maior que a mistura sem CH o que indicaria uma maior disponibilidade de Carbonatos na matriz cimentícia que, segundo Courard et al. (2018), aumentaria a porosidade e, conseqüentemente, diminuiria a resistência à compressão.

A partir dos resultados da resistência à compressão de ambos os traços é possível inferir que a maior disponibilidade de Carbonatos do traço com CH foi determinante para a diminuição da resistência em relação a mistura sem CH.

Ainda no Item 5.1.1.2 destacou-se o bom desempenho do FC70CV10 em relação a resistência à compressão pois o traço possui, somente, 20% de CP e obteve uma resistência à compressão de 51,8 MPa aos 91 dias.

Neste sentido cabe uma comparação com o FC60 que é o traço mais próximo. A diferença de resistência à compressão entre ambos os traços foi de 26,83% ($FC60 = 65,7 MPa$), todavia ocorreu uma variação de 0,66% na contagem de CSH (*Xonotitla, Girolita e Rustumita*) em favor do FC60. Neste sentido, poder-se-ia esperar uma diferença na resistência à compressão mais reduzida entre os dois traços.

É peculiar observar um traço que possui a metade do teor de CP apresentar, praticamente, a mesma quantidade de CSH. Este fenômeno deve-se, principalmente, a formação de CSH secundário advindo das reações pozolânicas entre a CV, FC e CP conforme descrito por Deschener et al. (2012) e De Weerd et al. (2011).

Contudo o FC70CV10 apresentou um teor 30,67% maior de Vaterita que o FC60, indicando a presença de Carbonatos não combinados na matriz cimentícia o que pode acarretar um aumento na porosidade e, conseqüentemente, uma redução na resistência à compressão segundo Courard et al. (2018).

5.4 TERMOGRAVIMETRIA ANALÍTICA E DIFERENCIAL (TG/DTG)

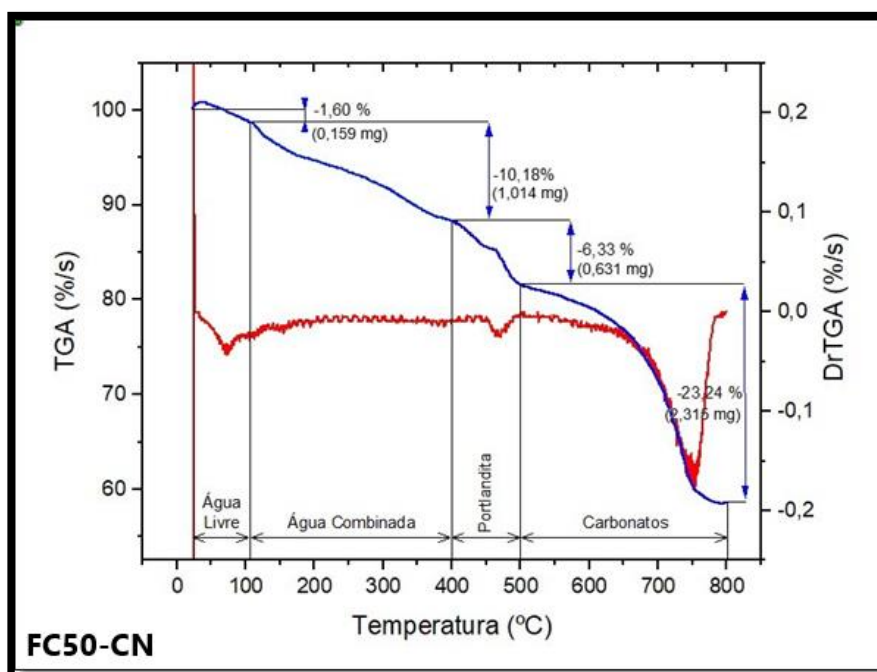
No presente item são apresentados os resultados dos teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada nos diferentes traços estudados para as camadas CN e CS, bem como a discussão dos resultados. Conforme a revisão de literatura, as faixas de temperatura que estão relacionadas às perdas de massa dos compostos podem variar de acordo com os autores.

No presente trabalho foram utilizadas faixas de temperatura próximas em relação a cada tipo composto baseados em Bhatti (1986), Thiery et al. (2007) e Lothenbach et al. (2016), conforme Item 4.5.2.1.

A posição dos picos de cada composto mostrados nos diagramas de DTG referem-se aos intervalos de temperaturas utilizados nos cálculos. Observa-se na Figura 5.17 exemplo de gráfico de dados de TG/DTG, referente ao FC50-CN.

Com relação aos demais traços os resultados podem ser consultados no APÊNDICE E. Com relação as variações dos teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada, eles podem ser observados nas Tabelas 5.26 e 5.27.

Figura 5.17 – TG/DTG para o traço FC50-CN



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.26 – Teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada na camada CN

Características dos traços - CN	Sentido	Traços “normais” (TN)				Traços com CH (TC)		Traços com pintura (TP)	
		A	B	C	D	E	F	G	H
Resistência a compressão**	∇ (Desce)	127,2	87,8	65,7	51,8	88,6	43,5	65,7	51,8
Carbonatos*	∧ (Sobe)	3,2	23,24	25,6	31,5	25,2	31,05	25,0	31,24
Portlandita*	∇ (Desce)	7,52	6,33	6,01	5,22	6,22	4,21	5,94	5,35
Água combinada*	∇ (Desce)	12,15	10,18	9,68	8,41	10,03	6,78	9,56	8,64

A – REF; B – FC50; C – FC60; D – FC70CV10; E – FC60CH10; F – FC70CV10CH10;
G – FC60P; H – FC70CV10P; *%; **MPa

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 5.27 – Teores de Carbonatos, Portlandita e água combinada na camada CS

Características dos traços - CS	Sentido	Traços “normais” (TN)				Traços com CH (TC)		Traços com pintura (TP)	
		A	B	C	D	E	F	G	H
Coefficiente de Carbonatação (kc)**	∧ (Sobe)	0	0,21	1,62	9,93	0,34	3,74	0	0,27
Carbonatos*	∧ (Sobe)	-	23,9	29,66	50,96	25,98	42,56	-	32,32
Carbonatos - Variação CS/CN*	∧ (Sobe)	-	-2,77	-13,68	-38,19	-3,00	-27,04	-	-3,34
Portlandita*	∇ (Desce)	-	5,98	0	0	4,81	0	-	4,92
Portlandita - Variação CS/CN*	∧ (Sobe)	-	+5,85	0	0	+29,31	0	-	+8,74
Água combinada*	∇ (Desce)	-	9,59	7,3	4,74	7,81	5,02	-	7,88
Água combinada - Variação CS/CN*	∧ (Sobe)	-	+6,15	+32,6	+77,43	+28,42	+35,06	-	+9,64

A – REF; B – FC50; C – FC60; D – FC70CV10; E – FC60CH10; F – FC70CV10CH10;
G – FC60P; H – FC70CV10P; *Contagem; **mm.t^{-0,5}

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

É importante salientar que a determinação de um dado composto nem sempre ocorre de forma clara nos gráficos dos ensaios termogravimétricos. Como exemplo cita-se o CSH gel, que apresenta perda de água de modo contínuo estando inserido em ampla faixa de temperatura. Logo, não há como se identificar o sinal próprio que caracterize este composto no gráfico de TG/DTG (BLANCO et al., 1992). Em contraponto pode-se destacar, como um exemplo de sinal característico na TG/DTG, a Portlandita e a Etringita que perdem água a uma temperatura constante (SILVEIRA, 2019).

5.4.1 Análise integrada da TG/DTG na CN

No presente item é realizada uma análise integrada dos resultados da TG/DTG em relação a CN visando observar a tendência na formação de Carbonatos e Portlandita, bem como água combinada e sua relação com a resistência à compressão. Para tanto é utilizada a Tabela 5.26 mostrando que à medida que a resistência à compressão diminui nas misturas ocorre: a) redução da Portlandita e água combinada; b) elevação nos Carbonatos.

Também é realizada a correlação das características de cada um dos tipos de traços (*traços normais* – *TN*, *traços com CH* – *TC*, *traços com pintura* – *TP*) em relação a resistência à compressão. Foi determinado o coeficiente de determinação (R^2) para cada tipo de traço, com valor médio de 0,97 nos normais (*TN*); 0,95 nos normais e CH (*TN+TC*); 0,93 nos normais, CH e pintura (*TN+TC+TP*).

Em relação ao teor de Carbonatos, justifica-se sua presença conforme apresentado no Item 5.3.1 e referendado por Silveira (2019) e Thiéry et al. (2007). Da mesma maneira que observado na DRX constata-se que o teor de Carbonatos em CN é inversamente proporcional à resistência à compressão porque está relacionada a elevação da quantidade de Cálcio devido a incorporação de FC. Com a substituição de CP por FC a resistência à compressão é minorada conforme colocado anteriormente.

Verifica-se uma variação de, aproximadamente, 10 vezes nos Carbonatos entre o menor valor do REF (3,2%) e o maior do FC70CV10 (31,5%), reflexo de um consumo de 42 e 293 kg.m⁻³ de FC (Tabela 4.12), respectivamente, gerando um valor 7 vezes maior do segundo em relação ao primeiro traço. Na mesma linha, a Tabela 5.25 apresenta uma diferença menor (46,26%) nos Carbonatos entre os dois traços citados demonstrando que o ensaio de DRX possui um viés mais qualitativo em detrimento de uma abordagem quantitativa da TG/DTG.

Outro aspecto a ser destacado diz respeito a excelente correlação entre a variação da resistência à compressão e o teor de Carbonatos ratificando as colocações de Courard et al. (2018) sobre as razões que levaram os traços com incorporação de FC a apresentarem uma resistência à compressão inferior ao REF. Com efeito, os autores colocam que teores elevados de Carbonatos aumentam a porosidade e, conseqüentemente, impedem a elevação da resistência à compressão.

Diferentemente do ensaio de DRX, na TG/DTG foi constatada a presença de Portlandita, sendo que o seu teor diminui à medida em que ocorre redução na resistência à compressão. Sendo o CSH o principal composto que contribui para a resistência à compressão

do concreto, sua quantidade resultante das reações de hidratação implica em um efeito diretamente proporcional na formação de Portlandita, pois ambos são participantes da mesma reação química, em proporções recíprocas.

Assim, quanto maior o teor de Portlandita, mais elevada será a resistência à compressão do concreto, ou quanto maior a substituição de CP por FC haverá menor formação tanto de CSH quanto de Portlandita, que se reflete na diminuição da resistência à compressão do material.

Apesar de o ensaio de DRX não ter detectado picos relevantes de Portlandita sabe-se, através da contagem de Brucita, da sua presença. Conforme Souza (2006), para a formação da Brucita há um consumo acentuado da Portlandita à qual fornece os íons oxidrila havendo, portanto, uma redução no pH da matriz cimentícia. Assim, quanto maior o teor de Brucita mais elevada será concentração de Portlandita e vice versa.

Conforme a Tabela 5.25 a DRX indicou uma variação de 54,16% na contagem da Brucita, entre o REF (28,92) e o FC70CV10CH10 (18,76), assim pode-se dizer que o primeiro possui um teor de Portlandita maior que o segundo. Já no ensaio de TG/DTG a diferença no teor de Portlandita entre os dois traços é de 78,62% conforme a Tabela 5.26. Importante notar que na DRX a resistência à compressão diminuiu à medida que o teor de Brucita foi reduzido da mesma maneira que a Portlandita na TG/DTG.

Outro ponto (*TG/DTG*) é destacado por Santos (2020) em relação à Portlandita onde a presença de Carbonatos na matriz cimentícia pode afetar sua formação. Neste caso o ensaio de TG/DTG mostrou que à medida que o teor de Carbonatos aumentou, ocorreu uma diminuição da presença de Portlandita. O mesmo fenômeno ocorreu na DRX em relação ao teor de Carbonatos e de Brucita, reforçando as colocações de Souza (2006) sobre a relação de proporcionalidade entre Portlandita e Brucita.

Reforçando o posicionamento de Santos (2020), tem-se as colocações de Song et al. (2006) e Wu e Ye (2017) os quais afirmam que, com o aumento no teor de Calcita, ocorre, de maneira simultânea a desidratação da Portlandita, justificando, assim, a diminuição no seu teor na matriz cimentícia.

Em relação ao teor de água combinada observa-se na Tabela 5.26 que, a resistência à compressão diminuiu juntamente com a redução da água combinada. Este comportamento reflete que a quantidade de água combinada detectada nos ensaios de TG/DTG corresponde, proporcionalmente, à formação de CSH. Em outras palavras, o teor de água combinada constitui-se em uma medida indireta da presença de CSH na matriz cimentícia (SILVEIRA, 2019).

O posicionamento de Silveira (2019) encontra eco no presente trabalho através do ensaio de DRX onde houve uma redução proporcional entre o teor de Girolita e Xonotitla e o valor da resistência à compressão. Outra maneira de relacionar o teor de água combinada com a quantidade de CSH na matriz cimentícia, refere-se a diminuição da Portlandita e água combinada na TG/DTG à medida que a resistência à compressão diminui. Conforme colocado anteriormente, quanto maior a substituição de CP por FC haverá menor formação tanto de CSH quanto de Portlandita, que se reflete na resistência à compressão do concreto.

Um outro ponto que corrobora a inter-relação entre água combinada e formação de CSH e seus reflexos na resistência à compressão pode ser observada nos ensaios de DRX porque, à medida que a contagem de Xonotitla diminuiu, a resistência à compressão apresentou o mesmo comportamento. Neste caso, conforme Tabela 5.25, nota-se que houve uma redução de 67,94% entre a maior contagem do REF (60,81) e o FC70CV10 (36,21) com o menor valor.

Observa-se comportamento semelhante no ensaio de TG/DTG onde, à medida que o teor de água combinada diminuiu a resistência à compressão, apresentou a mesma tendência. Para este ensaio nota-se que houve uma redução de 79,2% (Tabela 5.26) entre o maior percentual do REF (12,15) e o FC70CV10CH10 (6,78) com o menor valor.

Conforme discutido nos itens 5.1.1.2 e 5.3.10, foi atribuído a adição da CH ao FC60CH10 como sendo a principal razão para o desenvolvimento de uma resistência a compressão de 88,6 MPa, 0,91% superior ao FC50 (87,8 MPa), tendo em vista que a incorporação deste material propicia uma elevação no grau de reação com os Silicatos, incrementando a formação de compostos hidráulicos (HOPPE FILHO, 2008).

O ensaio de TG/DTG corrobora a afirmação deste autor bem como os resultados de resistência à compressão dos dois traços, ao constatar uma diferença de 1,74% na Portlandita e 1,49% na água combinada entre as duas misturas, lembrando que o teor de Portlandita e água combinada são medias indiretas da quantidade de CSH na matriz cimentícia. Para corroborar os dados apresentados, o ensaio de DRX apresentou uma diferença de, apenas, 2,09% no teor de CSH entre os dois traços conforme a Tabela 5.25.

Em relação a diferença de 16% na resistência à compressão entre o FC70CV10 (51,8 MPa) e o FC70CV10CH10 (43,5 MPa) colocou-se, no Item 5.3.10, que, a partir da DRX, o efeito predominante teria sido o maior teor de Carbonatos no traço com CH (COURARD et al., 2018). Por outro lado, no ensaio de TG/DTG o FC70CV10CH10 apresentou um teor de Carbonatos 1,45% inferior ao FC70CV10 conforme a Tabela 5.26. No entanto, os teores de Portlandita e água combinada foram 23,99% e 24,04%, respectivamente,

maiores no traço sem CH em relação ao com CH, chancelando a maior resistência a compressão do FC70CV10.

5.4.2 Análise integrada da TG/DTG na CS

No presente item é realizada análise integrada dos resultados da TG/DTG entre os traços estudados em relação a CS visando observar os compostos formados. Na Tabela 5.27 estão anotados os seguintes compostos dos traços estudados: a) coeficiente de carbonatação ($mm.t^{0,5}$); b) Carbonatos (%); c) Portlandita (%); d) água combinada (%). É mostrado que a medida que o coeficiente de carbonatação aumenta nas misturas ocorre: a) redução da Portlandita e água combinada; b) elevação nos Carbonatos e variação da relação CS/CN (*Carbonatos, Portlandita e água combinada*).

Também é realizada a correlação das características de cada um dos tipos de traços (*traços normais – TN, traços com CH – TC, traços com pintura – TP*) em relação ao coeficiente de carbonatação. Para tanto foi determinado o coeficiente de determinação (R^2) para cada tipo de traço. Observa-se R^2 médio de 0,99 nos traços normais (*TN*); 0,94 nos normais e CH (*TN+TC*); 0,92 nos normais, CH e pintura (*TN+TC+TP*).

Como esperado, todas as misturas apresentaram um teor de Carbonatos na CS superior a CN, como também, a quantidade de Carbonatos formados foi proporcional ao kc e que quanto mais elevada for à carbonatação (*aumento do kc*), maior será a variação CS/CN.

Constata-se ainda na Tabela 5.27 que o teor de Carbonatos nos traços com 70% de FC foi muito similar em CN com uma diferença média de 0,96%, por outro lado, na camada CS o valor sobiu para 36,36%, indicando modificações substanciais na matriz cimentícia advindo do processo de carbonatação.

O FC70CV10 apresentou a maior variação CS/CN (-38,19%) indicando o elevado kc medido ($9,93 mm.t^{0,5}$) fruto da reduzida reserva alcalina ($97 kg.m^{-3}$ de CP), bem como das reações pozolânicas advindas da presença da CV. O FC70CV10CH10 ($kc = 3,74 mm.t^{0,5}$) apresentou uma variação CS/CN menor (-27,04%) resultante da reposição de parte da reserva alcalina pela adição de CH. Por fim, o FC70CV10P ($kc = 0,27 mm.t^{0,5}$) apresentou a menor variação CS/CN (-3,34%) oriunda da dificuldade de penetração do CO_2 devido à presença da película protetora (*pintura acrílica*). Nos traços com 60% de FC observa-se o mesmo comportamento, todavia com variações CS/CN menores devida a maior reserva alcalina (40% de CP).

Nos traços normais (*FC50*, *FC60* e *FC70CV10*) é possível observar teor de Carbonatos relevantemente menor na CS do *FC50* (23,9%) e *FC60* (29,66%) em relação ao *FC70CV10* (50,96%), cujo comportamento pode estar relacionado a variação na velocidade de reação da Portlandita e do CSH com CO₂ relatado por Castellote et al. (2008). Os autores colocam que a presença da CV acelera as reações pozolânicas e de carbonatação, consumindo, desta maneira, a Portlandita a qual apresenta reação com o CO₂ mais lenta. Como consequência ocorre formação mais rápida de Carbonatos pela interação do CSH com o CO₂.

Por outro lado, nos traços *FC50* (50% de CP) e *FC60* (40% de CP) houve mais disponibilidade de Portlandita devido ao maior teor de CP, com isso a formação de Carbonatos ocorreu preferencialmente pela carbonatação. Ou seja, a reação mais lenta entre a Portlandita e o CO₂ se traduz em maior tempo para a formação dos Carbonatos.

Destaca-se o comportamento do *FC50* (87,8 MPa/0,21 mm.t^{-0,5}) e do *FC60CH10* (88,6 MPa/0,34 mm.t^{-0,5}) em relação a carbonatação. Apesar de ambos os traços terem apresentado uma diferença em relação a resistência à compressão de, apenas, 0,91%, a variação do *kc* de ambos foi de 61,9% indicando uma alteração substancial na microestrutura devido a presença de CH na mistura.

No ensaio de DRX (*qualitativo*) o teor de Carbonatos do *FC60CH10* foi 5,11% inferior ao *FC50* indicando que a carbonatação do primeiro, teoricamente, poderia ser menor que o segundo. Contudo, na TG/DTG (*quantitativo*) ocorreu uma inversão sendo verificado um teor de 8,7%. No restante, em ambos os ensaios, a indicação é que o *FC50* possui um teor maior de Portlandita (24,32%), água combinada (22,79%) e CSH (28,4%). Assim, o *FC50* por possuir uma maior reserva alcalina (*Portlandita*) a reação com o CO₂ é mais lenta traduzindo-se em maior tempo para a formação dos Carbonatos e, conseqüentemente, apresentando velocidade de carbonatação menos intensa (*menor kc*) (CASTELLOTE et al., 2008).

A proporcionalidade entre teor de Carbonatos na CS, variação CS/CH e *kc*, pode ser observada através do R², variando entre 0,9 e 1 a depender dos tipos de traços escolhidos. A proporcionalidade entre os aspectos citados está relacionada com a microestrutura da matriz cimentícia que compõe cada traço e suas alterações advindas do processo de carbonatação. Em linhas gerais, traços com maior quantidade de CP apresentaram resistência a compressão mais elevadas, uma microestrutura mais densa e menos propícia a carbonatação, refletindo uma diminuição no *kc*, teor de Carbonatos na CS e variação CS/CN.

Em relação a Portlandita observa-se na Tabela 5.27 que somente os traços com *kc*'s menores ou iguais a 0,34 mm.t^{-0,5} apresentaram este composto, sendo que nos demais sua

presença não foi detectada devido ao processo de carbonatação, bem como pelas reações pozolânicas no caso das misturas com CV.

Nos traços FC50, FC60CH10 e FC70CV10P, observou-se uma quantidade de Portlandita média de 5,23%, estes teores remanescentes podem ser oriundos da formação de uma capa de Carbonatos sobre o composto o que tende a prejudicar a entrada do CO₂ conforme Shah e Bishnoi (2018), para os quais este fenômeno é decorrente do rápido consumo de Portlandita logo no início da carbonatação. Não obstante o FC70CV10P possui o bônus da camada protetora através da aplicação da tinta acrílica, a qual ofereceu um maior obstáculo para a difusão do CO₂ na matriz cimentícia.

Apesar do ensaio de TG/DTG não ter acusado a presença da Portlandita no FC60, FC70CV10 e FC70CV10CH10 a DRX mostrou a existência de Brucita. Conforme Souza (2006) a presença da Brucita denota, de maneira indireta a presença de Portlandita na matriz cimentícia. Com isto, evidencia-se a complementaridade entre os ensaios de DRX e TG/DTG.

Outro aspecto que corrobora a presença da Portlandita nas misturas com kc maior que 0,34 mm.t^{-0,5} diz respeito ao menor teor de CSH nestes traços. A DRX mostrou teor de CSH menor nestas misturas, enquanto a TG/DTG acusou quantidade mais reduzida de água combinada (CSH). Neste sentido Morandea et al. (2014) constatam que tanto a Portlandita como o CSH apresentam carbonatação equivalente no início do processo, entretanto o primeiro diminui sua concentração rapidamente enquanto o segundo continua a reagir. Conforme os autores, este processo ocorre devido a Portlandita tornar-se menos acessível na carbonatação à medida em que se combina com o CO₂.

A partir da explicação de Morandea et al. (2014) pode-se entender o motivo dos traços com kc maior que 0,34 mm.t^{-0,5} apresentarem teores de Portlandita e água combinada inferiores aos traços FC50, FC60CH10 e FC70CV10P. Complementando a afirmação dos autores, Sulapha et al. (2003) defendem que ocorre maior afinidade química entre o CO₂ e a Portlandita, sendo esta a razão do consumo prioritário do composto em detrimento do CSH.

Outra questão, à respeito da Portlandita na CS, que se destaca é, novamente, sua relação com a Brucita conforme já abordado por Souza (2006). Importante notar que na TG/DTG a diferença entre o traço com maior teor de Portlandita (FC50 com +5,98%) e o menor (FC70CV10P com +4,92%) foi de 21,54%. Enquanto isso, na DRX a diferença entre os dois traços em relação a Brucita foi de 17,99%, indicando uma relação de proporcionalidade entre ambos os compostos citados.

No que concerne ao teor de água combinada observa-se, na Tabela 5.27, proporcionalidade com o kc. Assim, à medida que o kc aumenta diminui o teor de água

combinada, indicando, conforme Silveira (2019), uma diminuição na presença de CSH. Castellote et al. (2009) afirmam que a carbonatação não atinge somente a Portlandita, mas também o CSH. Logo, nos traços que não tiveram a presença de Portlandita na CS observa-se uma diminuição no teor de água combinada, indicando, assim, a descalcificação do CSH.

Outro aspecto que corrobora as afirmações de Castellote et al. (2009) diz respeito à diminuição no teor de água combinada entre CN e CS em todos os traços estudados, indicando a descalcificação do CSH. Esta relação pode ser comprovada através da DRX onde ocorreu, também, uma diminuição no teor de CSH entre CN e CS na maioria dos traços estudados.

Na Tabela 5.27 chama a atenção a proporcionalidade entre água combinada e Portlandita. Este fenômeno é explicado por Park (2008) ao relatar que o CO_2 que penetra na matriz cimentícia reage de maneira igualitária com a Portlandita e o CSH, diferenciando-se, apenas, na velocidade das reações. Também pode-se dizer que os teores de Portlandita e água combinada constituem-se nas faces de uma mesma moeda, sendo medidas indiretas do teor de CSH.

Por fim observa-se, também na Tabela 5.27, a proporcionalidade entre variação CS/CN na água combinada com o kc, indicando que as maiores variações estão relacionadas com os coeficientes de carbonatação mais elevados. Este comportamento é um indicativo da abrangência da carbonatação na descalcificação do CSH, pois quanto maior a variação CS/CN da água combinada, menor será o teor de Silicatos na matriz cimentícia.

6 RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV – UNIDADES FUNCIONAIS

6.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV DA UNIDADE FUNCIONAL MCC

6.1.1 Resultados e análises da ACV (MCC)

Este item apresenta os resultados e as análises da ACV para a unidade funcional metro cúbico de concreto referente aos 6 tipos de traço. Foram avaliados os impactos ambientais totais (*Eco-indicador 99*), os impactos ambientais individuais e os demais impactos ambientais, conforme a metodologia da ACV-m (CBCS, 2014).

Tendo o auxílio do programa computacional SimaPro, foram calculados índices para cada uma das classes de impactos ambientais estabelecidas na primeira etapa da ACV. O resultado da avaliação de impactos foi obtido a partir da análise das materiais envolvidos no sistema e comparados por meio de um método que seleciona quais deles influenciam em cada categoria de impacto. Assim, para calcular o peso do impacto potencial, um índice foi adotado para cada categoria.

Em sequência, os índices de cada categoria foram uniformizados, dividindo o grupo de impacto por um número de referência, e os resultados apresentados em unidade Pt. Um Pt equivale a um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu, calculado dividindo o total da carga ambiental da Europa pelo seu número de habitantes.

Para a composição dos impactos individuais, o software SimaPro considera onze categorias de impactos ambientais: a) efeitos respiratórios causados por substâncias orgânicas e inorgânicas; b) efeitos cancerígenos; c) radiação ionizante; d) destruição da camada de ozônio; e) mudanças climáticas; f) acidificação/eutrofização; g) uso da terra; h) minerais e combustíveis fósseis; i) ecotoxicidade.

Todavia, de acordo com a metodologia ACV-m (CBCS, 2014), para a construção civil, são cinco os impactos ambientais principais: a) uso de recursos naturais; b) mudanças climáticas; c) consumo de energia; d) geração de resíduos; e) consumo de água. Estas 5 categorias juntamente com o Eco-indicador 99, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil foram os impactos quantificados para os seis traços estudados.

Foi possível verificar os impactos ambientais associados com base nos quantitativos de materiais, nos traços unitários de concreto e nos inventários dos materiais, com auxílio do programa SimaPro, tendo em vista a abordagem do berço ao portão. Os dados de entrada

informados ao referido software para as análises que seguem (ANEXO A e APÊNDICE B), onde constam os inventários detalhados das matérias primas utilizadas e das emissões ao ar, à água e solo. Uma análise comparativa entre as diferentes alternativas é apresentada a seguir, com a avaliação dos impactos ambientais totais e individuais para cada tipo de traço.

6.1.1.1 *Pré-análise dos impactos ambientais (MCC)*

Um dos principais insumos responsáveis pelo impacto ambiental do concreto é o clínquer Portland seja em relação ao consumo de matérias primas (*Argila, Calcário, etc.*), pelo consumo de combustíveis (*carvão, gás natural, etc.*), seja pela emissão de CO_{2eq}. Segundo Kjellsen et al. (2005) o clínquer Portland é responsável por mais de 91% das emissões de CO_{2eq} do concreto, logo, ações que diminuam o teor de clínquer constituem em uma boa opção para a redução da emissão dos GEE's e para o aumento da sustentabilidade global das estruturas de concreto.

Ao realizar a substituição de CP por FC ocorre uma mitigação dos efeitos danosos do concreto ao meio ambiente. Este comportamento foi observado em todos os impactos ambientais como: Eco-indicador 99, mudanças climáticas, uso de recursos naturais, consumo de energia, geração de resíduos, consumo de água, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil.

Na totalidade dos casos, o traço REF foi o responsável pelo maior impacto ambiental, seguidos, pelos FC50, FC60CH10, FC60, FC70CV10CH10 e FC70CV10. Diante do exposto em todas as discussões realizadas são apresentados comentários à respeito da relação entre o teor de FC e o impacto ambiental em análise.

6.1.1.2 *Impactos ambientais totais: Eco-indicador 99 (MCC)*

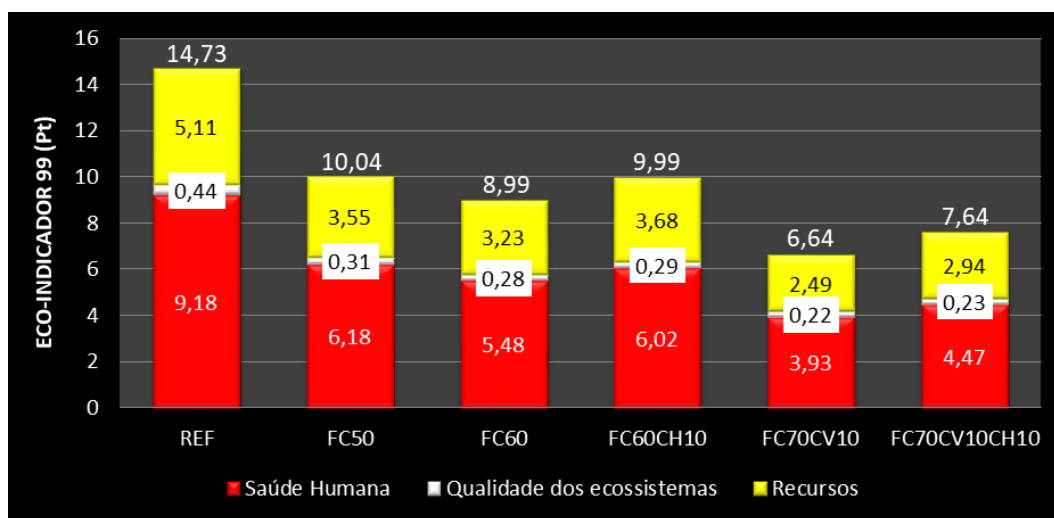
O método de avaliação Eco-indicador 99 utiliza para a categoria “*saúde humana*” (*mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, problemas respiratórios por substância orgânicas e inorgânicas e radiação ionizante*), o “*Disability Adjusted Life Years*” (*DALY*), que pode ser entendido como uma lista estatística, determinada por diversas convenções médicas, de fatores para cada deficiência.

Para a categoria de “*qualidade dos ecossistemas*” (*uso de terra, acidificação e eutrofização e ecotoxicidade*), a ponderação foi expressa em fração de potencial desaparecimento (*PDF*).m².ano. A categoria “*recursos*” (*esgotamento de minerais e*

combustíveis fósseis), foi expressa em MJ de energia excedentes. Todas estas ponderações [*DALY, (PDF).m².ano e MJ*] foram uniformizadas e transformadas na unidade Pt.

A Figura 6.1 apresenta os impactos ambientais do Eco-indicador 99 (*saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos*) para cada um dos traços estudados. Nela é possível observar que o REF apresentou o maior valor (14,73 Pt), seguido do FC50 (10,04 Pt), FC60CH10 (9,99 Pt), FC60 (8,99 Pt), FC70CV10CH10 (7,64 Pt) e FC70CV10 (6,64 Pt).

Figura 6.1 – Eco indicador 99 (MCC)



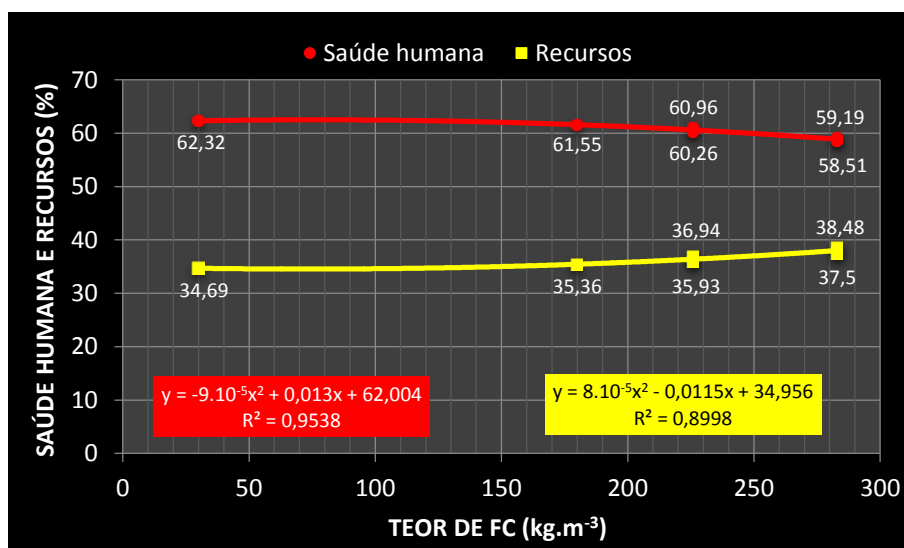
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Nota-se que o traço FC60CH10 possui um impacto ambiental maior (9,99 Pt) do que o FC60 (8,99 Pt), sendo a diferença (1 Pt) referente a adição da CH. De modo similar, ocorreu o mesmo com os traços FC70CV10CH10 e FC70CV10.

Ainda na mesma linha, os traços FC50 e FC60 apresentaram uma variação de 1,05 Pt no impacto ambiental relativo a diferença de 10% no teor de CP. Ou seja, nos traços estudados, a incorporação de 10% de CV e/ou CH causou um impacto ambiental no Eco-indicador 99 de, aproximadamente, 1 Pt.

Outro aspecto a ser abordado refere-se a categoria saúde humana que apresentou o maior peso em todos os traços com uma participação média de 60,47%, os recursos responderam por 36,48% e a qualidade dos ecossistemas contribuíram com 3,05%. Nota-se que a participação da categoria saúde humana diminuiu com o aumento do teor de FC, ocorrendo o inverso com a categoria recursos conforme pode ser visto na Figura 6.2.

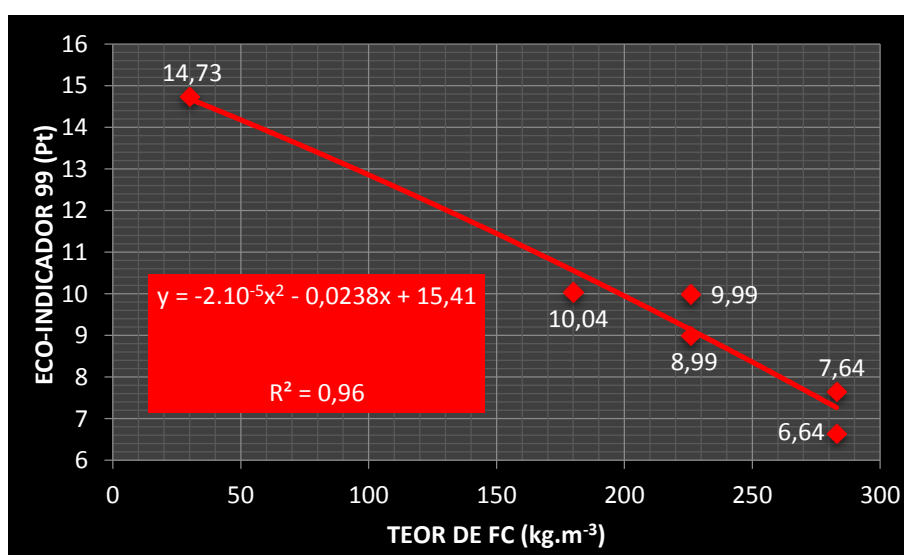
Figura 6.2 – Saúde humana e recursos x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

O motivo desta tendência está relacionada ao papel que o FC desempenha nas categorias saúde humana e recursos. Na medida em que mais FC foi incorporado aos traços diminuiu a emissão de GEE ocasionando uma redução na participação da categoria saúde humana. Por outro lado, aumentou a quantidade de matéria prima (*areias, brita, água e CH*) necessária a elaboração de um metro cúbico de concreto ocasionando uma elevação na categoria recursos.

Figura 6.3 – Eco-indicador 99 x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

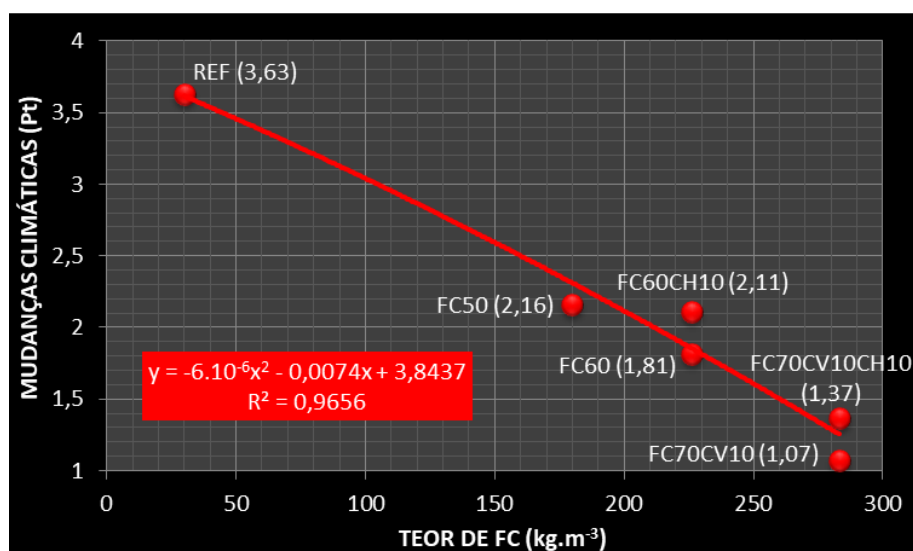
Na Figura 6.3 é possível constatar o comportamento do Eco-indicador 99 frente a substituição de FC conforme citado no Item 6.1.1.1. Observa-se que a substituição de 50% de CP por FC (*FC50*) reduziu o Eco-indicador 99 em 4,69 Pt ($0,026 \text{ Pt.kg}^{-1}$), com 60% ocorreu uma redução média de 5,24 Pt ($0,023 \text{ Pt.kg}^{-1}$) e com 70% ocorreu uma diminuição média de 7,59 Pt ($0,027 \text{ Pt.kg}^{-1}$). Com isso, a substituição de 70% de CP por FC gerou a maior redução no Eco-indicador 99, tendo em vista que cada kg de FC implicou na diminuição de 0,027 Pt. Neste caso, o percentual de substituição de 70% (*CP por FC*), em particular o traço *FC70CV10*, consiste na melhor opção para a redução dos valores referente ao Eco-indicador 99.

6.1.1.3 Impactos ambientais individuais (MCC)

6.1.1.3.1 Mudanças climáticas (MCC)

A Figura 6.4 apresenta o impacto ambiental individual mudanças climáticas em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.4 – Mudanças climáticas x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

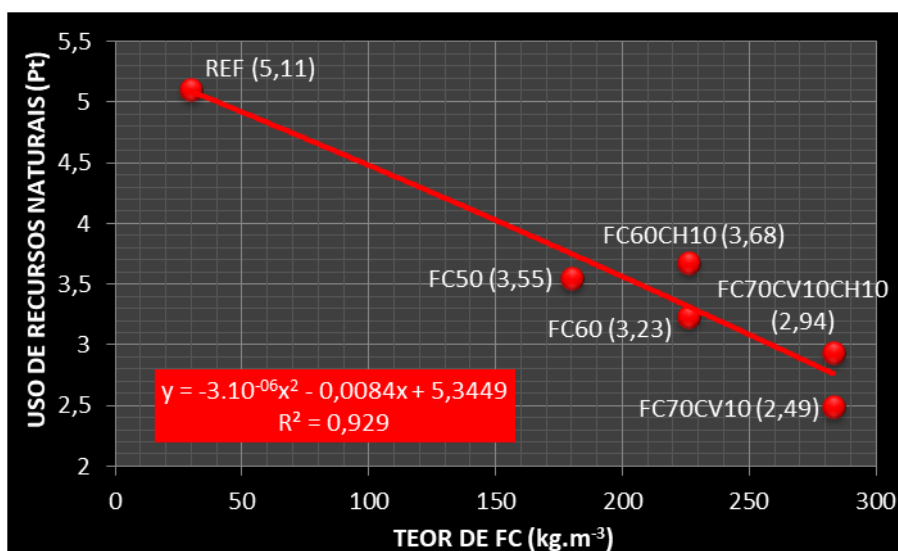
Na Figura pode-se notar que os traços com AM apresentaram melhor desempenho quando comparados ao REF, em especial aqueles que não possuem adição de CH. Com efeito, tanto o CP como a CH são aglomerantes que necessitam de calcinação em seu processo produtivo gerando maior quantidade de GEE e consequentemente um maior impacto no

questo mudanças climáticas. Nota-se que o traço FC60CH10 apresentou um valor, em Pt, 1,16 vezes maior que o FC60 que não possui adição de CH, no caso do FC70CV10CH10 em relação ao FC70CV10, o valor chega a 1,28 vezes.

6.1.1.3.2 Uso de recursos naturais (MCC)

A Figura 6.5 apresenta o impacto ambiental individual uso de recursos naturais em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.5 – Uso de recursos naturais x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

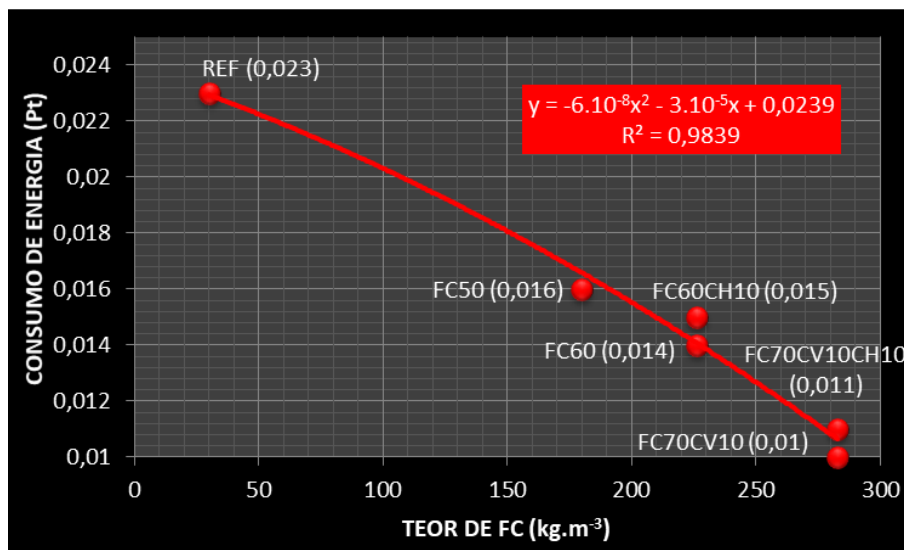
Considerando que o consumo de agregados, água e aditivo é bastante similar entre os traços estudados, pode-se dizer que as diferenças, estão relacionadas com o teor de CP, CH, FC e CV. Dentre esses, o CP é o principal responsável pelo uso de recursos naturais, seja em relação ao consumo de matérias primas (*Argila, Calcário, etc.*), seja pelo consumo de combustíveis (*carvão, gás natural, etc.*). Neste sentido a elaboração de concretos que incorporem uma menor quantidade de CP é bem vinda tendo em vista a redução no uso de recursos naturais.

A utilização de combustíveis está entre os insumos que mais impactam o uso de recursos naturais na cadeia produtiva do concreto. Observa-se que o FC60CH10 foi o segundo traço com mais impacto no seu uso, ficando atrás do REF. Neste caso, em particular, destaca-se o consumo de combustíveis para a calcinação da CH gerando uma demanda maior no uso de recursos naturais.

6.1.1.3.3 Consumo de energia (MCC)

A Figura 6.6 apresenta o impacto ambiental individual consumo de energia em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.6 – Consumo de energia x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Os aglomerantes CP e CH podem ser considerados energo-intensivos, devido a sua necessidade de calcinação, ou seja, necessitam de grandes quantidades de energia para sua produção.

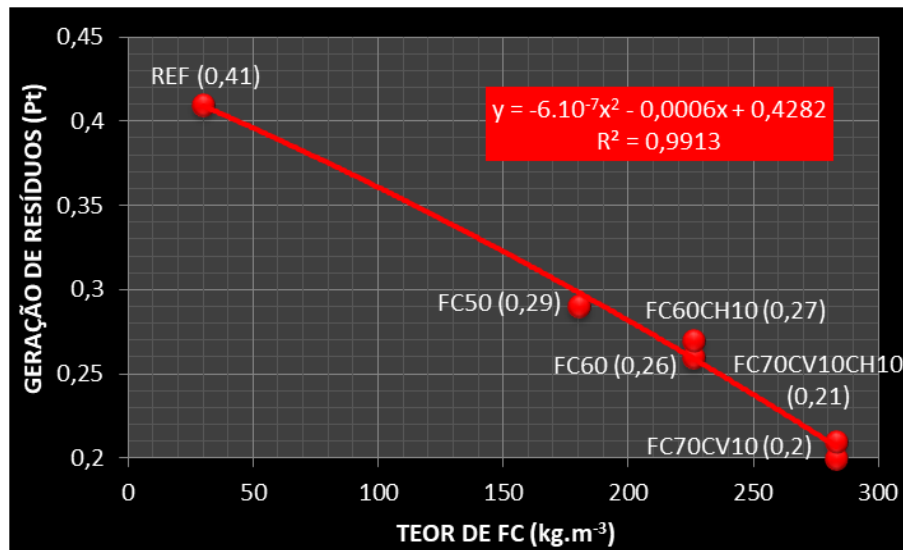
Com isso a contribuição para o consumo de energia dos traços que possuem um teor mais elevado de CP e CH (*menor teor de FC*) é maior quando comparado aos que possuem um teor menos elevado (*maior teor de FC*).

Desta maneira, o traço FC60CH10 necessitou 7,14% a mais de energia em relação ao FC60 tendo em vista que o primeiro possui adição de 10% de CH. Da mesma forma, o traço FC70CV10CH10 necessitou 10% a mais de energia em relação ao FC70CV10 pelo mesmo motivo. Já o traço FC50 possui 10% a mais de CP do que o FC60 e necessitou de uma quantidade de energia 14,29% maior.

6.1.1.3.4 Geração de resíduos (MCC)

A Figura 6.7 apresenta o impacto ambiental geração de resíduos em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.7 – Geração de resíduos x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

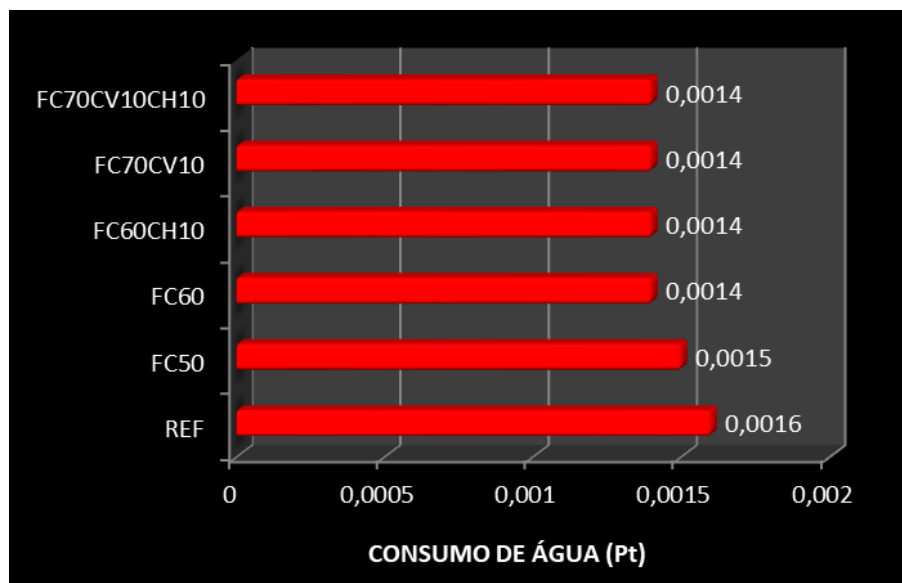
Considerando que o consumo de agregados, água e aditivo é bastante similar nos traços estudados, pode-se dizer que a diferença, no que se refere a geração de resíduos, está relacionada com o teor de CP, CH, FC e CV. Neste sentido cabe destacar que, à medida que o teor de FC aumentou, ocorreu uma redução na geração de resíduos conforme Figura 6.7. Assim, pode-se dizer que a cadeia produtiva do CP e da CH é responsável por uma geração de resíduos maior do que a do FC e da CV.

Esta constatação faz sentido na medida em que a CV é um resíduo de outro processo produtivos que é incorporada na produção do concreto, enquanto que o CP e a CH são produtos, que geram seus próprios resíduos. Com isto estes últimos materiais possuem um impacto maior na geração de resíduos que os primeiros.

6.1.1.3.5 Consumo de água (MCC)

A Figura 6.8 apresenta o impacto ambiental individual consumo de água para cada um dos traços estudados. Nela é possível observar que o traço REF apresentou o maior valor (0,0016 Pt), seguido do FC50 (0,0015 Pt), sendo que os demais traços tiveram o mesmo valor (0,0014 Pt).

Figura 6.8 – Consumo de água (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Considerando que a quantidade de material por metro cúbico (*agregados, água e aditivo*) foi bastante similar nos traços estudados, pode-se dizer que a diferença, no que se refere ao consumo de água, está relacionada com o teor de CP, CH, FC e CV. Não obstante devido ao valor muito próximo do consumo de água entre os traços pode-se dizer que a cadeia produtiva tanto dos aglomerantes (*CP e CH*), como das AM (*FC e CV*) utilizou a água de maneira similar.

Neste mesmo sentido, cabe destacar que os 6 traços estudados apresentaram um consumo de água por metro cúbico, bastante semelhante da ordem de 100 L.m^{-3} o que conduz a um consumo de água total igualmente similar.

6.1.1.4 Demais índices ambientais (MCC)

Os demais índices ambientais referem-se as categorias de danos mais expressivas e que não foram incluídas nos impactos ambientais totais e individuais, sendo elas: a) emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ($\text{kg}_{\text{CO}2\text{eq}}$); b) formação de material particulado ($\text{FMP} - \text{kg}_{\text{MP}10\text{eq}}$); c) esgotamento fóssil ($\text{EF} - \text{kg}_{\text{óleo}2\text{eq}}$).

Tendo o auxílio do programa computacional SimaPro, foram calculados os valores para cada um dos demais índices ambientais escolhidos. O resultado destes índices foi obtido a partir da análise das substâncias envolvidas no sistema e comparadas, por meio de um método que seleciona quais substâncias influenciam em cada índice ambiental.

Os demais índices ambientais associados com base nos quantitativos de materiais, foram calculados nos traços unitários de concreto e nos inventários dos materiais, com auxílio do software SimaPro, tendo em vista a abordagem do berço ao portão. Os dados de entrada informados no referido software para as análises que seguem (ANEXO A e APÊNDICE B), onde constam os inventários detalhados das matérias primas utilizadas e das emissões ao ar, à água e solo.

6.1.1.4.1 Emissão de CO_{2eq} (MCC)

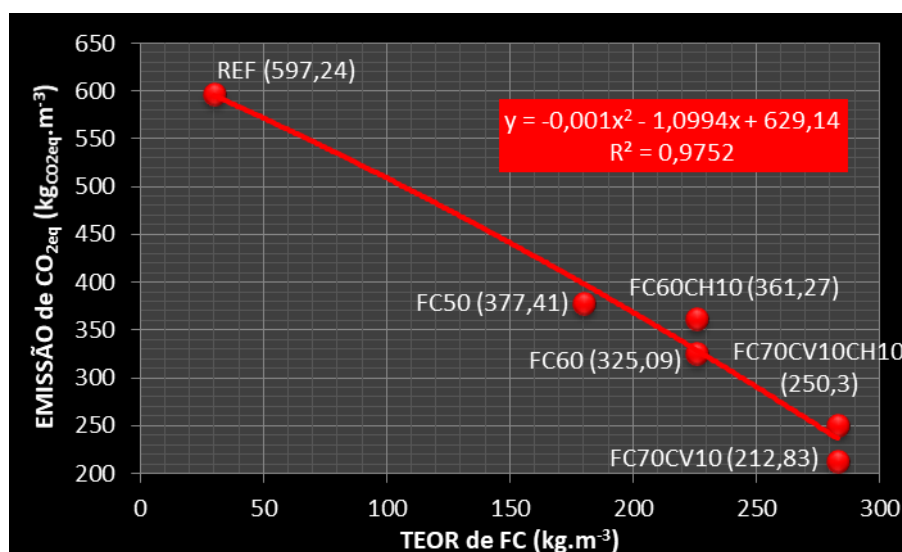
Os gases do inventário de emissões considerados para o cálculo da emissão de CO_{2eq} e os fatores de equivalência estão expressos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Gases e fatores de equivalência (MCC)

Substância	Fator de equivalência
Água	0,0176
Clorofórmio	31
Dióxido de Carbono, a transformação de terras	1
Dióxido de Carbono, biogênicos	1
Dióxido de Carbono, no ar	1
Dióxido de Carbono fóssil	1
Etano, 1,1- Difluoro - HFC – 152	124
Etano, 1,1,1,2 – Tetrafluoro - HFC – 134	1430
Etano, 1,1,2 – Tricloro – 1,2,2 – Trifluoro - CFC – 113	6130
Etano, 1,2 - Dicloro – 1,1,2,2 – Tetrafluoro - CFC – 114	10000
Hexafluoreto de Enxofre	22800
Metano, Clorodifluoro - HCFC – 22	1810
Metano, Dichlorofluoro - HCFC – 21	151
Metano, fóssil	25
Metano, Trifluoro - HFC – 23	14800
Metano, biogênicos	25
Metano, Bromoclorodifluormetano, Halon 1211	1890
Metano, Bromotrifluoro - Halon 1301	7140
Metano, Dichlorodifluoro - CFC-12	10900
Metano, Trichlorofluoro - CFC-11	4750
Óxidos de Nitrogênio	298

Fonte: IPCC (2007).

Esse índice (*emissão de CO_{2eq}*) é uma medida aceita internacionalmente e expõe a influência dos produtos na categoria aquecimento global. Os gases apontados foram aqueles demonstrados no “*Quarto Relatório de Avaliação*” (IPCC, 2007) mais o vapor de água. A Figura 6.9 apresenta a emissão de CO_{2eq} em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.9 – Emissão de CO_{2eq} x teor de FC (MCC)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Importante notar que os traços que possuem maior teor de aglomerantes (*CP e CH*) apresentaram uma emissão de CO_{2eq} mais elevada. Neste sentido, destacam-se três exemplos: a) os traços com 70% de FC, cuja diferença básica consiste na adição de 10% de CH, sendo que o FC70CV10CH10 apresentou uma emissão de CO_{2eq} 17,61% maior que o FC70CV10; b) o traços com 60% de FC, cuja diferença básica consiste na adição de 10% de CH, sendo que o FC60CH10 apresentou uma emissão de CO_{2eq} 11,13% maior que o FC60; c) os traços FC50 e FC60, cuja diferença básica consiste em 10% de CP, sendo que o FC50 apresentou uma emissão de CO_{2eq} 16,09% maior que o FC60.

6.1.1.4.2 Intensidade de CO_{2eq} (MCC)

É consenso na literatura que o impacto ambiental mais expressivo da indústria do concreto é o aquecimento global advindo da emissão de CO_{2eq}, gerado pela extração das matérias primas e fabricação do CP, principalmente. Com isso, é importante a mensuração destas emissões através de um indicador que permita a comparação de diferentes formulações de concreto. Damini et al. (2010) propuseram um indicador de sustentabilidade ambiental do concreto com a finalidade de medir a emissão de CO_{2eq}. Este indicador foi denominado de “Intensidade de CO_{2eq}” (*IC*) que realiza a mediação da quantidade de CO_{2eq} emitida a fim de proporcionar uma unidade de resistência à compressão (*MPa*).

Assim a IC constitui-se em um indicador de sustentabilidade do concreto medido pela razão entre as emissões de CO_{2eq} ($kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3}$ – *impacto ambiental*) e a resistência à compressão (MPa – *desempenho*), conforme a equação 6.1.

$$IC = c \cdot rc^{-1} \text{ (equação 6.1)}$$

Onde:

IC: Intensidade de CO_{2eq} ($kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$);

c: emissão de CO_{2eq} ($kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3}$);

rc: resistência à compressão aos 28 dias (MPa).

Em trabalho posterior Damineli (2013) realizou um benchmark para testar a IC sobre uma base de dados referente a 156 artigos nacionais e internacionais. Para tanto, o autor utilizou as seguintes condições de contorno: a) as emissões de CO_{2eq} derivadas da produção e transporte das matérias-primas e do concreto foram desconsideradas; b) a absorção de CO_{2eq} durante a carbonatação do concreto não foi considerada; c) a emissão de CO_{2eq} alocada nas AM foi considerada nula; d) o cálculo foi baseado no teor de clínquer considerando a emissão de 1 tonelada de CO_{2eq} por tonelada de clínquer. Desta forma, no presente trabalho, os traços estudados foram analisados quanto a IC à luz dos parâmetros estabelecidos por Damineli (2013) conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Determinação da IC conforme metodologia de Damineli (2013) (MCC)

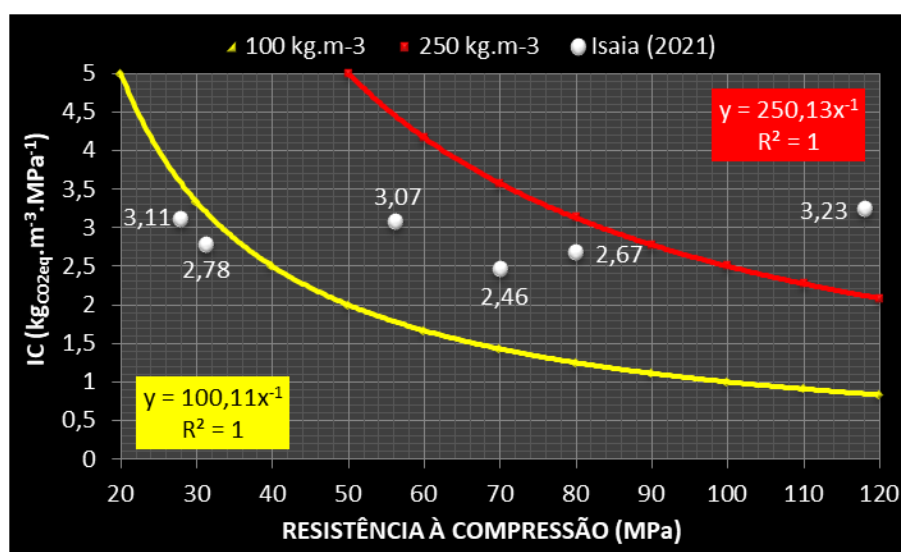
Traços	Teor de clínquer ($kg \cdot m^{-3}$)	Emissão CO _{2eq} ($kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3}$)	fc28 (MPa)	IC ($kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$)
REF	382	382	118,1	3,23
FC50	214	214	80,1	2,67
FC60	173	173	56,3	3,07
FC60CH10	173	173	70,2	2,46
FC70CV10	87	87	28	3,11
FC70CV10CH10	87	87	31,3	2,78

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Conforme Damineli (2013), quanto maior a resistência à compressão do concreto menores são as emissões unitárias de CO_{2eq} em $kg_{CO_{2eq}} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$. Na Tabela 6.2 é possível observar que a afirmação do autor não está em consonância com os valores encontrados, apesar de haver proporcionalidade entre o teor de clínquer, a emissão de CO_{2eq} e a resistência

à compressão. No caso específico não há como relacionar a resistência à compressão do concreto com as emissão unitárias de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, haja vista que uma IC no valor de $3,15 + 0,1 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ pode ser atribuída as seguintes resistências à compressão: 118,1 MPa (*maior resistência à compressão*), 28 MPa (*menor resistência à compressão*) e 56,3 MPa (*resistência à compressão mediana*), conforme Figura 6.10.

Figura 6.10 – IC x resistência à compressão (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Damineli (2013) encontrou valores entre 1,5 e 2 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ aos 28 dias, os quais situam-se entre os menores IC encontrados na literatura nacional e internacional. Na Tabela 6.2 é possível constatar que a média dos valores aos 28 dias foi de 2,89 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$, ou seja, 44,5% acima do valor máximo do intervalo indicado.

Segundo esse mesmo autor, o menor valor possível para a produção de concretos, sem a substituição de CP por AM, é de 4,3 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ aos 28 dias, sendo que o valor do REF, sem substituição de clínquer no presente trabalho foi de 3,23 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$, ou seja, 24,88% menor que o proposto. Damineli (2013) ainda coloca que neste caso (*traços sem substituição de CP*) a IL (Item 4.4.1.1) mínima é, também, 4,3 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$, sendo que no presente trabalho o valor encontrado para o REF foi de 3,23 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ (Item 5.1.3.3).

Ainda no que se refere a análises comparativas entre IC e IL, Damineli (2013) coloca exemplos de traços com baixo IL ($< 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$) e IC ($< 3 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$) atrelados a concretos com resistência à compressão acima dos 50MPa e mais 50% de substituição de clínquer. No caso do presente trabalho destaca-se o traço FC70CV10CH10 possuindo uma

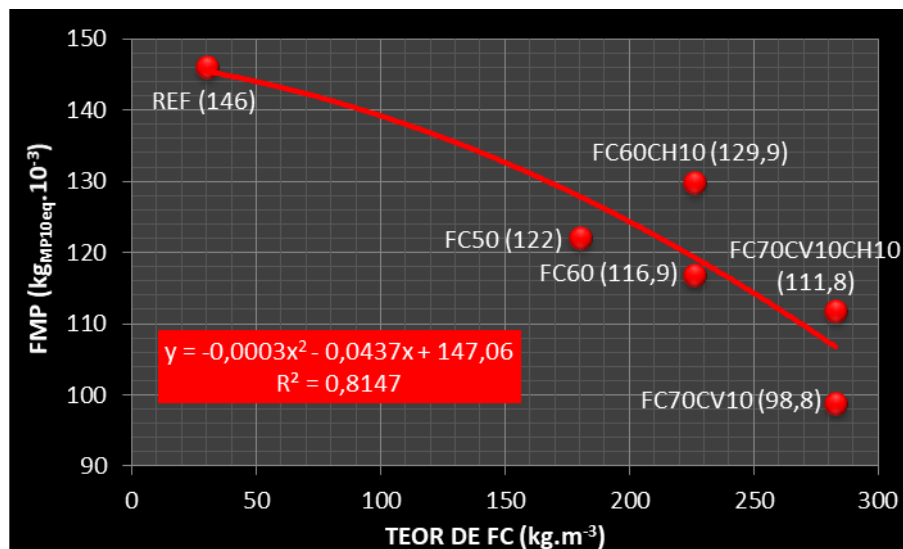
resistência à compressão de 31,3 MPa com 70% de FC, 10% de CV, 20% de CP, adição de 10% de CH, apresentando uma IL de $4,67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ e uma IC de $2,78 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$.

Estes dados demonstram o bom desempenho dos concretos propostos em relação a emissão de CO_2eq por m^3 de concreto indicando que a substituição de CP por FC e CV, bem como a adição de CH impacta positivamente a redução da emissão de GEE's. Neste sentido, cabe destacar o desempenho do traço FC60CH10 que obteve a menor IC com $2,46 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$, por meio de emissão de $173 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}\cdot\text{m}^{-3}$, resistência à compressão de 70,2 MPa, com 40% de CP, 60% de FC e adição de 10% de CH.

6.1.1.4.3 Formação de material particulado (MCC)

A Figura 6.11 apresenta a formação de material particulado em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.11 – Formação de material particulado x teor de FC (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

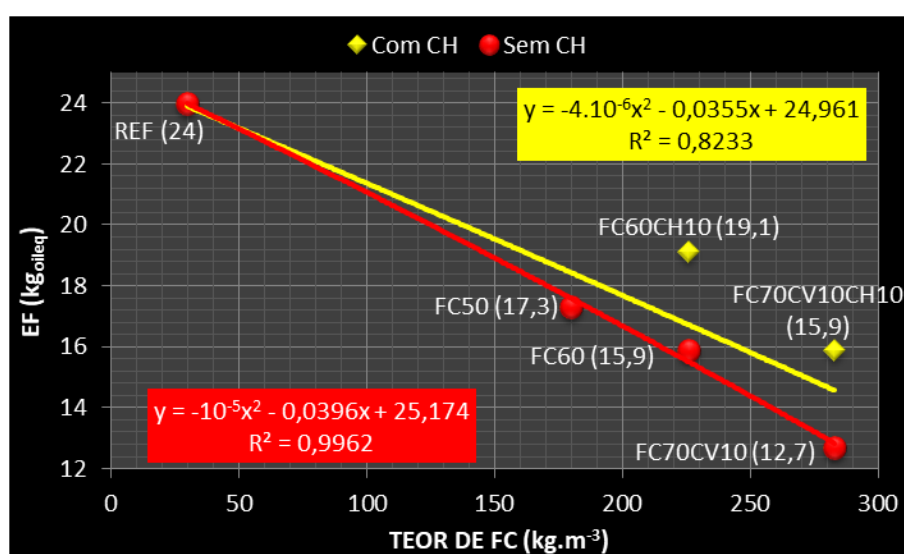
É possível observar na Figura 6.11 que, proporcionalmente, os traços que apresentaram a maior formação de material particulado estão relacionados com teor mais elevado de aglomerantes (CP e CH) como é o caso do REF, FC60CH10 e FC70CV10CH10. Esta maior formação de material particulado está relacionado com a necessidade de calcinação do CP e CH que, conseqüentemente, emitem uma maior quantidade de partículas

para a atmosfera. Por outro lado, os traços com menor teor de aglomerantes (*FC70CV10*) apresentaram uma formação de material particulado menor.

6.1.1.4.4 Esgotamento fóssil (*MCC*)

A Figura 6.12 apresenta o esgotamento fóssil em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.12 – Esgotamento fóssil x teor de FC (*MCC*)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

É possível observar na Figura 6.12 que, proporcionalmente, os traços que apresentaram o maior esgotamento fóssil estão relacionados com teor mais elevado de aglomerantes (*CP e CH*) como é o caso do REF, FC60CH10 e FC70CV10CH10. O maior consumo de óleo combustível está relacionado com a necessidade de calcinação do CP e CH que, conseqüentemente, necessitam de um consumo maior de energia. Por outro lado, os traços com menor teor de aglomerantes (*FC70CV10*) apresentaram um consumo de óleo combustível menor. No caso específico a adição de 10% de CH tendeu a elevar o esgotamento fóssil a um patamar superior no que concerne ao consumo de energia quando comparado aos traços que não possuem adição deste aglomerante.

Ainda na Figura 6. 12 é possível observar as curvas dos polinômios de 2º grau para os cenários com e sem CH. Nota-se que os pontos da curva sem CH são mais próximos gerando um R^2 de 0,9962, enquanto a curva com CH apresenta pontos mais dispersos gerando um R^2

de 0,8233. Esta diferença na configuração das curvas retrata, de maneira bastante precisa, a influência da adição de CH sobre o esgotamento fóssil nos traços estudados.

6.1.1.5 Análise estatística integrada dos impactos ambientais (MCC)

Na Tabela 6.3 é possível observar análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais, nesta análise foram comparadas a ANOVA de fator único para o Eco-indicador 99, consumo de água, consumo de energia, geração de resíduos, mudanças climáticas, uso de recursos naturais, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil.

Tabela 6.3 – Análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais (MCC)

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F _{crítico}	R ²
Consumo de energia	4.399.668,79	5	879.933,76	8,8.10 ⁹	6,04.10 ⁻⁵⁷	3,11	0,99
Eco-indicador 99	118,82	5	23,76	237.642,5	1,56.10 ⁻²⁹	3,11	0,99
Formação de material particulado	3.898,32	5	779,66	93.372,93	4,23.10 ⁻²⁷	3,11	0,99
Uso de recursos naturais	12,13	5	2,43	24.269,3	1,37.10 ⁻²³	3,11	0,99
Mudanças climáticas	11,97	5	2,39	23.932,5	1,32.10 ⁻²³	3,11	0,99
Esgotamento fóssil	218,71	5	43,74	4.921	1,97.10 ⁻¹⁹	3,11	0,99
Geração de resíduos	8,6.10 ⁻²	5	1,7.10 ⁻²	171,2	1,01.10 ⁻¹⁰	3,11	0,99
Emissão de CO _{2eq}	2,27	5	0,45	11,8	3,6.10 ⁻⁵	3,11	0,77
Consumo de água	1,05.10 ⁻⁷	5	2,1.10 ⁻⁸	2,1	0,14	3,11	0,47

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Com exceção do consumo de água, o valor de “F” foi relevantemente superior ao “F_{crítico}” (3,11) indicando que as variáveis em questão possuem uma influência significativa nos resultados do ponto de vista estatístico. Ou seja, quantidade de CP e CH, tipo e teor das AM (FC e CV) geram variações significativas nos índices estudados.

Pode-se observar que o índice que possui a influência mais relevante é o consumo de energia seguido do Eco-indicador 99, formação de material particulado, uso de recursos naturais, mudanças climáticas, esgotamento fóssil, geração de resíduos, emissão de CO_{2eq} e consumo de água. Nota-se que quanto maior o valor de “F”, menor o “Valor-P” e mais próximo de 1 encontra-se o coeficiente de determinação R². Com isso, quanto maior o valor de “F” mais significativo será o “Valor-P” na ANOVA.

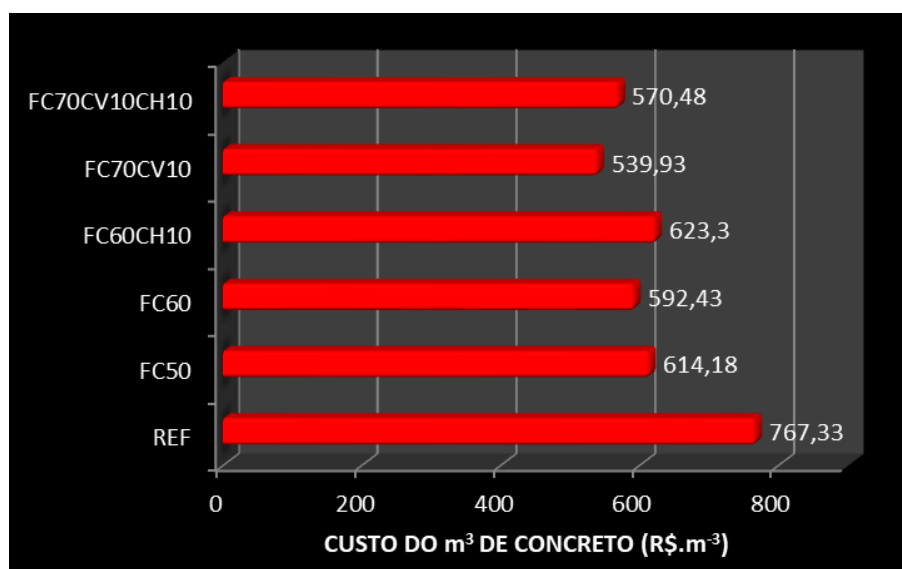
Para consumo de energia o valor de “ F ” foi $8,8 \cdot 10^9$ (maior valor de F), o “Valor- P ” foi $6,04 \cdot 10^{-57}$ (menor Valor- P) e R^2 0,99 (maior valor de R^2); em relação a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ o valor de “ F ” foi 11,8 (menor valor de F), o “Valor- P ” foi $3,6 \cdot 10^{-5}$ (maior Valor- P) e R^2 0,77 (menor valor de R^2).

Com base nestes dados é possível perceber que, apesar do valor de “ F ” ter sido superior ao “ $F_{\text{crítico}}$ ” em, praticamente, todos os índices, a significância foi maior no consumo de energia quando comparada a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, por exemplo. Neste caso, pode-se dizer que as variações no CP e CH, tipo e teor das AM (FC e CV) geraram um impacto maior no consumo de energia quando comparado com a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

6.1.2 CCV (MCC)

Conforme a norma NBR ISO 15686-5 (ABNT, 2017), o CCV pode ser definido como sendo a quantificação do custo de um produto ou de suas partes ao longo do seu ciclo de vida, devendo atender aos requisitos de desempenho para os quais foi originalmente concebido.

Figura 6.13 – Custo do MCC



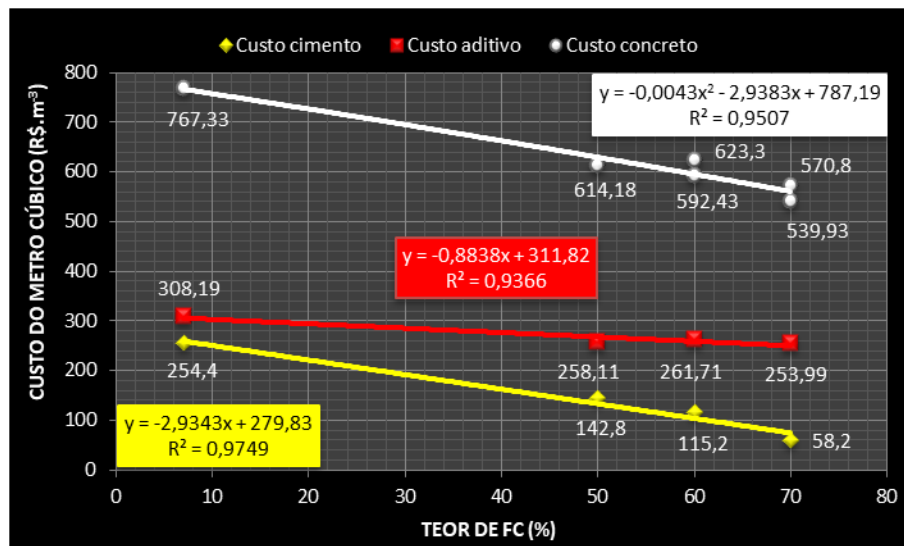
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Foram calculados, com base no consumo de materiais, os custos necessários à execução de um metro cúbico de concreto para cada traço, levando-se em consideração a abordagem do berço ao portão, em conformidade ao estudo de ACV realizado. A Figura 6.13 mostra os resultados obtidos referente aos custos totais, do berço ao portão, com encargos

sociais obrigatórios de 110,61%. Os resultados obtidos referem-se a dezembro/2020, de acordo com as consultas feitas à TCPO (2020) e à Tabela de encargos sociais (RS) do SINAPI (*Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil*), do ano de 2020. As planilhas de custos unitários que compõem o CCV (APÊNDICE C).

O traço FC70CV10 apresentou o menor valor por m³ de concreto com R\$539,93, e o REF o maior com R\$767,33 uma diferença de 42,1% demonstrando que os traços com AM possuem um custo competitivo. Importante notar que a medida que o teor de FC aumenta o custo por m³ do concreto diminui conforme poder ser visto na Figura 6.14.

Figura 6.14 – Custo do MCC, CP e aditivo x teor de FC



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Vale ressaltar que a curva polinomial de 2º grau que descreve o comportamento do custo do m³ de concreto possui um coeficiente “a” próximo de zero fazendo com que a mesma aproxime-se de uma reta com coeficiente angular de -2,9383, valor muito próximo do coeficiente angular da reta que descreve o comportamento do CP que foi de -2,9343, ou seja as duas funções, no intervalo proposto, são praticamente paralelas.

Esta similaridade em relação ao coeficiente angular das duas funções demonstra a proporcionalidade entre o aumento do teor de FC e a diminuição do custo do m³ de concreto e CP. Outro comportamento a ser observado refere-se ao custo de aditivo por m³, no traço REF o valor foi 19,48% superior à média de custo dos traços com FC. Ou seja, os demais traços apresentaram uma diferença muito reduzida no custo do aditivo com média de R\$257,94. Não obstante o peso do aditivo para todos os traços foi muito similar com uma média de 43,6%.

Por outro lado, o peso do CP decai à medida que o teor de FC aumenta, iniciando com 33,15% para o REF, 23,25% FC50, 18,95% FC60/FC60CH10 e 10,48% FC70CV10/FC70CV10CH10. Estes números demonstram o peso do aditivo no custo total do m³ de concreto que independe do teor de FC, sendo desta maneira o insumo com maior peso específico na composição do custo.

Nesta mesma linha, observa-se que o aumento do teor de FC impacta de maneira diferente os custos com aditivo e CP. Enquanto a diferença de custo entre os traços com 70% de FC e o REF, em relação ao aditivo, é de 1,21 vezes, no caso do CP é de 4,37 vezes. Esta diferença significativa está relacionada ao aumento da área BET advinda da incorporação do FC conforme abordado no Item 4.3.5.1. Ou seja, à medida que aumentou o teor de FC (*diminuiu a participação do CP*) não ocorreu uma diminuição no consumo de aditivo tendo e visto o aumento da área BET devido as partículas mais finas do FC.

Esta diferença fica mais explícita quando se efetua a comparação entre o custo do CP e do aditivo com o do concreto. No REF o aditivo respondeu por 40,16% e o CP por 33,15% do custo total do concreto, enquanto que nos traços com 70% de FC este valor foi de 45,73% e 10,59%, respectivamente. No caso do aditivo pode-se verificar uma diferença muito pequena (40,16/45,73%) enquanto no CP o intervalo foi bem mais significativo (33,15/10,59%).

Utilizou-se a Análise de Variância ANOVA, com base nos resultados obtidos, com o intuito de determinar qual a influência dos diferentes traços de concretos estudados sobre o custo do m³, na Tabela 6.4 é possível observar os resultados. O valor “*F*” (1,88.10⁸) foi muito superior ao valor “*F*_{crítico}” (3,11), indicando que a composição dos diferentes traços possui uma influência significativa nos resultados do ponto de vista estatístico. Observa-se, ainda, que o baixo resultado obtido para o “*Valor-P*” (6,33.10⁻⁴⁷), menor que 0,05 indica que há significância, com 95% de confiança. O R² observado foi de 0,99 indicando uma correlação excelente entre a composição dos diferentes traços e o custo do m³ de concreto.

Tabela 6.4 – ANOVA para o custo do MCC

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F _{crítico}	R ²
Entre traços	94.047,03	5	18.809,4	1,88.10 ⁸	6,33.10 ⁻⁴⁷	3,11	0,99

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

6.1.3 Avaliação dos resultados ambientais e econômicos (MCC)

Nos itens anteriores, foram analisados os resultados do ponto de vista ambiental e econômico, sendo que para cada aspecto foram adotados índices específicos. Neste item são definidos dois índices com a finalidade de compor a análise integrada da sustentabilidade dos traços estudados. No aspecto econômico foi escolhido o índice de custo (*Ic*) e no ambiental o índice impacto ambiental (*Ia*).

O *Ia* é composto pela ponderação unitária dos seguintes índices ambientais: Eco-indicador 99 (*saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos*), mudanças climáticas, geração de resíduos, consumo de água, consumo de energia, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil. O impacto ambiental individual uso de recursos naturais não foi utilizado por já estar incluído no Eco-indicador 99.

Para a determinação do *Ia* foi realizada a ponderação unitária de cada índice ambiental citado, ou seja, os valores expressos entre 0 e 1 e obtidos pela divisão entre os cenários do maior pelo de menor valor. Na sequência foi realizada a média da ponderação unitária de cada índice ambiental com o intuito de determinar o *Ia*, como pode ser observado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Composição do índice de impacto ambiental (MCC)

Índice ambiental	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60CH10	FC70CV10	FC70CV10CH10
1 - Saúde humana	Pt	9,18	6,18	5,48	6,02	3,93	4,47
	Unitário	1,00	0,67	0,60	0,66	0,43	0,49
2 - Qualidade dos ecossistemas	Pt	0,44	0,31	0,28	0,29	0,22	0,23
	Unitário	1,00	0,70	0,64	0,66	0,50	0,52
3 – Uso de recursos naturais	Pt	5,11	3,55	3,23	3,68	2,49	2,94
	Unitário	1,00	0,69	0,63	0,72	0,49	0,57
4 - Mudanças climáticas	Pt	3,63	2,16	1,81	2,11	1,07	1,37
	Unitário	1,00	0,59	0,50	0,58	0,29	0,37
5 - Geração de resíduos	Pt	0,41	0,29	0,26	0,27	0,20	0,21
	Unitário	1,00	0,71	0,63	0,66	0,49	0,51
6 - Consumo de água	Pt	0,0016	0,0015	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
	Unitário	1,00	0,94	0,88	0,88	0,88	0,88
7 - Consumo de energia	Pt	0,023	0,016	0,014	0,015	0,01	0,011
	Unitário	1,00	0,70	0,61	0,65	0,43	0,48
8 - Emissão de CO _{2eq}	kgCO _{2eq}	597,24	377,41	325,09	361,27	212,83	250,3
	Unitário	1,00	0,63	0,54	0,60	0,36	0,42
9 - Formação de material particulado (*10 ⁻³)	kgMP10eq*	146	122	116,9	129,9	98,8	111,8
	Unitário	1,00	0,84	0,80	0,89	0,68	0,77
10 - Esgotamento fóssil	kgoleq	24	17,3	15,9	19,1	12,7	15,9
	Unitário	1,00	0,72	0,66	0,80	0,53	0,66
Ia - (∑ I a10 unitário).10⁻¹	Unitário	1,00	0,72	0,65	0,71	0,51	0,57

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

O I_c é composto pela ponderação unitária do custo do metro cúbico de cada concreto estudado, conforme demonstrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Composição do índice de custo (MCC)

Índice de custo	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60CH10	FC70CV10	FC70CV10CH10
Custo do metro cúbico	R\$	767,33	614,18	592,43	623,30	539,93	570,48
	Unitário	1,00	0,80	0,77	0,81	0,70	0,74
I_c	Unitário	1,00	0,80	0,77	0,81	0,70	0,74

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

6.1.4 Indicador global de sustentabilidade (MCC)

Para estabelecer o melhor metro cúbico de concreto, do ponto de vista da sustentabilidade, sintetizou-se, em um único indicador, os resultados expressos nos índices de custo (I_c) e de impacto ambiental (I_a). Para tanto, foi concebido o indicador global de sustentabilidade (I_s) o qual é composto pela ponderação dos dois índices citados.

A metodologia de cálculo do indicador global de sustentabilidade (I_s) parte do princípio que a tomada de decisão relativa ao ciclo de vida de produtos e serviços deve ser baseada nos seus efeitos econômicos e ambientais através dos principais índices que compõe a ACV e CVV (BIERER et al., 2015).

Assim, os autores sugerem a utilização da metodologia MFCA (*Contabilidade de Custo dos Fluxos de Materiais*) onde o ambiente de produção analisado é modelado como um sistema de fluxos (*movimentos de materiais*) e centros de quantidade (*processos*). Desta maneira, é possível utilizar-se uma expressão que gere um valor global adequado para o processo decisório.

Bierer et al. (2015) partiram do equacionamento proposto por Ostermeyer et al. (2013) e apresentaram uma equação que possibilita o cálculo de um indicador global de sustentabilidade (I_s) o qual se baseia no uso da metodologia multidimensional de otimização de Pareto.

Sugerindo uma equação composta pela raiz quadrada da soma dos quadrados da ACV e CCV. Desta maneira, no presente trabalho foi utilizado a metodologia de Ostermeyer et al. (2013), na qual foram utilizados os índices de custo (I_c) e de impacto ambiental (I_a) para o cálculo do indicador global de sustentabilidade (I_s) conforme equação 6.2.

$$I_s = [(I_c)^2 + (I_a)^2]^{1/2} \quad (\text{equação 6.2})$$

Onde:

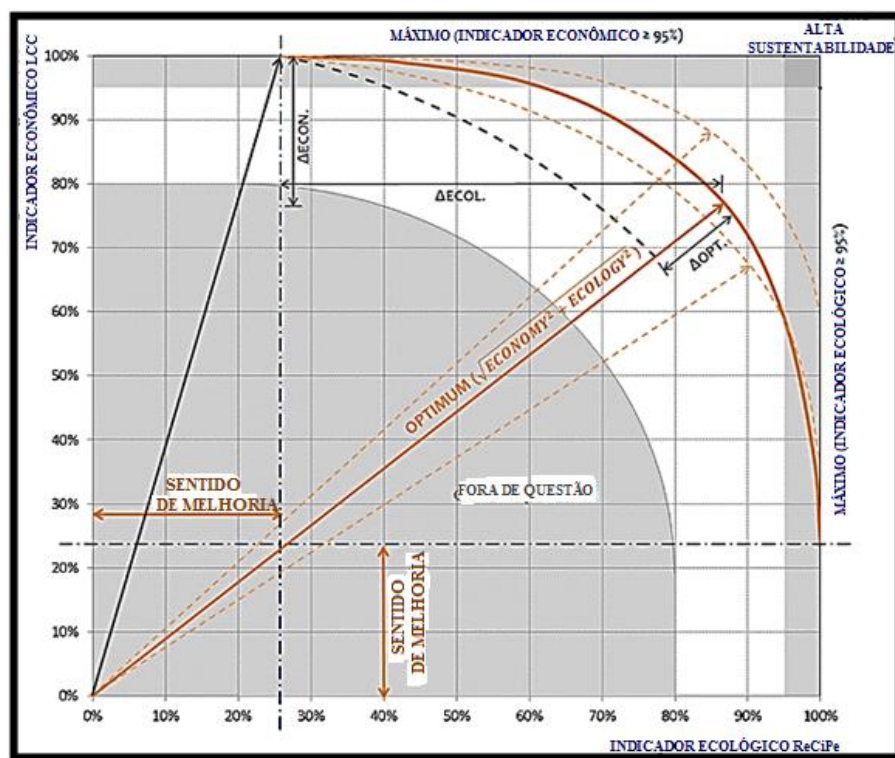
I_s : Indicador global de sustentabilidade;

I_c : índice de custo;

I_a : índice de impacto ambiental.

Conforme Ostermeyer et al. (2013) o valor do indicador global de sustentabilidade (I_s) é gerado a partir de um vetor no espaço, uma vez que cada parte da sustentabilidade assumirá um eixo cartesiano, conforme Figura 6.15.

Figura 6.15 – Sistema binário ACV e CCV para indicadores de sustentabilidade



Fonte: Ostermeyer et al. (2013).

Na Tabela 6.7 é possível observar a aplicação da equação 6.2 onde são apresentados os valores para o indicador global de sustentabilidade para os 6 traços estudados. Ao analisar a Tabela 6.7 observa-se que o traço com melhor indicador global de sustentabilidade foi o FC70CV10 com 0,87, seguido do FC70CV10CH10 com 0,93, FC60 com 1,01, FC50 e FC60CH10 com 1,08 e por fim o REF com 1,41. Também é possível depreender que a

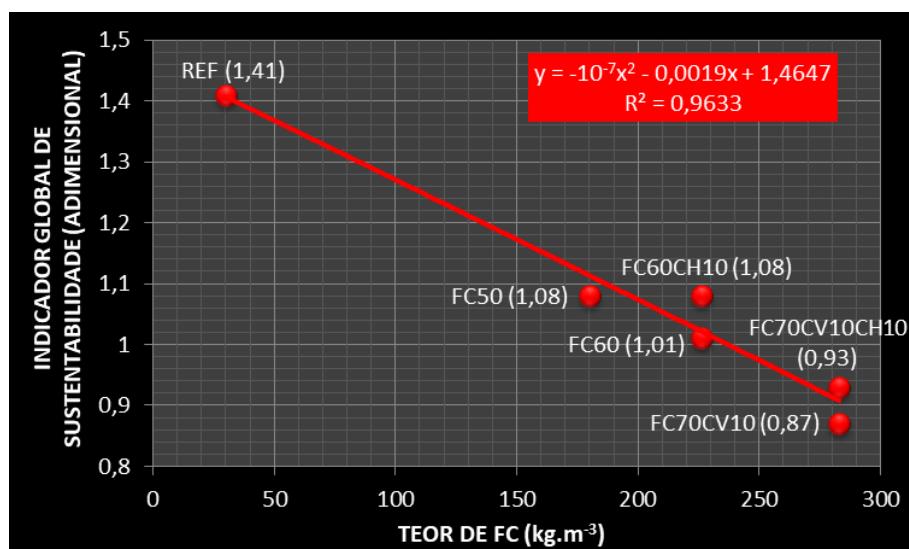
classificação dos traços, quanto ao indicador global de sustentabilidade, segue a ordem inversa do teor de FC como pode ser observado na Figura 6.16.

Tabela 6.7 – Indicador global de sustentabilidade (*MCC*)

Unidade	REF	FC50	FC60	FC60CH10	FC70CV10	FC70CV10CH10
ACV Ia	1,00	0,72	0,65	0,71	0,51	0,57
CCV Ic	1,00	0,80	0,77	0,81	0,70	0,74
Is	1,41	1,08	1,01	1,08	0,87	0,93
Posição	5º	4º	3º	4º	1º	2º

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 6.16 – Indicador global de sustentabilidade x teor de FC (*MCC*)



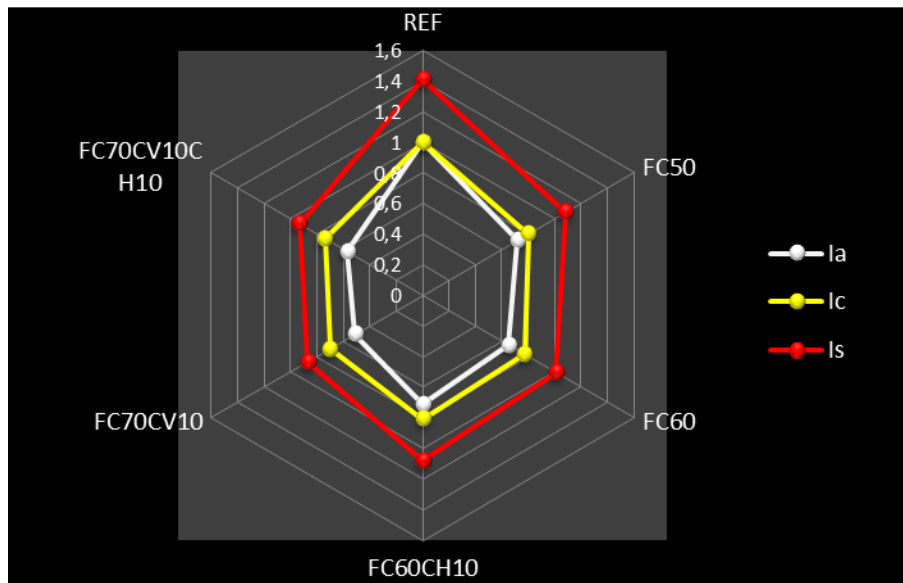
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Uma outra forma de apresentação dos índices Is, Ia e Ic é apresentada na Figura 6.17, nela observa-se a posição relativa dos parâmetros, uns em relação aos outros, de modo a obter-se uma visão mais clara do contexto da sustentabilidade.

Na Figura 6.17 o índice de impacto ambiental (*Ia*) está totalmente contido dentro do índice de custo (*Ic*) indicando que, em todos os traços, o parâmetro ambiental apresentaram um desempenho melhor que o enfoque econômico.

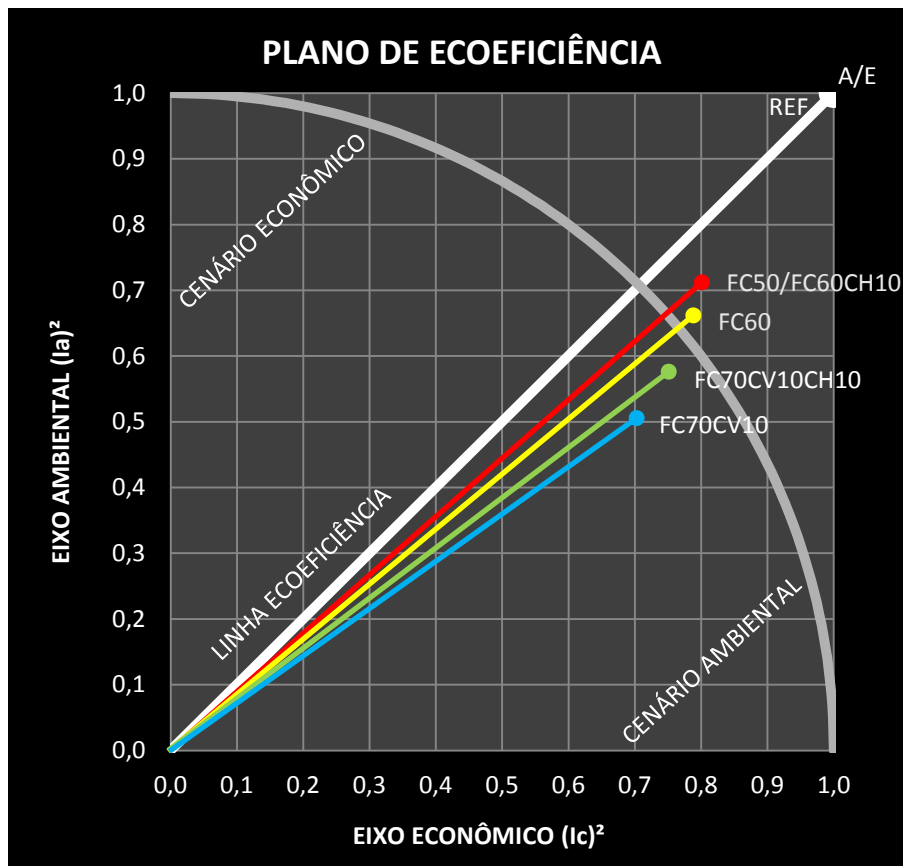
A exceção a este comportamento é o REF que apresentou o mesmo valor para Ia e Ic indicando uma boa ecoeficiência, ou seja, um equilíbrio entre ambos os aspectos, todavia, devido ao valor unitário elevado o traço foi classificado em último lugar.

Figura 6.17 – Indicador global de sustentabilidade – gráfico tipo “radar” (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 6.18 – Plano de ecoeficiência (MCC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A constatação de que os traços com maiores teores de FC são mais eficientes do ponto de vista ambiental pode ser verificada na Figura 6.18 através do plano de ecoeficiência. A linha diagonal em branco indica a tendência de um dado traço com um equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos. Desta forma, quanto mais próximo um traço estiver desta linha diagonal melhor será seu desempenho relativo em relação a estes dois aspectos. Já do ponto de vista absoluto o melhor resultado é aquele que mais se aproxima da origem por apresentar os menores valores nos aspectos ambientais e econômicos. Também é possível constatar que acima da linha diagonal branca se localiza a área de prevalência do cenário econômico e abaixo dela, o cenário ambiental.

Assim, na Figura 6.18, foram plotados os pontos referentes a cada traço onde pode-se verificar que aqueles com maiores teores de FC estão mais próximos da origem como é o caso do primeiro colocado FC70CV10 nas coordenadas $(0,70; 0,51)$. No lado oposto, observa-se o REF nas coordenadas $(1;1)$ classificado em último lugar apesar de apresentar um equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos (*linha diagonal branca*). Com isso, constata-se que a melhor classificação está relacionada com a posição relativa de um ponto próximo a linha diagonal e a origem, concomitantemente, como é o caso do FC70CV10.

Também na Figura 6.18 nota-se, mais uma vez, que os traços estudados apresentaram uma relevância maior do aspecto ambiental em relação ao econômico como pode ser verificado pelo posicionamento dos mesmos na área do “*cenário ambiental*”. Importante notar que quanto melhor classificado é o traço mais distante da linha diagonal de ecoeficiência ele se encontra e maior é a prevalência do aspecto ambiental sobre o econômico. Com isso pode-se dizer que, nos traços estudados, a substituição por FC acarretou uma diminuição proporcional maior nos impactos ambientais do que na redução dos custos.

Um outro ponto a ser notado refere-se ao posicionamento similar dos traços FC50 $(0,80; 0,72)$ e FC60CH10 $(0,81; 0,71)$ demonstrando, do ponto de vista gráfico, o empate ocorrido do ponto de vista numérico. Em ambos os traços os valores de Ia e Ic foram muito semelhantes denotando a similaridade na composição dos impactos ambientais e do custo do metro cúbico de cada traço. Considerando que a diferença em relação ao Ia foi de menos de 1,25% e do Ic de 1,41% pode-se dizer que os dois traços mencionados são equivalentes do ponto de vista de impactos ambientais, custo e sustentabilidade.

Todavia, os traços que apresentaram o melhor desempenho do ponto de vista ambiental e econômico foram o FC70CV10 e o FC70CV10CH10. A performance das duas misturas está relacionada aos reduzidos valores nos índices ambientais e de custo, acarretando os menores Ia, Ic e Is dentre todos os traços.

Pode-se dizer que a elevada substituição de CP por FC no FC70CV10 e FC70CV10CH10 contribuiu, de maneira decisiva, para o excelente desempenho, de ambos, em todos os quesitos (*ambientais e econômicos*) estudados.

6.2 RESULTADOS E ANÁLISES DA ACV E CCV DA UNIDADE FUNCIONAL PEC

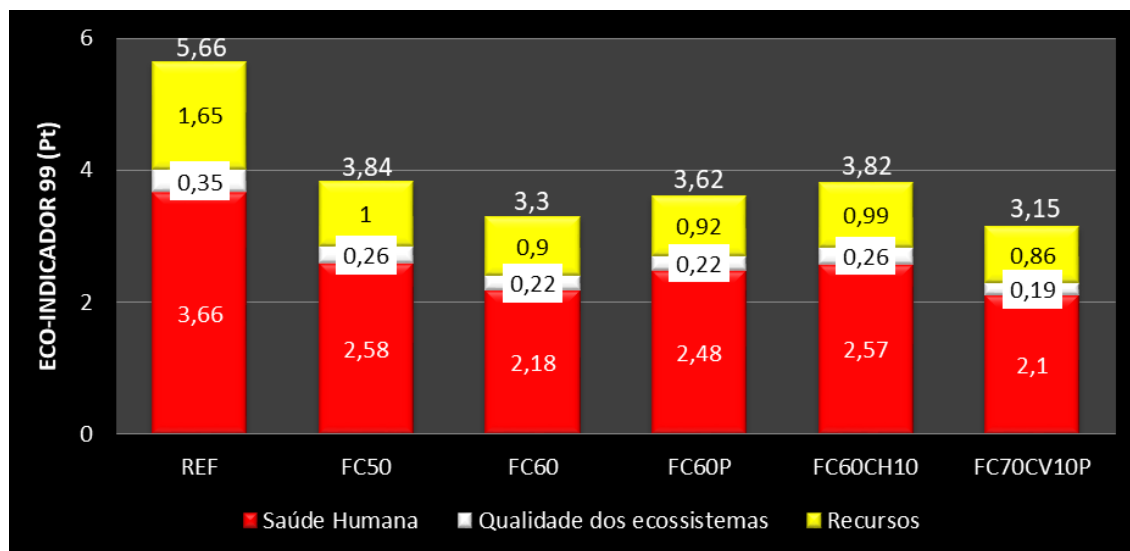
6.2.1 Resultados e análises da ACV (PEC)

A metodologia a ser seguida na apresentação dos resultados e análises de ACV referente ao pilar estrutural de concreto é a mesma utilizada no Item 6.1.1.

6.2.1.1 Impactos ambientais totais: Eco-indicador 99 (PEC)

A Figura 6.19 apresenta os impactos ambientais do Eco-indicador 99 (*saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos*) para cada um dos traços estudados.

Figura 6.19 – Eco indicador 99 (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

O traço FC60CH10 possui um Eco-indicador 99 maior (3,82 Pt) do que o FC60P (3,62 Pt) e FC60 (3,3 Pt), assim pode-se deduzir que a adição de 10% de CH (FC60CH10) causou um impacto ambiental um pouco maior em relação a pintura acrílica (FC60P).

Em relação ao FC60 a pintura acrílica proporcionou um aumento de 9,7%, enquanto a adição de CH impactou em 15,75%, sendo possível observar o maior impacto da CH em relação a pintura acrílica.

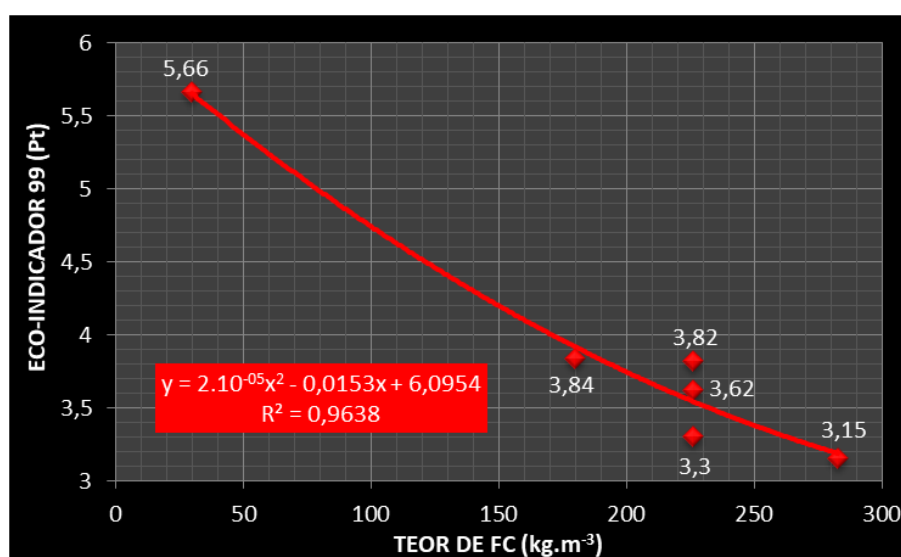
Um aspecto a ser observado é a importância da saúde humana e dos recursos no Eco-indicador 99, em que a primeira variou entre 25 e 29% e os recursos entre 64 e 68%, constatando-se uma proporcionalidade em relação ao teor de CP e/ou FC.

Também constata-se na Figura 6.19 uma diferença de 9,7% entre o FC60 e o FC60P referente a incorporação da pintura acrílica. Nota-se que ocorreu uma variação reduzida (2,22%) nos recursos, bem como houve estabilidade na qualidade dos ecossistemas. A diferença entre as misturas ocorreu na saúde humana (13,76%), indicando os potenciais riscos da tinta acrílica.

Na Figura 6.20 observa-se que o REF apresentou uma relação de 0,19 Pt/kg de FC, o traço com 50% de FC 0,021 Pt/kg (9,05 vezes menos), a média dos traços com 60% de FC 0,016 Pt/kg (11,87 vezes menos) e, finalmente, o traço com 70% de FC 0,011 Pt/kg (17,27 vezes menos).

Com isso, a substituição de 70% de CP por FC gerou a maior redução no Eco-indicador 99, tendo em vista que cada kg de FC implicou na emissão de 0,011 Pt. Neste caso, o percentual de substituição de 70% (CP por FC), no traço FC70CV10P, consiste na melhor opção para a redução dos valores referente ao Eco-indicador 99.

Figura 6.20 – Eco indicador 99 x teor de FC (PEC)



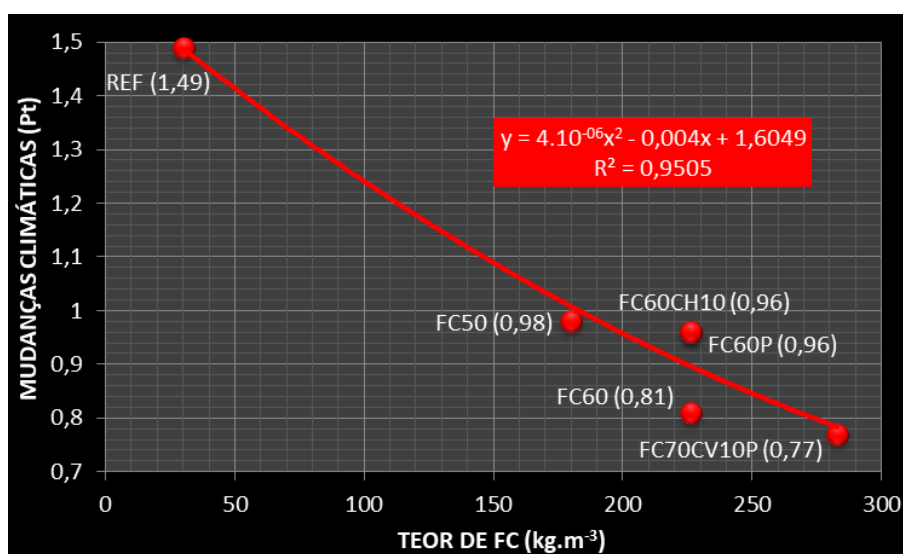
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

6.2.1.2 Impactos ambientais individuais (PEC)

6.2.1.2.1 Mudanças climáticas (PEC)

A Figura 6.21 apresenta o impacto ambiental individual mudanças climáticas em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.21 – Mudanças climáticas x teor de FC (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

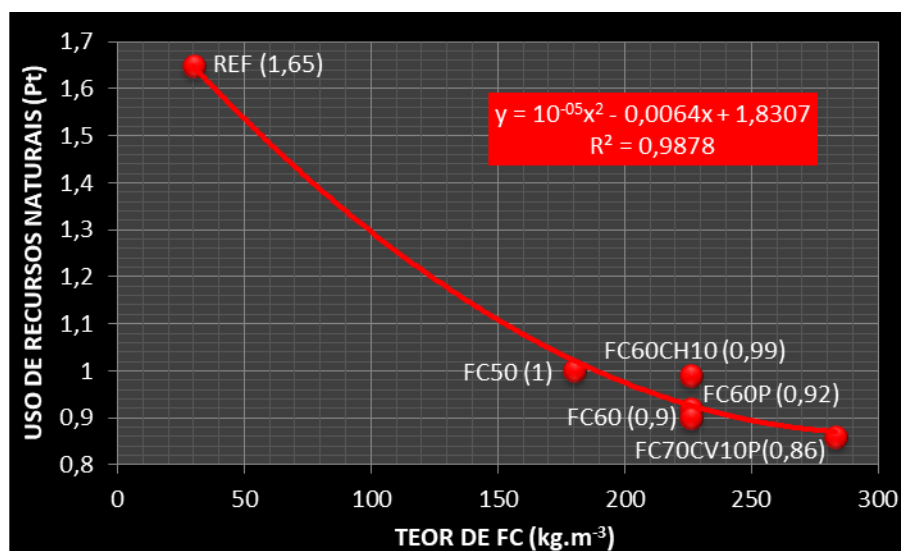
Importante notar a similaridade entre os traços FC50, FC60P e FC60CH10 no que concerne as mudanças climáticas. Ao comparar-se estas misturas ao FC60 pode-se determinar que a diferença entre elas foi de, aproximadamente, 0,16 Pt, ou seja, 10% de CP ($FC50 \neq FC60$), 10% de CH ($FC60 \neq FC60CH10$) e pintura acrílica ($FC60 \neq FC60P$) acarretaram uma variação similar em relação as mudanças climáticas. Outro ponto a ser destacado refere-se ao FC60P e FC60CH10 que apresentaram o mesmo valor (0,96 Pt), onde se pode inferir que a incorporação da tinta acrílica (FC60P) produziu um efeito similar a adição de 10% de CH (FC60CH10) no que diz respeito aos impactos relacionados as mudanças climáticas.

6.2.1.2.2 Uso de recursos naturais (PEC)

A Figura 6.22 apresenta o impacto ambiental individual uso de recursos naturais em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados. Constata-se uma similaridade entre o FC50 (1 Pt) e o FC60CH10 (0,99 Pt). A diferença entre as misturas foi de 10% a mais de

CP para a primeira e 10% a mais de CH na segunda. Ou seja, do ponto de vista do uso de recursos naturais existe uma equivalência entre a substituição de 10% de CP e a adição de 10% de CH.

Figura 6.22 – Uso de recursos naturais x teor de FC (*PEC*)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

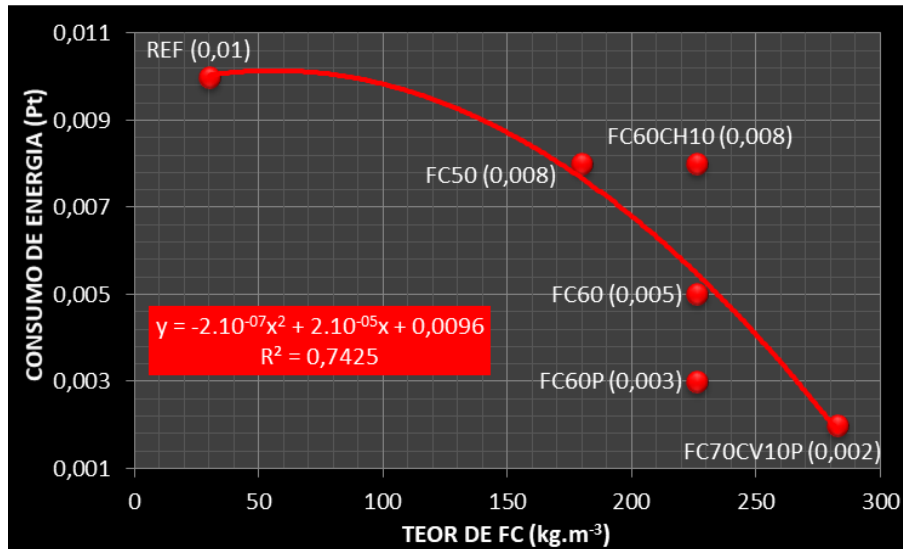
Outro ponto que merece destaque é a similaridade de valores entre o FC60 (0,9 Pt) e o FC60P (0,92 Pt), neste caso a diferença entre ambos foi a aplicação da tinta acrílica. Tendo em vista que ambas as misturas apresentam a mesma seção transversal do pilar estrutural de concreto, a diferença de 0,02 Pt refere-se exclusivamente ao uso de recursos naturais para aplicação da tinta acrílica.

6.2.1.2.3 Consumo de energia (*PEC*)

A Figura 6.23 apresenta o impacto do consumo de energia em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados. Um ponto de destaque refere-se ao consumo de energia do FC60 (0,005 Pt) ser 66,67% maior do que o FC60P (0,003 Pt). Nos itens anteriores o impacto ambiental do segundo foi maior que o primeiro, contudo, neste caso, a energia necessária às 34 lavagens previstas para o FC60, durante a vida útil, contribui para a diferença significativa no consumo de energia em relação ao FC60P. Maior diferença em relação ao FC60P pode ser observada no FC60CH10 (166,67%), neste caso além da energia relacionada as lavagens deve ser levado em conta aquela necessária para a calcinação da CH, haja visto o aglomerante ser

energo-intensivo. Neste sentido, é possível constatar que a medida que o teor de FC diminuiu (*aumenta o teor de CP*) verificou-se o crescimento no consumo de energia ligado ao CP e CH.

Figura 6.23 – Consumo de energia x teor de FC (*PEC*)

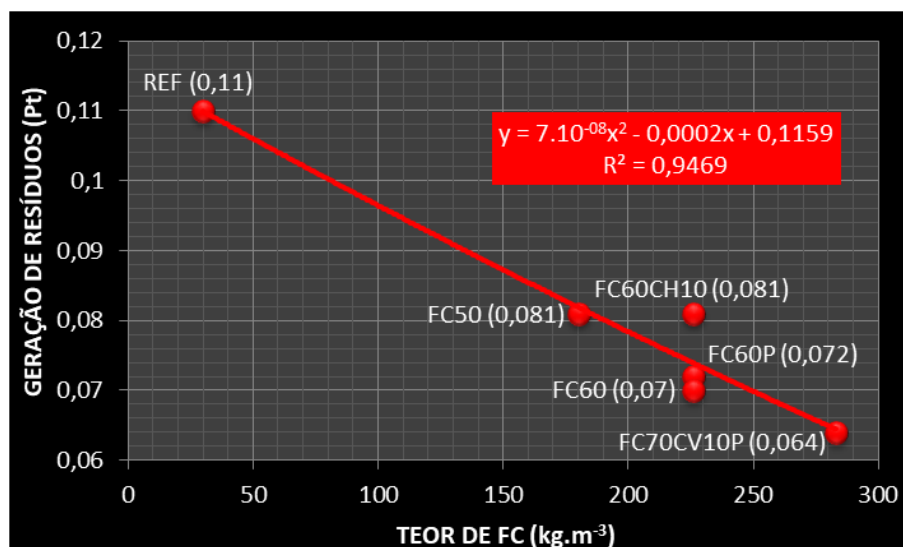


Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

6.2.1.2.4 Geração de resíduos (*PEC*)

A Figura 6.24 apresenta o impacto ambiental geração de resíduos em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.24 – Geração de resíduos x teor de FC (*PEC*)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

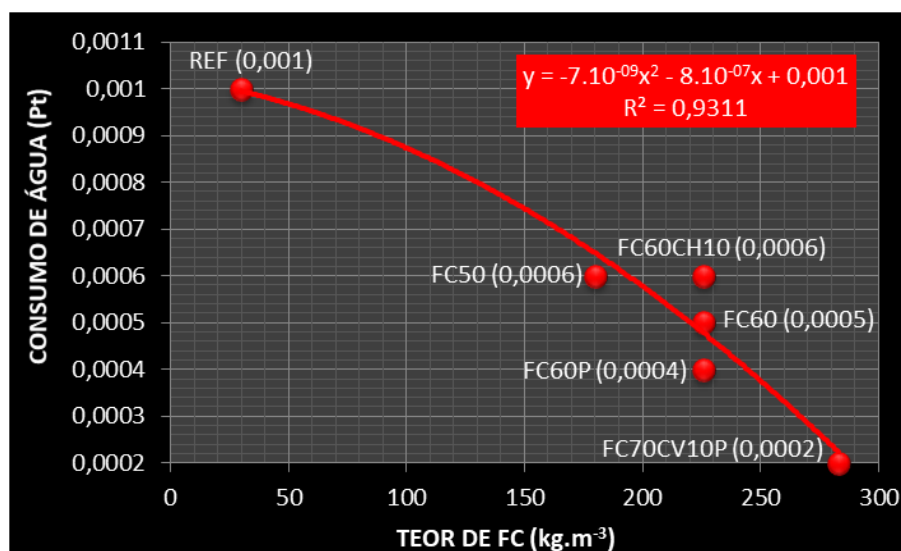
Na Figura 6.24 constata-se uma similaridade entre o FC60 (0,07 Pt) e o FC60P (0,072 Pt), neste caso a diferença de 0,002 Pt (2,86%) está relacionada a geração de resíduos da cadeia produtiva da tinta acrílica, haja visto que ambas as misturas apresentam a mesma seção transversal do pilar estrutural de concreto.

Convém anotar uma quadrupla similaridade de valores entre o FC50 e o FC60CH10: a) resistência à compressão similares ($\neq 0,91\%$); b) mesma seção transversal; c) teores equivalente de aglomerantes (FC50 – 50% CP e FC60CH10 – 40% CP + 10% CH); d) mesma geração de resíduos.

6.2.1.2.5 Consumo de água (PEC)

A Figura 6.25 apresenta o impacto ambiental consumo de água em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.25 – Consumo de água x teor de FC (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Pode-se constatar na Figura 6.25 que as misturas que apresentaram os menores consumos de água são aquelas com pintura acrílica (FC60P – 0,0004 Pt e FC70CV10P – 0,0002 Pt). Nas demais misturas estão previstas 34 lavagens durante a vida útil, o que contribui para a diferença no consumo de água destes traços.

Também pode-se verificar que quanto maior a seção transversal do pilar menor a quantidade de água requerida. Este comportamento pode estar relacionado com a quantidade

de CP incorporada em cada traço, ou seja nas seções transversais menores tem-se misturas com resistência à compressão maiores que incorporaram mais CP.

Sabe-se que a cadeia produtiva do CP demanda uma quantidade importante de água, o que justifica o comportamento observado. Como exemplo pode-se citar o FC70CV10P (20% de CP) que apresentou um consumo de água 50% inferior ao FC60P (40% de CP).

6.2.1.3 Demais índices ambientais (PEC)

A apresentação dos demais índices ambientais possui a mesma metodologia aplicada a unidade funcional metro cúbico de concreto apresentada no Item 6.1.1.4.

6.2.1.3.1 Emissão de CO_{2eq} (PEC)

A metodologia utilizada para a determinação da emissão de CO_{2eq} de cada pilar estrutural de concreto foi realizada conforme Item 6.1.1.4.1. As substâncias relevantes para o cálculo (*obtidas no inventário no programa SimaPro*) foram multiplicadas pelos seus respectivos fatores de relevância conforme Tabela 6.1, e fez-se o somatório (Σ *substância.fator*) para cada alternativa de pilar.

Esse índice (*emissão de CO_{2eq}*) é uma medida aceita internacionalmente e expõe a influência dos produtos na categoria de aquecimento global. Os gases apontados foram aqueles demonstrados no “*Quarto Relatório de Avaliação*” (IPCC, 2007) mais o vapor de água. Desses valores, foram deduzidos os valores de CO₂ absorvido pelo pilar (Item 4.7.3.2.4) ao longo da vida útil estimada, conforme Tabela 6.8 e Figura 6.26.

Tabela 6.8 – Dióxido de Carbono equivalente (PEC)

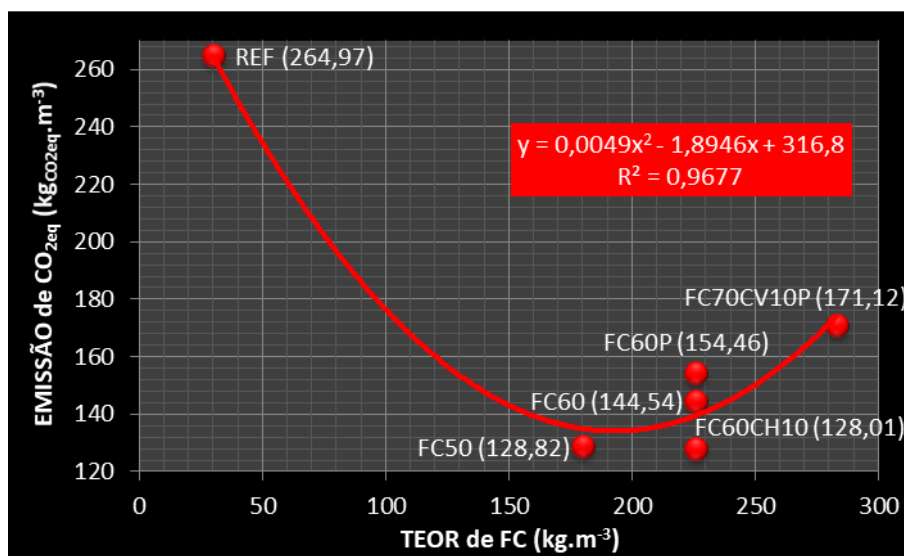
Traços	$\Sigma(\text{substância.fator})$ (kg.pilar ⁻¹)	Absorção de CO ₂ (kg.pilar ⁻¹)	CO _{2eq} (kg.pilar ⁻¹)
REF	272,66	7,69	264,97
FC50	134,16	5,34	128,82
FC60	149,22	4,68	144,54
FC60P	159,14	4,68	154,46
FC60CH10	133,35	5,34	128,01
FC70CV10P	173,7	2,58	171,12

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A Figura 6.26 apresenta a emissão de CO_{2eq} em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados. Diferentemente da unidade funcional metro cúbico de concreto, o pilar

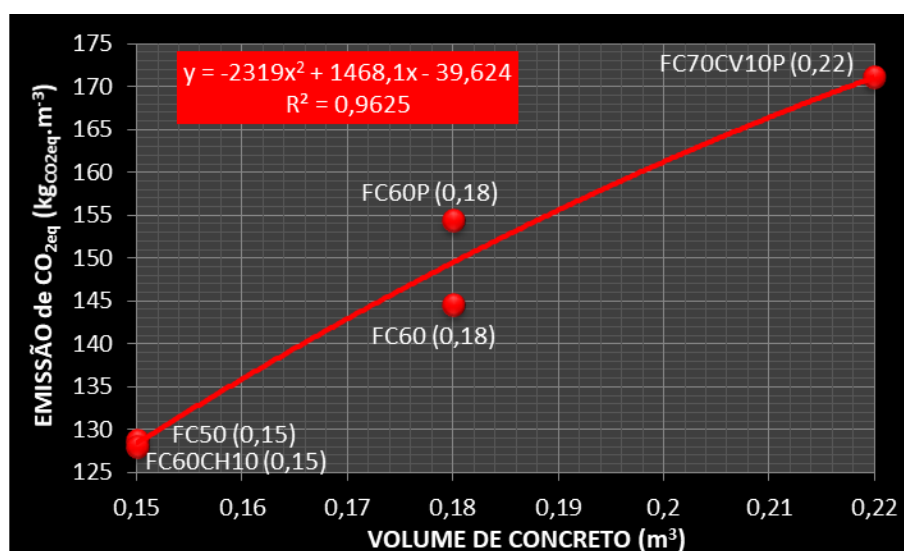
estrutural de concreto não apresenta uma proporcionalidade entre o aumento no teor de FC e a diminuição da emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Neste caso, a proporcionalidade ocorreu entre o volume de concreto de cada pilar estrutural de concreto e a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, conforme pode ser observado na Figura 6.27

Figura 6.26 – Emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ x teor de FC (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 6.27 – Emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ x volume de concreto (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na Figura 6.27 à medida que o volume do pilar estrutural de concreto aumenta há um incremento na emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Este comportamento está relacionado com o maior volume

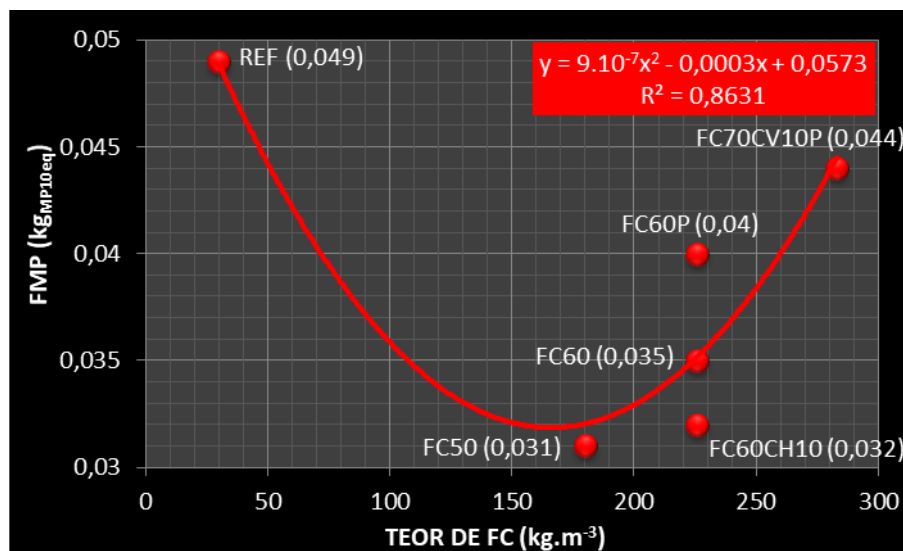
de material contido em cada pilar estrutural de concreto. Neste caso, fica nítida a diferença entre o FC60P e o FC60, ambos os traços possuem o mesmo volume no pilar estrutural de concreto, todavia a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ foi 6,86% maior no primeiro devido às emissões relacionadas com a tinta acrílica.

Outro ponto que merece destaque é a similaridade de emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ entre o FC50 e o FC60CH10. Considerando que as únicas diferenças entre ambos são 10% a mais de CP no FC50 e 10% a mais de CH no FC60CH10, pode-se afirmar, então, que as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de ambos os aglomerantes citados são muito próximas. Em outras palavras a cadeia produtiva da CH gera, praticamente, as mesmas emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ que a do CP.

6.2.1.3.2 Formação de material particulado (PEC)

A Figura 6.28 apresenta a formação de material particulado em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Figura 6.28 – Formação de material particulado x teor de FC (PEC)

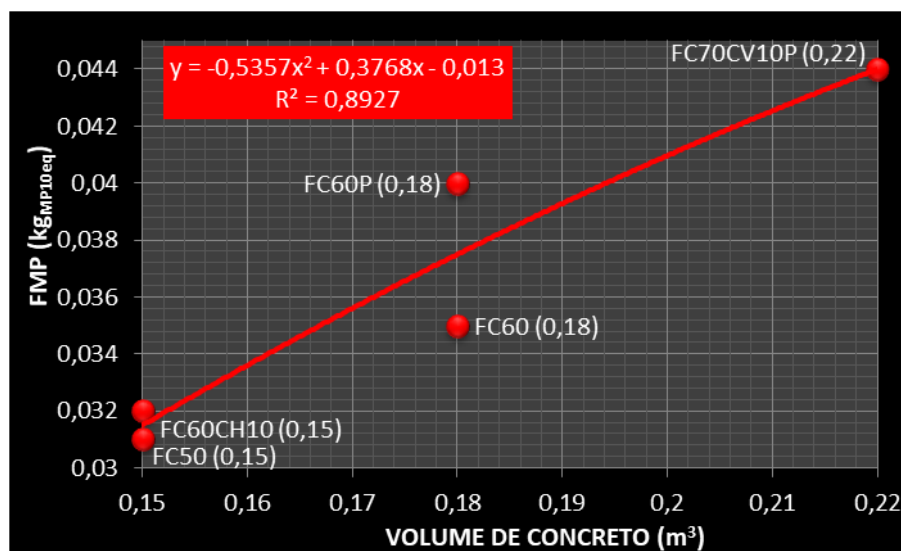


Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Da mesma forma que foi apresentado na emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ do PEC, não houve uma proporcionalidade entre o aumento no teor de FC e a diminuição na formação de material particulado.

Neste caso a proporcionalidade ocorreu entre o volume de concreto de cada pilar estrutural de concreto e a formação de material particulado, conforme pode ser observado na Figura 6.29.

Figura 6.29 – Formação de material particulado x volume de concreto (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Ao analisar a Figura 6.29 constata-se que os pilares com volume de $0,15 \text{ m}^3$ (*FC50* e *FC60CH10*) apresentaram uma diferença de, apenas, 3,13% na emissão de material particulado. Esta pequena variação está relacionada à similaridade no teor de aglomerantes (*CP* e *CH*) tendo em vista que o *FC50* possui 50% de *CP*, enquanto o *FC60CH10* possui 40% de *CP* e 10% de *CH*. Tendo em vista a similaridade do processo produtivo de ambos os aglomerantes (*calcinação à altas temperaturas*), justifica-se que a formação de material particulado seja equivalente.

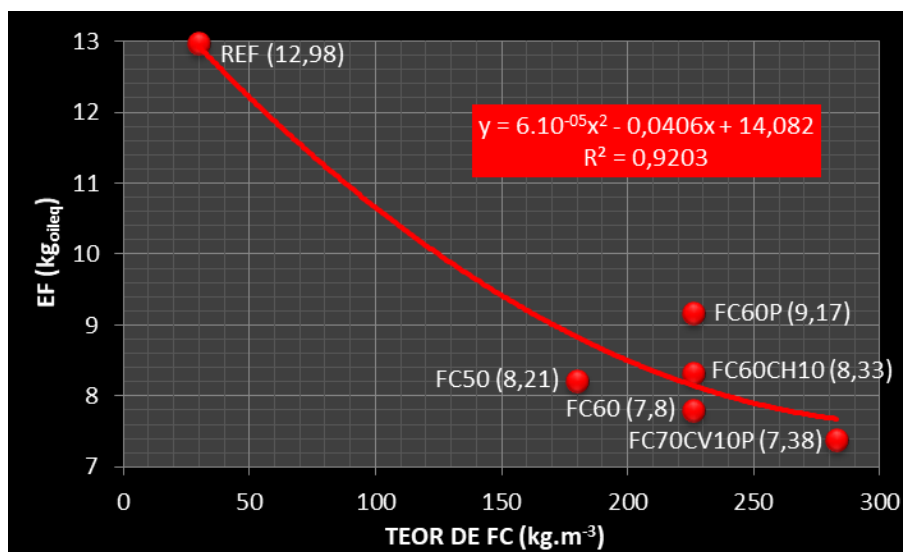
Por outro lado, na mesma Figura 6.29, os pilares com volume de $0,18 \text{ m}^3$ (*FC60* e *FC60P*) apresentaram uma diferença de 14,29% na emissão de material particulado, advinda do processo produtivo da tinta acrílica. Com isso, é possível afirmar que a produção da tinta acrílica contribuiu com uma formação de material particulado de $0,005 \text{ kg}_{\text{MP10eq}}$, no caso do *FC60P*. Em relação ao *FC70CV10P* foi observado uma formação de material particulado de $0,044 \text{ kg}_{\text{MP10eq}}$ tendo em vista do maior volume do pilar estrutural de concreto ($0,22 \text{ m}^3$).

6.2.1.3.3 Esgotamento fóssil (PEC)

A Figura 6.30 apresenta o esgotamento fóssil em relação ao teor de FC para cada um dos traços estudados.

Diferentemente da emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e da formação de material particulado, constata-se, neste caso que a medida que o teor de FC aumentou ocorre uma diminuição do esgotamento fóssil.

Figura 6.30 – Esgotamento fóssil x teor de FC (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Importante notar que, depois do REF, o traço que apresentou o maior esgotamento fóssil foi o FC60P devido ao maior volume do pilar estrutural de concreto e a cadeia produtiva da tinta acrílica que utiliza de forma intensiva derivados de petróleo. Também observa-se, novamente, a similaridade entre o FC50 e o FC60CH10 (*≠ de 1,46%*). A reduzida diferença entre ambas as misturas está relacionada ao teor equivalente de aglomerante (*50% de CP contra 40% de CP e 10% de CH*) que demandam combustíveis fósseis para sua calcinação.

Importante notar a variação dos valores referentes ao EF dos traços com 60% de FC. Tomando por base o FC60CH10 através da sua relação entre EF e área de formas ($3,22 \text{ kg}_{\text{oileq}} \cdot \text{m}^{-2}$) e comparando-se com o FC60P ($3,18 \text{ kg}_{\text{oileq}} \cdot \text{m}^{-2}$), constata-se uma diferença muito pequena (*1,24%*) entre ambas as misturas. Esta reduzida variação indica que o EF provocado pela aplicação da tinta acrílica (FC60P) é proporcionalmente, muito próxima da adição de 10% de CH (FC60CH10).

6.2.1.4 Análise estatística integrada dos impactos ambientais (PEC)

Na Tabela 6.9 consta a análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais, nela foram comparadas a ANOVA de fator único para o Eco-indicador 99, consumo de água, consumo de energia, geração de resíduos, mudanças climáticas, uso de recursos naturais, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil.

Tabela 6.9 – Análise estatística integrada dos resultados dos impactos ambientais (PEC)

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F _{crítico}	R ²
Emissão de CO _{2eq}	39.713,39	5	7.942,68	7,94.10 ⁷	1,12.10 ⁻⁴⁴	3,11	0,99
Esgotamento fóssil	63,04	5	12,61	126.078,9	6,98.10 ⁻²⁸	3,11	0,99
Eco-indicador 99	12,32	5	2,47	24.650,9	1,25.10 ⁻²³	3,11	0,99
Recursos naturais	1,32	5	0,26	2.649,2	8,05.10 ⁻¹⁸	3,11	0,99
Mudanças climáticas	1,01	5	0,2	2.022,8	4,06.10 ⁻¹⁷	3,11	0,99
Formação de material particulado	7,61.10 ⁻⁴	5	1,52.10 ⁻⁴	152,1	2,02.10 ⁻¹⁰	3,11	0,98
Geração de resíduos	3,96.10 ⁻³	5	7,93.10 ⁻⁴	45,3	2,23.10 ⁻⁷	3,11	0,95
Consumo de energia	1,5.10 ⁻⁴	5	3.10 ⁻⁵	30	2,2.10 ⁻⁶	3,11	0,93
Consumo de água	1,07.10 ⁻⁶	5	2,13.10 ⁻⁷	21,3	1,38.10 ⁻⁵	3,11	0,90

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Em todos os índices ambientais o valor de “F” foi superior ao “F_{crítico}” (3,11) indicando que as variáveis em questão possuem influência mais ou menos significativa nos resultados do ponto de vista estatístico. Ou seja, quantidade de CP e CH, tipo e teor das AM (FC e CV) geraram variações nos índices estudados.

Pode-se observar que o índice que possui a influência mais relevante foi a emissão de CO_{2eq}, seguido do esgotamento fóssil, Eco-indicador 99, recursos naturais, mudanças climáticas, formação de material particulado, geração de resíduos, consumo de energia e consumo de água. Quanto maior o valor de “F”, menor o “Valor-P” e mais próximo de 1 encontra-se o coeficiente de determinação R².

Para a emissão de CO_{2eq} o valor de “F” foi 7,94.10⁷ (maior valor de F), o “Valor-P” foi 1,12.10⁻⁴⁴ (menor Valor-P) e R² 0,99 (maior valor de R²); em relação ao consumo de água o valor de “F” foi 21,3 (menor valor de F), o “Valor-P” foi 1,38.10⁻⁵ (maior Valor-P) e R² 0,9 (menor valor de R²).

Com base nestes dados é possível perceber que, apesar do valor de “F” ter sido superior ao “F_{crítico}” em, todos os índices, a significância foi maior na emissão de CO_{2eq} quando comparada ao consumo de água, por exemplo. Neste caso, pode-se dizer que as

variações no CP e CH, tipo e teor das AM (*FC e CV*) geraram um impacto maior na emissão de CO_{2eq} quando comparado com ao consumo de água.

6.2.2 CCV (*PEC*)

Conforme a norma NBR ISO 15686-5 (ABNT, 2017) o CCV pode ser definido como sendo a quantificação do custo de um produto ou de suas partes ao longo do seu ciclo de vida. Para tanto, deve atender aos requisitos de desempenho para os quais foi originalmente concebido.

De maneira geral, o CCV deve levar em conta um rol de custos referentes a um determinado período do ciclo de vida, tais como, custos de: a) construção; b) operação; c) manutenção; d) disposição final. Um ponto importante a ser considerado no CCV refere-se que uma dada solução escolhida na ACV precisa ser viável em relação aos aspectos econômicos envolvidos.

Desta maneira, fica evidenciado que o CCV está estruturado com o objetivo de dotar uma vantagem competitiva à longo prazo (*vida útil do pilar estrutural de concreto*), minimizando os custos do ciclo de vida. Todavia, esta vantagem competitiva não pode e não deve afetar a qualidade final do desempenho do produto, assim sendo o CCV deve permitir a escolha mais eficiente com um custo total menor.

Da análise integrada dos dados que compõe a ACV e o CCV é possível a identificação de pontos críticos do processo. A partir daí é possível a promoção de melhorias no produto, trazendo resultados tanto do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Foram calculados, com base no consumo de materiais, os custos necessários à execução dos pilares estruturais de concreto, levando em consideração a abordagem do berço ao túmulo, em conformidade ao estudo da ACV realizada. A Tabela 6.10 e a Figura 6.31 mostram os resultados obtidos referente aos custos totais, do berço ao túmulo, com encargos sociais obrigatórios de 110,61%.

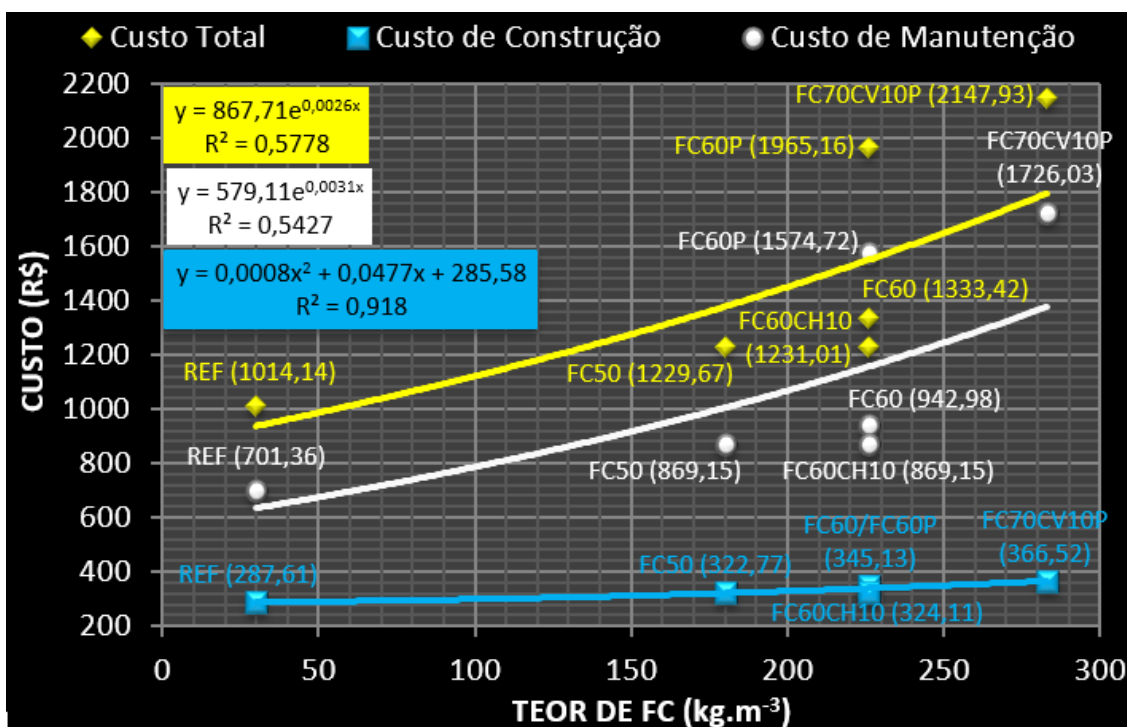
Os resultados obtidos são referentes a dezembro/2020, de acordo com as consultas feitas à TCPO (2020) e à Tabela de encargos sociais (*RS*) do SINAPI (*Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil*). As planilhas de custos unitários que compõe a avaliação do CCV (APÊNDICE C).

Tabela 6.10 – Custos de cada fase do PEC

Item	Custos com encargos sociais (R\$.pilar ⁻¹)					
	REF	FC50	FC60	FC60P	FC60CH10	FC70CV10P
Construção	287,61	322,77	345,13	345,13	324,11	366,52
Lavagem	701,36	869,15	942,98	-	869,15	-
Pintura	-	-	-	1.574,72	-	1.726,03
Desconstrução	19,72	29,58	35,5	35,5	29,58	43,39
Transporte	4,52	6,78	8,14	8,14	6,78	9,95
Manejo do RCD	0,93	1,39	1,67	1,67	1,39	2,04
Total	1.014,14	1.229,67	1.333,42	1.965,16	1.231,01	2.147,93

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura 6.31 – Custos do PEC x teor de FC



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Na presente pesquisa foram contabilizados somente os custos diretos, sendo os custos de Bonificação e Despesas Indiretas (*BDI*) desconsiderados. Também não entraram no computo dos custos da unidade funcional (*pilar estrutural de concreto*) despesas como: a) impostos; b) taxas de qualquer natureza; c) emolumentos cartoriais; d) projetos arquitetônico; e) projeto estrutural; f) engenheiro; g) remuneração do construtor e/ou incorporador; h) serviços preliminares; i) alojamento; j) limpeza de obra; k) canteiro de obras; l) custos de ensaios; m) locação; n) depreciação.

O CCV foi calculado para cada tipo de traço referenciado à unidade funcional (*pilar estrutural de concreto*) sendo seu resultado expresso em R\$.pilar⁻¹. Os valores são representativos da unidade funcional, uma vez que são função do consumo de materiais empregados.

Os resultados do CCV, apresentados na Tabela 6.10, contêm as variáveis consideradas de acordo com o escopo da ACV definido para esta pesquisa, onde foram computados custos: a) dos materiais; b) da mão de obra; c) dos insumos da construção; d) de manutenção; e) de demolição; f) de manejo do RCD. Para o cálculo do custo de manutenção, foram considerados: a) um período de referência, mínimo de 50 anos, equivalente à vida útil adotada nos cálculos dos indicadores ambientais; b) eventos de manutenção previstos, com intervalo de 3 anos para a lavagem e 10 anos para a pintura.

A Figura 6.31 mostra que o aumento no teor de FC conduz a uma elevação proporcional dos custos do pilar estrutural de concreto. Sendo que a relação de proporcionalidade foi mais significativa no custo de construção ($R^2 0,918$), seguida do custo total ($R^2 0,5778$) e, por fim, do custo de manutenção ($R^2 0,5427$).

A razão para o aumento dos custos à medida que mais FC é incorporado nos traços está relacionada com a resistência à compressão, ou seja, menos CP implica em menor capacidade portante, haja visto que os esforços são os mesmos para todos os pilares estruturais de concreto. Para compensar a diminuição da resistência à compressão, advinda do aumento no teor de FC, faz-se necessário majorar a seção transversal do pilar o que implica em um incremento no volume de material necessário, conduzindo a uma elevação dos custos.

Um ponto a ser destacado refere-se a diferença no custo de manutenção entre os pilares sem pintura (*lavagem*) e com pintura. Os pilares sem pintura apresentaram um custo de manutenção médio de R\$845,66. Já os pilares com pintura apresentaram um custo de manutenção médio de R\$1650,38. Ou seja, os pilares com pintura apresentaram um custo de manutenção quase o dobro daqueles sem pintura.

Todavia, o custo de construção demonstrou uma outra realidade, neste caso os pilares sem pintura apresentaram uma média de R\$319,91, enquanto os pilares com pintura apresentaram uma média de R\$355,83. Desta forma, a diferença entre os dois tipos de pilares é de, apenas 11,23%, valor este muito inferior ao constatado no custo de manutenção. Com isso, pode-se inferir que a pintura impacta de maneira bastante significativa os custos de manutenção e, por consequência, os custos totais dos pilares.

A proporcionalidade entre o custo de construção e o custo total nos pilares sem pintura ficou em um intervalo entre 25,88% e 28,36%, com uma média de 26,71%. Para os pilares

com pintura o custo de construção ficou em um intervalo entre 17,06% e 17,56%, com uma média de 17,31%.

Neste caso, em particular, pode-se depreender dois aspectos: 1º) a coerência entre os custos de construção e totais demonstrado pela proporcionalidade entre os traços; 2º) a partir de valores médios pode-se constatar que o peso do custo de construção sobre o custo total é 54,3% maior nos traços sem pintura quando comparados aos com pintura, denotando o maior custo da pintura acrílica.

Ainda em relação aos traços com e sem pintura cabe destacar que o FC70CV10P (R\$2147,93) apresentou um custo 111,8% maior que o REF (R\$1014,14), demonstrando que, neste quesito, ele não apresenta uma performance adequada em relação ao aspecto econômico. Importante lembrar que dos 9 índices ambientais apresentados anteriormente o FC70CV10P apresentou o melhor desempenho em 7 (77,78%) e o REF obteve o pior resultado em todos.

Considerando que o REF possui um custo muito competitivo, todavia apresenta uma sustentabilidade ambiental reduzida e que os traços com pintura apresentam o inverso, pode-se realizar uma análise econômica a partir do ponto de vista da preservação do meio ambiente onde destacam-se as misturas FC50, FC60 e FC60CH10. Estes traços apresentaram um custo médio de R\$1264,7, sendo, em média, 24,71% mais caros que o REF e 41,12% mais baratos que o FC70CV10P. Do ponto de vista ambiental apresentaram, em média, 56,67% menos CP que o REF e 23,33% mais que o FC70CV10P.

Neste sentido cabe destacar a equivalência entre os traços FC50 e FC60CH10 apresentando uma diferença de custo bastante reduzida. Estes traços apresentaram um desempenho equivalente em vários parâmetros apresentados no presente trabalho, contudo, no aspecto econômico, ocorreu uma similaridade tanto na unidade funcional metro cúbico de concreto como no pilar estrutural de concreto, conforme pode ser observado na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Similaridades entre os traços FC50 e FC60CH10

Quesito	Unidade	FC50	FC60CH10	Diferença (%)
Custo total (MCC)	R\$	614,18	623,3	1,48
Custo de construção (PEC)	R\$	322,77	324,11	0,41
Custo de manutenção (PEC)	R\$	869,15	869,15	-
Custo total (PEC)	R\$	1229,67	1231,01	0,11
(MCC) Metro Cúbico de Concreto / (PEC) Pilar Estrutural de Concreto				

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

As diferenças de custo apresentadas na Tabela 6.11 são inferiores a 1,5% demonstrando uma similaridade significativa entre os traços neste quesito. Dois aspectos contribuíram, de forma decisiva, para equivalência econômica entre as duas misturas: 1º) os traços com teores de aglomerantes muito próximos (*FC50 – 50% de CP; FC60CH10 – 40% de CP e 10% de CH*); 2º) a quantidade equivalente de aglomerantes levou a uma resistência a compressão muito próxima (*FC50 – 87,8 MPa; FC60CH10 – 88,6 MPa*) acarretando pilares com seções idênticas.

6.2.3 Avaliação dos resultados ambientais, econômicos e de durabilidade (PEC)

Nos itens anteriores, foram analisados os resultados do ponto de vista ambiental, econômico e de durabilidade sendo que, para cada aspecto, foram adotados índices específicos. Neste item foram escolhidos alguns índices com a finalidade de compor a análise integrada da sustentabilidade dos traços estudados.

No aspecto econômico foi escolhido o índice de custo (*Ic*), no aspecto ambiental foi escolhido o índice impacto ambiental (*Ia*) e no aspecto de durabilidade foi escolhido índice durabilidade (*Id*).

O *Ia* será composto pela ponderação unitária dos seguintes índices ambientais: Eco-indicador 99 (*saúde humana, qualidade dos ecossistemas e uso de recursos naturais*), mudanças climáticas, geração de resíduos, consumo de água, consumo de energia, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil.

Sendo que cada um deles foi dividido pelo indicador de durabilidade (*vida útil em anos*). O impacto ambiental individual uso de recursos naturais não foi utilizado por já estar incluído no Eco-indicador 99.

Para a determinação do *Ia* foi realizada a ponderação unitária de cada índice ambiental citado, ou seja, os valores foram expressos entre 0 e 1 e obtidos pela divisão entre os cenários do maior pelo de menor valor. Após, foi realizada a média da ponderação unitária de cada índice ambiental com o intuito de determinar o *Ia*.

O *Ic* é composto pela ponderação unitária dos custos do pilar estrutural de concreto (*construção, manutenção, desconstrução e total*) de cada traço estudado dividido pelo indicador de durabilidade (*vida útil em anos*). Após, foi realizada a média da ponderação unitária de cada tipo de custo com o intuito de determinar o *Ic*. Os cálculos para a determinação do *Ia* e do *Ic* podem ser observados na Tabela 6.12 e Tabela 6.13.

Conforme apresentado no Item 5.2.3, a exceção do FC70CV10 e FC70CV10CH10 que apresentaram respectivamente 4 e 29 anos de vida útil, todos os demais traços estudados

apresentaram uma vida útil no limite superior do tempo estimado provável, ou seja, 100 anos. Desta maneira, o Ia e o Ic não foram divididos pela vida útil dos traços estudados tendo em vista que todos apresentaram o mesmo valor.

Desta forma, o critério durabilidade, dado pelo índice de durabilidade (*Id*), não foi utilizado devido ao excelente desempenho dos traços estudados, a exceção das duas misturas FC70CV10 e FC70CV10CH10, as quais apresentaram uma vida útil estimada inferior a 50 anos.

Tabela 6.12 – Composição do índice de impacto ambiental (*PEC*)

Índice ambiental	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60P	FC60CH10	FC70CV10P
1 - Saúde humana	Pt	3,66	2,58	2,18	2,48	2,57	2,1
	Unitário	1,00	0,70	0,60	0,68	0,70	0,57
2 - Qualidade dos ecossistemas	Pt	0,35	0,26	0,22	0,22	0,26	0,19
	Unitário	1,00	0,74	0,63	0,63	0,74	0,54
3 – Uso de recursos naturais	Pt	1,65	1	0,90	0,92	0,99	0,86
	Unitário	1,00	0,61	0,55	0,56	0,6	0,52
4 - Mudanças climáticas	Pt	1,49	0,98	0,81	0,96	0,96	0,77
	Unitário	1,00	0,66	0,54	0,64	0,64	0,52
5 - Geração de resíduos	Pt	0,11	0,081	0,07	0,072	0,081	0,064
	Unitário	1,00	0,74	0,64	0,65	0,74	0,58
6 - Consumo de água	Pt	0,001	0,0006	0,0005	0,0004	0,0006	0,0002
	Unitário	1,00	0,6	0,5	0,4	0,6	0,2
7 - Consumo de energia	Pt	0,01	0,008	0,005	0,003	0,008	0,002
	Unitário	1,00	0,8	0,5	0,3	0,8	0,2
8 - Emissão de CO _{2eq}	kgCO _{2eq}	264,97	128,82	144,54	154,46	128,01	171,12
	Unitário	1,00	0,49	0,55	0,58	0,48	0,65
9 - Formação de material particulado	kgMP _{10eq}	0,049	0,031	0,035	0,040	0,032	0,044
	Unitário	1,00	0,63	0,71	0,82	0,65	0,9
10 - Esgotamento fóssil	kg _{oileq}	12,98	8,21	7,8	9,17	8,33	7,38
	Unitário	1,00	0,63	0,60	0,71	0,64	0,57
Ia - ($\sum I$ a 10 unitário).10 ⁻¹		1	0,66	0,58	0,6	0,66	0,52

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela 6.13– Composição do índice de custo (*PEC*)

Índice de custo	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60P	FC60CH10	FC70CV10P
1 – Custo de construção	R\$	287,61	322,77	345,13	345,13	324,11	366,52
	Unitário	0,78	0,88	0,94	0,94	0,88	1
2 – Custo de manutenção	R\$	701,36	869,15	942,98	1.574,72	869,15	1.726,03
	Unitário	0,41	0,5	0,55	0,91	0,5	1
3 – Custo de desconstrução	R\$	25,17	37,75	45,31	45,31	37,75	55,38
	Unitário	0,45	0,68	0,82	0,82	0,68	1
4 – Custo total	R\$	1014,14	1229,67	1.333,42	1.965,16	1.231,01	2.147,93
	Unitário	0,47	0,57	0,62	0,91	0,57	1
Ic - ($\sum I$ a 4 unitário).4 ⁻¹		0,53	0,66	0,73	0,9	0,66	1

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

6.2.4 Indicador global de sustentabilidade (PEC)

Para estabelecer o melhor pilar, do ponto de vista da sustentabilidade, foi utilizada a mesma metodologia apresentada no Item 6.1.4. Na Tabela 6.14 é possível observar os valores para o indicador global de sustentabilidade para os 6 traços estudados.

Tabela 6.14 – Indicador global de sustentabilidade (PEC)

Indicador	REF	FC50	FC60	FC60P	FC60CH10	FC70CV10P
ACV Ia	1	0,66	0,58	0,6	0,66	0,52
CCV Ic	0,53	0,66	0,73	0,9	0,66	1
Is	1,13	0,93	0,93	1,08	0,93	1,13
Posição	3°	1°	1°	2°	1°	3°

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Ao analisar a Tabela 6.14 observa-se um triplo empate na primeira posição entre os traços FC50, FC60 e FC60CH10, na segunda posição aparece o FC60P, seguido do REF e FC70CV10P em último lugar. Não é possível identificar uma tendência em relação a classificação dos traços estudados seja em relação a aspectos ambientais (ACV), seja em relação a questões de custo (CCV).

Ao analisar o indicador global de sustentabilidade (Is) dos pilares é possível constatar que os três traços mais sustentáveis possuem equilíbrio entre um bom desempenho quanto aos aspectos ambientais, bem como ao custo. Os demais traços que não apresentaram este equilíbrio, possuem um desempenho prejudicado, frente à sustentabilidade. Desta forma é possível notar que o indicador global de sustentabilidade (Is) combina, de forma ponderada, os dois índices escolhidos (Ia e Ic) de maneira a indicar qual combinação possui a melhor sustentabilidade.

Seria de esperar que os traços com maior teor de FC (FC70CV10P) ou com menor custo (REF) apresentassem melhor desempenho em relação à sustentabilidade haja visto os números apresentados, contudo os valores extremos em ambos os casos não contribuem para uma avaliação ponderada. É importante notar que, ao utilizar-se o indicador global de sustentabilidade, o pilar com menor custo ou impacto ambiental mais baixo não será, necessariamente, aquele mais bem posicionado no ranking, pois o Is leva em consideração a ponderação entre aspectos econômicos e ambientais.

Devido aos fatores citados os traços FC50, FC60 e FC60CH10 apresentaram o melhor indicador global de sustentabilidade. Em relação aos demais traços, em especial o FC70CV10P e REF é importante frisar que a sustentabilidade não pode ser mensurada

somente através dos menores valores de Ia e Ic respectivamente mas, sobretudo, pelo equilíbrio entre estes índices.

Na Tabela 6.14 é possível observar similaridade bastante acentuada entre os três traços classificados em primeiro lugar, em especial o FC50 e o FC60CH10, os quais apresentaram valores iguais de Ia, Ic e Is demonstrando equilíbrio entre os fatores ambientais (*ACV/Ia*) e de custo (*CCV/Ic*). Apesar do FC60 ter alcançado o mesmo valor de Is, constata-se que o aspecto ambiental (*Ia de 0,58*) possui maior peso que o aspecto de custo (*Ic de 0,73*).

Na Tabela 6.15 pode-se verificar a similaridade entre diversos parâmetros nos traços FC50 e FC60CH10, nela são apresentados 15 parâmetros utilizados como insumos diretos e/ou indiretos para calcular o indicador global de sustentabilidade do FC50 e FC60CH10, sendo que em 7 (46,67%) não houve diferença (*valores iguais*) e nos 8 restantes (53,33%) o coeficiente de variação foi inferior a 2,25%.

Tabela 6.15 – Similaridade entre diversos parâmetros nos traços FC50 e FC60CH10

Parâmetro	Unidade	FC50	FC60CH10	Média	Coefficiente Variação (%)
Volume de concreto	m ³	0,15	0,15	0,15	0
Eco-indicador 99	Pt	3,84	3,82	3,83	0,37
Mudanças climáticas	Pt	0,98	0,96	0,97	1,46
Uso de recursos naturais	Pt	1	0,99	0,995	0,71
Consumo de energia	Pt	0,08	0,08	0,08	0
Geração de resíduos	Pt	0,081	0,081	0,081	0
Consumo de água	Pt	0,0006	0,0006	0,0006	0
Emissão de CO _{2eq}	kg.pilar ⁻¹	128,82	128,01	128,42	0,45
Formação de material particulado	kg _{MP10eq}	0,031	0,032	0,0315	2,24
Esgotamento fóssil	kg _{oileq}	8,21	8,33	8,27	1,03
Custo de construção	R\$	322,77	324,11	323,44	0,29
Custo de manutenção	R\$	869,15	869,15	869,15	0
Custo total	R\$	1229,67	1231,01	1230,34	0,08
Índice de impacto ambiental	Adimensional	0,66	0,66	0,66	0
Índice de custo	Adimensional	0,66	0,66	0,66	0

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

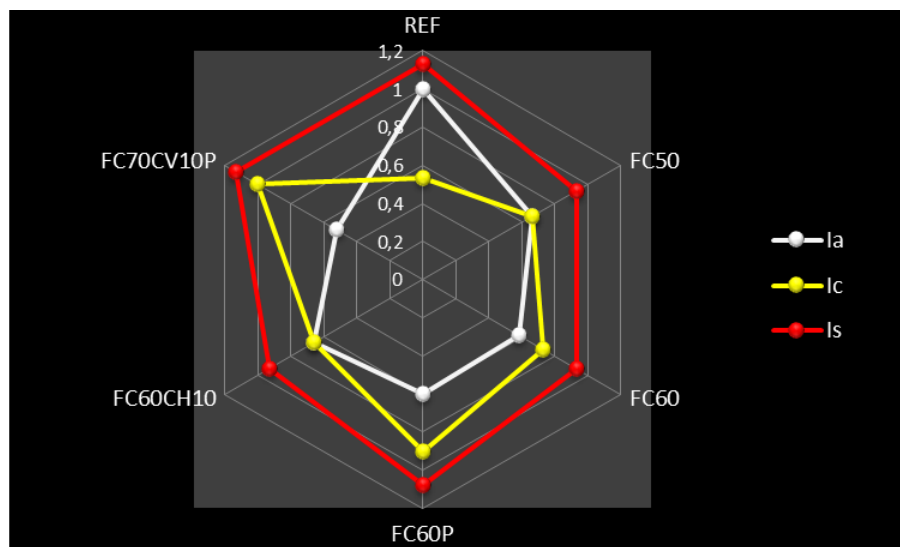
Os valores apresentados denotam um comportamento muito próximo entre os dois traços seja do ponto de vista ambiental e/ou econômico advindo de um proporcionamento dos constituintes (*CP, FC, CH, etc.*) muito semelhante que gerou resistências à compressão similares e, por conseguinte, tamanho de pilares iguais.

Outra forma de apresentação dos índices Is, Ia e Ic é apresentada na Figura 6.32, nela observa-se a posição relativa dos parâmetros, uns em relação aos outros, de modo a obter-se uma visão mais clara do contexto da sustentabilidade. Na Figura 6.32, o índice de impacto

ambiental (I_a) está totalmente contido dentro do índice de custo (I_c) indicando que, o parâmetro ambiental possui um desempenho melhor que o econômico.

A exceção a este comportamento foi o REF que possui um I_c menor que o I_a indicando uma prevalência do aspecto econômico em detrimento do ambiental. Devido a grande diferença entre os índices ambientais (I_a) e de custo (I_c) tanto o REF como o FC70CV10P foram classificados em último lugar.

Figura 6.32 – Indicador global de sustentabilidade – gráfico tipo “radar” (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

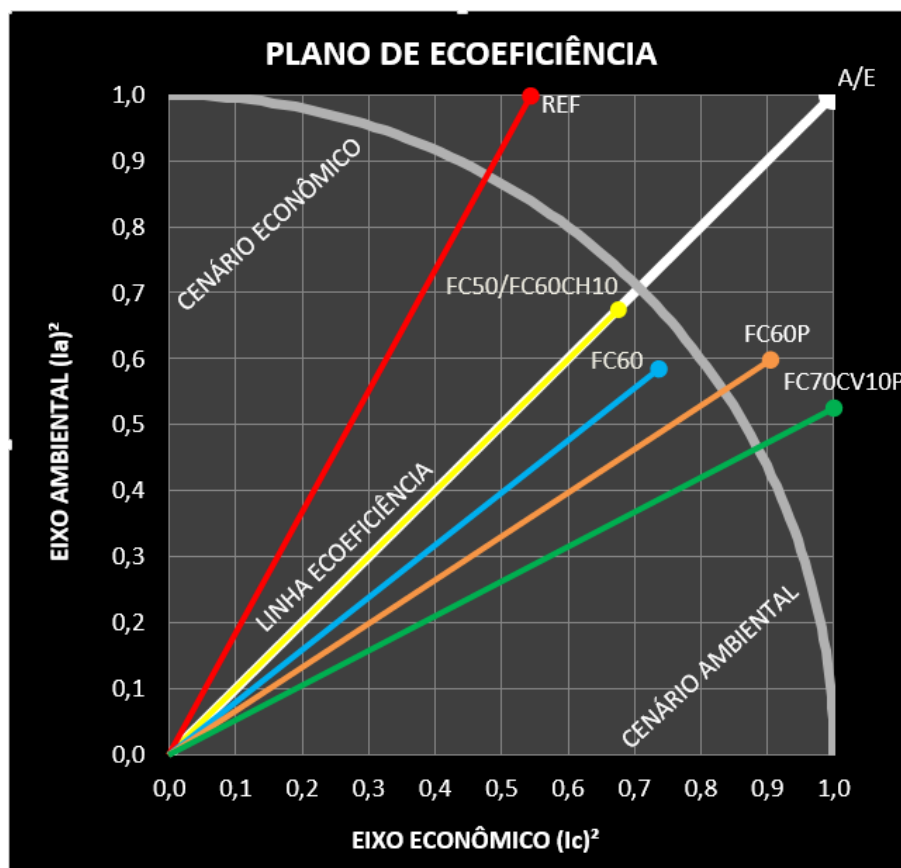
A constatação de que os pilares são mais eficientes do ponto de vista ambiental pode ser verificada na Figura 6.33 através do plano de ecoeficiência. A linha diagonal em branco indica a tendência de um dado traço com um equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos. Desta forma, quanto mais próximo um traço estiver desta linha diagonal melhor será seu desempenho relativo em relação a estes dois aspectos.

Já do ponto de vista absoluto, o melhor resultado é aquele que mais se aproxima da origem por apresentar os menores valores nos aspectos ambientais e econômicos. Também é possível constatar que acima da linha diagonal branca se localiza a área de prevalência do cenário econômico e abaixo dela, o cenário ambiental.

Assim, na Figura 6.33, foram plotados os pontos referentes a cada traço onde se pode verificar que os primeiros colocados ($FC50$, $FC60$ e $FC60CH10$) estão mais próximos da origem. No lado oposto observa-se o REF (coordenadas $0,53;1$) e FC70CV10P (coordenadas $1; 0,52$) classificados em último lugar, apresentando um desequilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos (linha diagonal branca).

Com isso, constata-se que a melhor classificação está relacionada com a posição relativa de um ponto próximo à linha diagonal e a origem, concomitantemente, como é o caso do FC50 e FC60CH10.

Figura 6.33 – Plano de ecoeficiência (PEC)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Com isso, apesar das três misturas (*FC50*, *FC60* e *FC60CH10*) terem apresentado o mesmo valor para o indicador global de sustentabilidade (*I_s*) os traços *FC50* e *FC60CH10* apresentaram um melhor “*equilíbrio*” no que se refere a sustentabilidade como um todo. Neste caso, o posicionamento de ambas as misturas coincide com a linha diagonal, apresentando pontos (0,66; 0,66) mais próximos da origem.

Também na Figura 6.33 nota-se, mais uma vez, que os traços estudados, à exceção do REF, possuem uma relevância maior do aspecto ambiental em relação ao econômico como pode ser verificado pelo posicionamento dos mesmos na área do “*cenário ambiental*”. Neste caso é importante notar que quanto melhor classificado é o traço mais próximo da linha diagonal de ecoeficiência ele se encontra e menor é a prevalência do aspecto ambiental sobre

o econômico. Com isso, pode-se dizer que, nos traço estudados, a substituição por FC acarretou uma diminuição proporcional maior nos impactos ambientais do que na redução dos custos.

6.3 ANÁLISE INTEGRADA DA ACV E CCV DAS UNIDADES FUNCIONAIS

Entre os objetivos deste trabalho encontra-se a determinação do melhor traço, do ponto de vista da sustentabilidade, para tanto deve-se comparar as misturas com melhor classificação em relação as unidades funcionais metro cúbico de concreto e pilar estrutural de concreto.

No caso da unidade funcional metro cúbico de concreto não foram estudados os traços com pintura (*FC60P* e *FC70CV10P*) devido a impossibilidade de determinação na área pintada. Neste caso, os dois traços melhores colocados foram *FC70CV10* (1º) e o *FC70CV10CH10* (2º), todavia ambos apresentaram uma vida útil inferior a 50 anos o que inviabiliza sua utilização. Desta forma, o traço melhor colocado foi o *FC60*.

Na unidade funcional pilar estrutural de concreto não foram estudados os traços *FC70CV10* e *FC70CV10CH10* devido aos motivos apresentados no parágrafo anterior. Neste caso o *FC60*, *FC50* e *FC60CH10* ficaram empatados na primeira colocação, sendo considerados, os dois últimos, as melhores opções devido ao equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos.

Com isso, tem-se que o traço *FC60* foi o único que figurou na primeira colocação nos dois estudos atendendo de maneira equânime ambas as unidades funcionais. O *FC60*, dentre todos os traços estudados, em ambas as unidades funcionais, foi o que melhor apresentou um equilíbrio seja no quesito ambiental como econômico. Os demais traços que não obtiveram este equilíbrio, apresentaram um desempenho inferior, frente à sustentabilidade. Desta maneira, o *FC60* foi o melhor traço do ponto de vista da sustentabilidade atendendo simultaneamente as unidades funcionais metro cúbico de concreto e pilar estrutural de concreto.

6.4 INTENSIDADE DE CLÍNQUER X INTENSIDADE DE LIGANTE X EMISSÃO CO_{2EQ}

No presente item é realizado o estudo sobre a intensidade de clínquer (I_{cq}), intensidade de ligante (IL) e emissão de CO_{2eq} para a unidade funcional pilar estrutural de concreto, com

base na resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade para os traços REF, FC50, FC60, FC60P, FC60CH10 e FC70CV10P.

A motivação para a escolha da unidade funcional pilar estrutural de concreto em detrimento do metro cúbico de concreto refere-se que a segunda constitui uma parte da primeira, assim sendo, o estudo é mais completo tendo em vista que a estrutura é contemplada. A escolha da idade de 28 dias está relacionada a mesma ser a base para a determinação da IL segundo Damineli (2013). Enquanto que os traços citados são aqueles elencados no estudo da unidade funcional pilar estrutural de concreto.

Para o estudo foram utilizados os dados dos Itens 5.1.3 (*intensidade de clínquer – I_{cq}*), 5.1.3.3 (*intensidade de ligante – IL*) e 6.2.1.3.1 (*emissão de CO_{2eq} – unidade funcional pilar estrutural de concreto*). Os valores de I_{cq} , IL e CO_{2eq} foram transformados para uma base unitária, permitindo assim uma melhor comparação entre os dados, servindo, deste modo, de esteio para a determinação da classificação dos traços frente aos 3 parâmetros estudados através da média geométrica (*M.G.*).

Com base nas Tabelas 5.3, 5.4 e 6.8 foi elaborada a Tabela 6.16 e a Figura 6.34 onde pode-se observar os valores unitários da intensidade de clínquer (I_{cq}) e intensidade de ligante (IL) aos 28 dias, bem como a emissão de CO_{2eq} da unidade funcional pilar estrutural de concreto. Também é possível observar a média geométrica (*M.G.*) dos traços, através da qual constata-se a melhor mistura em relação aos 3 parâmetros estudados.

Tabela 6.16 – Valores unitários da I_{cq} , IL, Emissão de CO_{2eq} e M.G.

Traços	Intensidade de clínquer aos 28 dias - I_{cq} (1)	Intensidade de ligante aos 28 dias - IL (2)	Emissão de CO_{2eq} (3)	Média Geométrica – M.G. $(1 \times 2 \times 3)^{1/3}$
REF	1	0,74	1	0,9 (6º)
FC50	0,83	0,63	0,49	0,64 (2º)
FC60	0,95	0,72	0,55	0,72 (3º)
FC60P	0,95	0,72	0,58	0,73 (4º)
FC60CH10	0,76	0,65	0,48	0,62 (1º)
FC70CV10P	0,96	1	0,65	0,85 (5º)

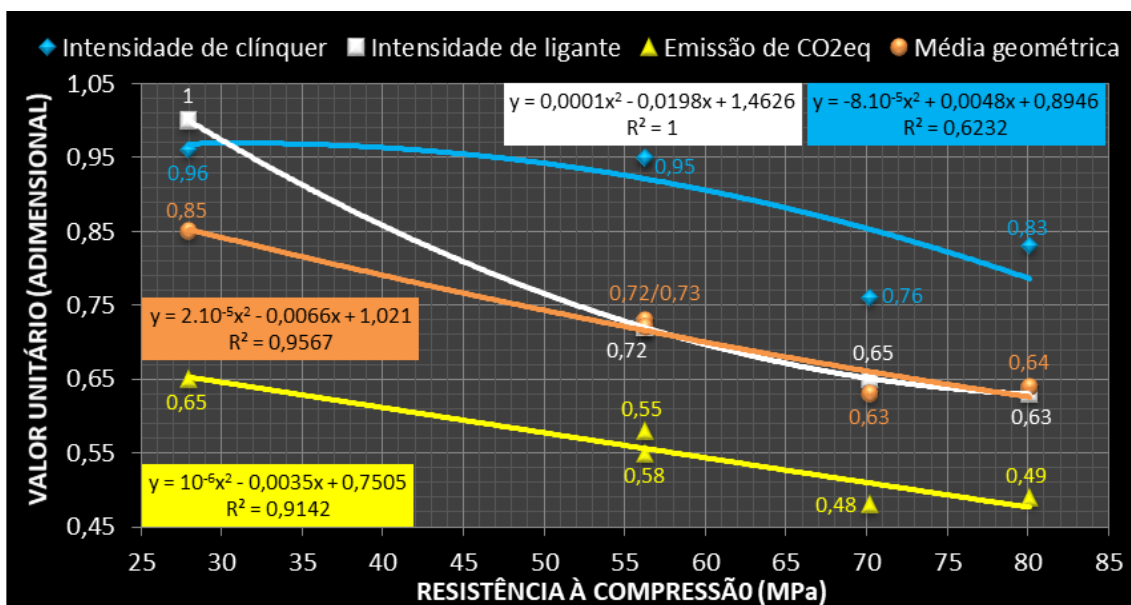
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

A partir da análise da Tabela 6.16 e da Figura 6.34 depreende-se que os parâmetros estudados (I_{cq} , IL, emissão de CO_{2eq} e M.G.) apresentaram uma tendência de diminuição com o aumento da resistência à compressão, à exceção do REF (Figura 6.34). Este comportamento era esperado, tendo em vista que, na medida em que a resistência à compressão aumenta a I_{cq} e a IL tendem a diminuir, bem como a seção transversal do pilar, o que acarreta uma

diminuição de volume e conseqüentemente uma redução na emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Quanto menores os valores de I_{cq} , IL e emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, mais reduzida será a média geométrica.

Assim o FC60CH10, com média geométrica de 0,62 apresentou os menores valores de I_{cq} e emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, sendo classificado em 1º lugar. Em 2º lugar aparece o FC50 com média geométrica de 0,64 tendo em vista ter apresentado a menor IL, bem como pela sua elevada resistência à compressão aos 28 dias (80,1 MPa), que resultou em um menor volume de concreto propiciando a 2º menor emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Figura 6.34 – Valores unitários da I_{cq} , IL, emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e média geométrica



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Valores idênticos de I_{cq} e IL, bem como muito próximos de emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ levaram o FC60 (média geométrica de 0,72) e FC60P (média geométrica de 0,73) a 4º e 5º colocação, respectivamente. O menor desempenho do FC60P em relação ao FC60 deve-se a maior emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ devido a utilização da pintura acrílica.

Na 5ª posição aparece o FC70CV10P, com média geométrica de 0,85, a partir de valores elevados de I_{cq} e IL devido a reduzida resistência à compressão aos 28 dias de idade, a qual levou a uma seção transversal maior (maior volume de concreto), acarretando um aumento na emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Na última colocação aparece o REF, com uma média geométrica de 0,9 considerando ter apresentado os maiores valores de I_{cq} e emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Apesar da elevada resistência à compressão aos 28 dias (118,1 MPa), este comportamento era esperado devido ao alto teor de CP no traço (90%), majorando os dois parâmetros citados.

Destaca-se na Figura 6.34 a significância da IL (R^2 de 1), média geométrica (R^2 de 0,96) e emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (R^2 de 0,91) demonstrando a boa relação com a resistência à compressão. Já a significância da I_{cq} foi menor com R^2 de 0,6232, devido aos valores mais elevados da I_{cq} nos traços FC60 e FC60P em comparação com as demais misturas.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo a utilização de altos teores de substituição de CP, em misturas binárias, ternárias e quaternária de AM (*FC e CV*) e adição de CH, com estudo da vida útil provável, através da carbonatação e sustentabilidade por meio da ACV e CCV. Com o intuito de viabilizar as formulações das misturas, foram pesquisados os aspectos físicos, químicos e de sustentabilidade no âmbito da macro e microestrutura dos concretos propostos.

Foi possível observar as mudanças ocorridas nos traços de concreto por ocasião da variação do teor de CP, FC, CV e CH e suas implicações na resistência à compressão, carbonatação, formação de compostos carbonatados, teores de água combinada, Portlandita e Carbonatos, bem como os reflexos destas mudanças nos parâmetros de sustentabilidade (*ACV e CCV*). A partir das análises e discussões apresentadas nos capítulos 4, 5 e 6, são apresentadas as principais conclusões encontradas.

7.1 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, ADITIVO E TRABALHABILIDADE

Foi realizado o empacotamento de partículas (*CP, FC, CH, CH, agregados graúdos e miúdos*) através do programa EMMA, onde foi utilizado um coeficiente de distribuição “*q*” de 0,35, o qual propiciou uma otimização no empacotamento de partículas. Através da utilização do método dos mínimos quadrados e do uso da função potência foi realizada a convergência entre as curvas teóricas e experimentais levando a um coeficiente de determinação médio (R^2) de 0,98. Por meio destes parâmetros é possível afirmar que as curvas tiveram uma aproximação relevante e que o empacotamento de partículas foi alcançado.

Através do estudo entre os teores de aditivos utilizados e a trabalhabilidade das misturas pesquisadas foi possível constatar que o aumento na quantidade de FC acarreta uma diminuição no teor relativo de aditivo. Assim, verificou-se o benefício da incorporação do FC na trabalhabilidade, demonstrando que a AM agiu como agente lubrificante.

7.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

7.2.1 Resistência à compressão

Pode-se verificar que todos os traços apresentaram uma resistência à compressão diminuída com o aumento do teor de FC, bem como nenhum apresentou resistência igual ou

superior ao REF. Não obstante os traços com AM terem apresentado uma resistência à compressão inferior ao REF, pode-se verificar um bom desempenho dos mesmos neste quesito através dos resultados obtidos com uma resistência à compressão média, aos 91 dias, de 67,5 MPa.

Destaca-se o desempenho do FC60CH10, aos 91 dias de idade, apresentando uma resistência à compressão (88,6 MPa) maior que o FC50 (87,9 MPa). Outra mistura que merece destaque é o FC70CV10 com uma resistência à compressão de 51,8 MPa, aos 91 dias de idade.

De modo geral, pode-se constatar a viabilidade da elaboração de concretos com a substituição de CP por FC, no entanto, à medida que os teores de FC aumentaram houve a necessidade de um maior controle na dosagem, principalmente em relação à quantidade de água incorporada na mistura (*fator a/ag*). Assim, através de boas práticas de projeto e controle de mistura, os concretos Elaboradas com FC podem ter desempenho semelhante aos concretos sem FC.

7.2.2 Alta resistência à compressão

Pode-se verificar que, aos 91 dias de idade, a exceção do traço FC70CV10CH10, todos os traços apresentaram resistências à compressão superiores a 50 MPa, caracterizando, desta forma Concretos de Alta Resistência (CAR). Observou-se, também, que, aos 28 dias de idade, a exceção dos traços com 70% de FC, todos os demais apresentaram resistências à compressão superiores a 50 MPa.

Um aspecto a ser destacado refere-se a possibilidade de elaboração de CAR com elevados teores de FC. Via de regra, a principal contribuição para a viabilização deste tipo de concreto (CAR) tem-se dado através da redução do volume de material a ser utilizado nas estruturas, tendo em vista que, a princípio, altas resistências estariam atreladas a consumos maiores de CP. Assim, através do presente trabalho, foi possível constatar uma dupla sinergia em relação à utilização de CAR com elevados teores de FC, ou seja, a diminuição do volume de concreto utilizado, bem como a redução no teor de CP.

7.2.3 Evolução da resistência à compressão

Verificou-se que todos os traços apresentaram a maior parcela de evolução na resistência à compressão aos 28 dias de idade, bem como à medida que o teor de FC

aumentou ocorreu um incremento na evolução da resistência à compressão aos 91 dias de idade. Pode-se verificar que a evolução da resistência à compressão do FC50 aos 28 dias (91,2%) foi muito próxima do REF no mesmo período (92,8%). Nos traços com 60% de FC a mistura sem CH apresentou uma evolução da resistência à compressão maior em relação a com CH aos 28 dias de idade. Já nos traços com 70% de FC ocorreu uma inversão e a mistura com CH apresentou uma evolução da resistência à compressão maior em relação à sem CH aos 28 dias de idade.

7.2.4 Intensidade de clínquer (I_{cq})

Todos os traços com AM apresentaram uma I_{cq} menor que o REF tanto aos 28 como aos 91 dias de idade. Os traços com adição de CH juntamente com o FC50 apresentaram os menores valores de I_{cq} aos 28 dias de idade ($< 3 \text{ kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$) sendo que os demais, no mesmo período, apresentaram um bom desempenho com valores um pouco acima. Aos 91 dias de idade à medida que o teor de FC (%) aumentou nas misturas, os valores da I_{cq} tenderam a diminuir. Nesta idade destaca-se o FC70CV10 com um I_{cq} de $1,68 \text{ kg}_{cq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ resultando no menor valor obtido no trabalho e, frente aos números da literatura, encontra-se entre os mais baixos.

7.2.5 Intensidade de ligante (IL)

Todos os traços do trabalho, a exceção do REF, apresentaram uma IL abaixo de $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e consumo de ligante inferior a $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, sendo que o FC70CV10 (IL de $3,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$) apresentou uma resistência à compressão de 28 MPa (*menor que 50 MPa*) com um consumo de ligantes de $109 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Os traços FC50 e FC60CH10 apresentaram os menores valores de IL no trabalho ($2,7$ e $2,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, *respectivamente*) estando entre os mais baixos da literatura.

7.2.6 Resistência à compressão unitária ($f_{c_{unit}}$)

Todos os traços com AM apresentaram uma $f_{c_{unit}}$ maior que o REF apontando que os efeitos físicos, químicos e sinérgicos (*misturas ternárias e quaternária*) foram realçados concluindo-se que, proporcionalmente à quantidade de clínquer, a resistência à compressão foi maior com altos teores de FC na mistura. Destaca-se o desempenho do FC70CV10,

aos 91 dias de idade com uma $f_{c_{unit}}$ de $0,6 \text{ MPa.kg}_{c_{cq}}^{-1}.\text{m}^{-3}$ a maior do trabalho. Na mesma idade a média da $f_{c_{unit}}$, para todos os traços, foi de $0,46 \text{ MPa.kg}_{c_{cq}}^{-1}.\text{m}^{-3}$ indicando concretos eco amigáveis de alta performance.

7.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

7.3.1 Profundidade carbonatada

Os traços estudados apresentaram uma profundidade de carbonatação acelerada máxima inferior a 8,5 mm às 12 semanas, com exceção das misturas FC70CV10 e FC70CV10CH10.

O comportamento destes dois últimos traços, frente à carbonatação acelerada, deveu-se, provavelmente, a reduzida reserva de Portlandita (*20% de CP*) a qual foi consumida, em parte, pelas reações com a CV para a formação do CSH secundário. Desta maneira a reserva alcalina foi diminuída sensivelmente conduzindo a um rápido avanço da frente de carbonatação.

Nos traços REF e FC60P a profundidade de carbonatação foi nula devido ao elevado teor de CP (*REF*), bem como a proteção fornecida pela pintura acrílica (*FC60P*). Já em relação as misturas FC50, FC60CH10 e FC70CV10P a profundidade de carbonatação foi bastante reduzida devido a elevada resistência à compressão (*FC50 87,8 MPa e FC60CH10 88,6 MPa*), bem como a proteção fornecida pela pintura acrílica (*FC70CV10P 51,8 MPa*). No caso do FC60, a profundidade de carbonatação foi maior (*8,46 mm*) tendo em vista que nesta mistura não foi incorporada barreira física (*pintura*) e/ou química (*adição de CH*).

7.3.2 Coeficiente de carbonatação (kc)

Como reflexo da profundidade carbonatada os traços FC70CV10CH10 e FC70CV10 apresentaram os maiores coeficientes de carbonatação $3,738$ e $9,9329 \text{ mm.t}^{-0,5}$, respectivamente. Estes valores de kc estão $24,6\%$ e $231,1\%$ acima do proposto por Sanjuan e Olmo (2001) e Torres et al. (2017) para concretos de alta qualidade frente à carbonatação (kc inferior a $3 \text{ mm.t}^{-0,5}$).

Os demais traços apresentaram um kc máximo de $1,62 \text{ mm.t}^{-0,5}$, ou seja, $45,94\%$ menor que o limite máximo dos autores supra citados. Destacam-se as misturas REF e FC60P com kc nulo devido a profundidade de carbonatação inexistente, bem como o FC50,

FC60CH10 e FC70CV10P com um k_c médio inferior a $0,3 \text{ mm.t}^{-0,5}$, ou seja, 10 vezes menor que o limite máximo para concretos de alta qualidade frente à carbonatação segundo os autores citados no parágrafo anterior.

7.3.3 Vida útil estimada

Como reflexo da profundidade carbonatada e do k_c as misturas FC70CV10 e FC70CV10CH10 apresentaram uma vida útil estimada de 4 e 29 anos, respectivamente, abaixo do limite mínimo de 50 anos. Desta forma, estes dois traços não foram considerados aptos para o propósito do presente trabalho.

Em relação as demais misturas, todas elas apresentaram uma vida útil estimada no limite superior, ou seja 100 anos. Este desempenho mostrou que, através da diminuição do fator a/a_g , do empacotamento de partículas, da incorporação de uma barreira física e/ou química (*a depender do traço*), foi possível obter concretos com elevados teores de FC que apresentem um excelente desempenho frente a carbonatação.

7.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

7.4.1 DRX na camada carbonatada (CS)

A DRX na CS indicou uma forte correlação entre os compostos formados e a carbonatação acelerada indicando que, com a elevação do k_c , ocorreu: a) uma minoração da Vaterita indicando sua transformação em Carbonato de Cálcio que apresenta um viés de alta; b) a descalcificação do CSH dado pela diminuição da Xonotitla e Girolita; c) o aumento da Rustumita que é um CSH formado a partir de Carbonatos; d) a diminuição da Portlandita dada pela redução da Brucita.

7.4.2 DRX na camada não carbonatada (CN)

A DRX na CN indicou uma forte correlação entre os compostos formados e a resistência à compressão indicando que, a partir de sua diminuição, ocorreu: a) minoração do CSH em especial da Xonotitla e Girolita; b) redução na Brucita apontando para um menor teor de Portlandita; c) aumento da Rustumita que constitui-se em um CSH relacionado a teores mais elevados de Carbonatos e que apresentam resistências à compressão inferiores.

7.5 TERMOGRAVIMETRIA ANALÍTICA E DIFERENCIAL (TG/DTG)

7.5.1 TG/DTG na camada carbonatada (CS)

A TG/DTG na CS indicou uma forte correlação entre os compostos analisados e a carbonatação acelerada indicando que, com a elevação do k_c , ocorreu: a) diminuição da Portlandita tendo em vista seu consumo no processo de carbonatação; b) redução da água combinada que reflete a quantidade de CSH que sofre descalcificação no processo de carbonatação; c) aumento dos Carbonatos advindo do processo de carbonatação.

7.5.2 TG/DTG na camada não carbonatada (CN)

A TG/DTG na CN indicou uma forte correlação entre os compostos analisados e a resistência à compressão indicando que, com sua minoração, ocorreu: a) redução da Portlandita que reflete a quantidade de CSH; b) diminuição da água combinada que, também reflete a quantidade de CSH; c) aumento nos Carbonatos reflexo da contração na Portlandita.

7.6 ESTUDO DA SUSTENTABILIDADE – ACV E CCV

7.6.1 Unidade funcional metro cúbico de concreto

Tendo em vista que a substituição de CP por FC tem o potencial de mitigar os efeitos danosos do concreto no meio ambiente, pode-se constatar que o traço REF apresentou os maiores valores em todos os índices ambientais estudados, bem como o FC70CV10 os menores. Da mesma, forma o traço REF apresentou o maior valor de custo do metro cúbico de concreto enquanto o FC70CV10 o menor.

Assim, os traços FC70CV10 (*1º lugar*) e FC70CV10CH10 (*2º lugar*) apresentaram os melhores indicadores global de sustentabilidade e o REF o pior, sendo que quanto maior o teor de FC na mistura mais sustentável é o traço. Não obstante o FC70CV10 e o FC70CV10CH10 apresentaram uma vida útil frente à carbonatação bastante reduzida (*4 e 29 anos respectivamente*) o que inviabiliza sua utilização em estruturas de concreto armado.

Desta maneira, o traço que apresentou o melhor indicador global de sustentabilidade e que, ao mesmo tempo, possui uma vida útil mínima de 50 anos foi o FC60 (*100 anos de vida útil*), tendo em vista o equilíbrio apresentado entre os aspectos ambientais e de custo.

Pode-se constatar nos traços estudados uma relevância maior do aspecto ambiental em relação ao econômico. Com isso, pode-se dizer que, nos traços estudados, a substituição de FC acarretou uma diminuição proporcional maior nos impactos ambientais do que na redução dos custos.

7.6.2 Unidade funcional pilar estrutural de concreto

Na unidade funcional pilar estrutural de concreto, o FC70CV10P apresentou o melhor desempenho no quesito ambiental e o pior no custo, sendo que o REF apresentou comportamento inverso. Desta maneira, ambos os traços ficaram classificados em último lugar. Na primeira posição ocorreu um empate triplo entre o FC50, FC60 e FC60CH10, demonstrando um grande equilíbrio entre os aspectos ambientais e de custo.

Neste caso específico, o FC50 e o FC60CH10 apresentaram uma igualdade entre os aspectos ambientais e de custo demonstrando um maior equilíbrio que o FC60, sendo os dois primeiros considerados os melhores traços para a unidade funcional pilar estrutural de concreto.

Da mesma forma que ocorreu na unidade funcional metro cúbico de concreto, no pilar estrutural de concreto, pode-se constatar, nos traços estudados, uma relevância maior do aspecto ambiental em relação ao econômico. Com isso, pode-se dizer que, nos traços estudados, a substituição de FC acarretou uma diminuição proporcional maior nos impactos ambientais do que na redução dos custos.

7.6.3 Análise integrada da ACV e CCV das unidades funcionais

Na análise integrada dos indicadores globais de sustentabilidade, ou seja, o traço que melhor atende a ambas as unidades funcionais, o FC60 ficou em primeiro lugar apresentando um desempenho ligeiramente superior ao FC50 e FC60CH10. Neste sentido, pode-se dizer que os 3 traços melhores colocados atenderam, de maneira muito adequada, ambas as unidades funcionais estudadas.

7.6.4 Análise integrada – intensidade de clínquer, de ligante e emissão de CO_{2eq}

Na análise integrada entre a intensidade de clínquer, de ligante e emissão de CO_{2eq} o FC60CH10 apresentou o melhor desempenho em todos os parâmetros, sendo classificado em

1º lugar. O motivo para a performance do traço está relacionada ao elevado teor de FC na mistura (*baixo consumo de CP*) que propiciaram reduzidos valores nos 3 parâmetros estudados.

7.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível verificar a viabilidade da elaboração de concretos com elevados teores de FC através do emprego de aditivo hiperplastificante o que permitiu a redução do teor a/ag (0,25) juntamente com a otimização do empacotamento de partículas, resultando em uma trabalhabilidade de 100+20 mm e resistências à compressão variando de 28 à 80,1 MPa aos 28 dias e de 51,8 à 88,6 MPa aos 91 dias de idade.

Em relação a vida útil provável constatou-se que, à exceção dos traços FC70CV10 e FC70CV10CH10, todos os demais apresentaram uma vida útil superior a 100 anos levando os traços FC50, FC60 e FC60CH10 a primeira colocação em relação a ACV e CCV. Neste sentido, destaca-se o protagonismo do FC60 onde 60% do CP foi substituído por FC, apresentando uma resistência à compressão, aos 91 dias, de 65,7 MPa e kc de $1,62 \text{ mm.t}^{-0,5}$.

Caso seja considerado que, usualmente, as estruturas de concreto são pintadas, independentemente de aspectos relacionados a durabilidade (*questões estéticas*), destaca-se o traço FC70CV10P. Com somente 20% de CP e um consumo de 87 kg.m^{-3} e 104 L.m^{-3} de clínquer e água, respectivamente, obteve-se uma resistência à compressão, aos 91 dias, de 51,8 MPa, bem como um kc de $0,27 \text{ mm.t}^{-0,5}$, conduzindo a uma vida útil 55 vezes superior à máxima utilizada neste estudo (*100 anos*). No âmbito dos objetivos específicos é importante destacar, também, o desempenho do FC60CH10 em relação a intensidade de clínquer, de ligantes e da emissão de GEE, apresentando a primeira colocação entre todos os traços estudados.

Dentre os objetivos específicos observou-se tanto na DRX como na TG/DTG uma proporcionalidade entre aumento da resistência à compressão e formação de CSH, Portlandita e água combinada, bem como o inverso em relação a Rustumita e Carbonatos. Por outro lado, os mesmos ensaios indicaram uma proporcionalidade entre a elevação do kc e formação de Carbonatos e Rustumita, bem como o inverso em relação ao CSH, Portlandita e água combinada.

Assim, o trabalho mostrou a viabilidade da elaboração de concretos com teores elevados de FC, iguais ou acima de 50%, tendo em vista os resultados apresentados em relação a resistência à compressão, carbonatação e seus reflexos na vida útil e

sustentabilidade. Com isso, pode-se dizer que os concretos propostos possuem os requisitos necessários para serem utilizados em estruturas de concreto armado.

A partir deste estudo é possível um maior conhecimento à respeito do emprego de quantidades elevadas de FC devido ao desempenho apresentado em relação a carbonatação, resistência à compressão e sustentabilidade. Assim, constata-se que a inserção, em estruturas de concreto armado, de concretos com elevadas quantidades de FC, pode ser adotada considerando sua viabilidade técnica (*maior resistência e durabilidade*) e ambiental (*menores teores de CP*), baseada na performance das misturas estudadas.

Uma descrição apropriada para o desempenho dos traços apresentados, no presente trabalho, é dada por Agopyan e John (2011): “*Um material mais resistente, mais durável e que emprega menos matéria prima de alto consumo energético, como a fração clínquer do cimento Portland, é, sem dúvida, um material mais sustentável*”.

7.8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho contribui para a disseminação da utilização de elevados teores de FC nas estruturas de concreto, apontando para a possibilidade da utilização desta AM em teores maiores que a literatura atual apresenta (*máximo de 50%*). Um ponto importante a ser destacado refere-se ao papel que a CV desempenha por ocasião da mistura ternária com FC. Neste sentido, a presença desta AM contribui para a elevação da carbonatação do traço FC70CV10 e consequente diminuição da sua via útil.

Tomando-se por base, o traço FC60CH10 que apresentou um ótimo desempenho do ponto de vista de resistência à compressão ($88,6 \text{ MPa}$), carbonatação ($0,34 \text{ mm.t}^{-0,5}$) e sustentabilidade (*ACV e CCV*), pode-se inferir pela viabilidade do aumento do teor de FC na presença da CH. Neste caso, poderiam ser estudados, em trabalhos futuros, traços como FC70CH10 (*70% de FC, 10% de CH e 20% de CP*), FC70CH15 (*70% de FC, 15% de CH e 15% de CP*) e FC80CH10 (*80% de FC, 20% de CP e adição de 10% de CH*).

Um outro ponto a ser aprofundado refere-se a investigação da microestrutura dos concretos com elevados teores de FC através de ensaios que não foram realizados no presente trabalho tais como: PIM (*Porosimetria por Intrusão de Mercúrio*), MEV (*Microscopia Eletrônica de Varredura*) e FTIR (*Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier*). Nesta mesma linha, poderiam ser realizados outros ensaios para a verificação das propriedades dos concretos com elevados teores de FC como: cloretos, permeabilidade ao ar e a água, entre outros.

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Relatório de caracterização de aglomerantes – UFSM/2019**. São Paulo: ABCP, 2019.

ABCV. Associação Brasileira do Ciclo De Vida. **Site da entidade**. São Paulo: ABCV, 2020. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 24 ago. 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003c. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 22 ago. 2020.

_____. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 5674**: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão e manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014c. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014e. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 18 ago. 2020.

_____. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014d. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 18 ago. 2020.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a. Disponível em: [*link*]. Acesso em: 25 ago. 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

_____. **NBR ISO 15686-5**: Edifícios e ativos construídos - Planejamento de vida útil - Parte 5 - Custo do ciclo de vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

_____. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 25 ago. 2020.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 22 ago. 2020.

ADORNA, D. L. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. Dissertação (*Mestrado em Engenharia Civil*) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

AGOPYAN, V. **Construção civil consome até 75% da matéria-prima do planeta**. Rio de Janeiro: Globo Ciência, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 22 dez. 2019.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blücher, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

AGUIAR, J. B.; RAMOS, A. C; SOARES, H. I. Durability of concrete protected by an acrylic painting. In: 2005 INTERNATIONAL CONGRESS GLOBAL CONSTRUCTION: ULTIMATE CONCRETE OPPOTUNITIES, 2005, Dundee. **Proceedings** [...]. London: Thomas Telford, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI. 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 28 ago. 2020.

ALTOQI. **Site da empresa**. Florianópolis: AltoQi, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 14 mai. 2020.

ALVES, J. **Das 4 bilhões de toneladas de alimentos produzidas anualmente em todo planeta, cerca de 50% são desperdiçadas**. São Paulo: USP, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 6 jan. 2020.

ANDEREGG, F. O. Grading Aggregates – II. – The application of mathematical formulas to mortars. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, p. 1058-1064, 1931. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 7 set. 2020.

ANDERSON, S.; NEWELL, R. **Prospects for carbon capture and storage technologies**. Washington. D. C.: Resources for the Future, 2003 Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

ANDRADE, J. J. O. et al. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, 2018. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in producten aus losen koernern (*mit einigen experimemten*). **Kolloid - Zeitschrift**, v. 50, p. 217-228, 1930. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 7 set. 1930.

ANJOS, M. A. S. et al. Avaliação da durabilidade de concretos auto adensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. In: XIII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO – CONPAT, 2015, Lisboa. **Anais** [...]. Mérida: ALCONPAT, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

ANJOS, M. A. S.; JESUS, C. A. C.; DUARTE, F. Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. **Revista Engenharia Civil UMINHO**, v.44, p. 41-58, 2012. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 10 jan. 2021.

ANTIOHOS, S. K. et al. Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 877–885, 2007. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1579-1589, 2012. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. 2013. Thesis (Engineering Doctorate) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2013. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

AQEL, M.; PANESAR, D. K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 359-368, 2016. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E917 – 17 e 1**. Standard practice for measuring life-cycle costs of buildings and building systems. West Conshohocken: ASTM, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 147-152, 2003. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

AUTODESK. **Site da empresa**. São Paulo: Autodesk, 2020. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 mar. 2020.

BAHADOR, S.; JONG, H. C. Effect of preconditioning of concrete under accelerated test. In: 31° CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE E STRUCTURES, 2006, Singapore. **Proceedings** [...]. Singapore: CI-Premier, 2006. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

BAKKER, R. F. Initiation period. In: SCHIESSI, P. **Corrosion of steel in concrete**. London: Chapman and Hall, 1988. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 10 set. 2020.

BARBHUIYA, S.; CHOW, P.; MEMON, S. Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 696-702, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BARKER, A. P.; CORY, H. P. The early hydration of limestone-filled cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE – UNIVERSITY OF SHEFFIELD, 1991, Sheffield. **Proceedings** [...]. Essex: Elsevier Science Publisher, 1991. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BARKER, A. P.; MATTHEWS, J. D. Concrete durability specification by water/cement or compressive strength for European cement types. In: 3^o INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE DURABILITY OF CONCRETE, 1994, Detroit. **Proceedings** [...]. Detroit: ACI, 1994. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BAROGHEL-BOUNY, V.; DE LARRARD, F. In Place durability assessment for the next millennium-long-term study. In: 5^o INTERNATIONAL CONFERENCE OF DURABILITY OF CONCRETE, 2000, Barcelona. **Proceedings** [...]. Farmington Hills: ACI, 2000. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BASHEER, P. A. M.; NOLAN, E. Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests. **Construction and Building Materials**, n. 15, p. 105-114, 2001. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BASHEER, P. A. M.; RUSSEL, D. P.; RANKIN, G. I. B. Design of concrete to resist carbonation. In: 8^o INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 1999, Vancouver. **Proceedings** [...]. Ottawa: NRC Research Press, 1999. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

BENÍTEZ, P. et al. Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, n. 95, p. 247-259, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

BENTUR, A.; DIAMOND, S.; BERKE, N. S. **Steel corrosion in concrete: Fundamentals and civil engineering practice**. London: E & FN Spon, 1997. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 10 set. 2020.

BENTZ, D. P. Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 124-129, 2006. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

BENTZ, D. P.; GARBOCZI, E. J.; STUTZMAN, P. E. Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 891-902, 1992. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Evolution of pore structure in blended systems. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p. 25-35, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

BHATTY, I. J. Hydration versus strength in a Portland cement developed from domestic mineral wastes – A comparative study. **Termochimica Acta**, v. 106, p. 93-103, 1986. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

BIERER, A. et al. Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1289-1301, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

BLANCO, M. T. et al. Técnicas y métodos adecuados para la identificación del cemento aluminoso y de cemento de base Portland en hormigones. **Materiales de Construcción**, v. 42, n. 228, 1992. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos Elaboradas com ligante convencional e modificado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

BONAVETTI, V. et al. Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. **Cement and Concrete Research**, n. 33, p. 865-871, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F.; IRASSAR, E. F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 853-859, 2001. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

BONDAR, D.; COAKLEY, E. Effect of grinding on early age performance of high volume fly ash ternary blended pastes with CKD & OPC. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 153–163, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº315/2002 – Dispõe sobre a nova etapa do programa de controle de emissões veiculares – PROCONVE**. Brasília: CONAMA, 2002. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 15 mar. 2019.

_____. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa - Relatório de referência - Produção de cimento**. Brasília: MCT, 2010 Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 fev. 2020.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. Brasília: MMA, 2020a. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

_____. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Fatores de emissão de CO₂ pela energia elétrica do sistema interligado nacional do Brasil**. Brasília: MCT, 2020b. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

BREKAILO, F. et al. Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD na matriz cimentícia. **Revista Cerâmica**, v. 65, p. 351-358, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 28 dez. 2020.

BROWN, L. R. **Eco-economia: Construindo uma economia para a terra**. Salvador: Universidade Livre da Mata Atlântica, 2003. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

CAMPOS, É. F. Projeto avaliação de ciclo de vida simplificada para blocos de concreto. In: SEMINÁRIO ACV-s, CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2012, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: CBCS, 2012.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

CASTELLA, G.; BERGER, R. L. **Inferência Estatística**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

CASTELLOTE, M. et al. Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1365–1373, 2008. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 25 ago. 2020.

_____. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, p. 515-525, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

CBCS. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Avaliação de ciclo de vida modular**. São Paulo: CBCS, 2014. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 06 abr. 2019.

CELIK, K. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59–72, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 22 ago. 2020.

CHANG, C.; CHEN, J. The experimental investigation of concrete carbonation depth. **Cement e Concrete Research**, v. 36, p. 1760-1767, 2004. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

CHAUSSADENT, T. et al. Effect of water-cement ratio of cement pastes on microstructural characteristics related to carbonation process. In: 5° INTERNATIONAL CONFERENCE OF DURABILITY OF CONCRETE, 2000, Barcelona. **Proceedings** [...]. Farmington Hills: ACI, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: Ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (*Reactive Powder Concrete*). **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1491-1500, 1995. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; ANDRADE, C.; CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 87-91, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 425-428, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

CHOI, J. et al. Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution. **Construction and Building Materials**, n. 154, p. 451-461, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CIZER, O. et al. Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 741-751, 2012. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

COLE, R. J.; STERNER, E. Reconciling theory and practice of life-cycle costing. **Building Research and Information**, v. 28, p. 368-375, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

COLLINS, F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: Influence on their carbon footprint. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, p. 549-556, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

COSTA, U.; MASSAZZA, F. Some properties of pozzolanic cements containing fly ashes. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SÍLICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY- PRODUCTS IN CONCRETE, 1983, Montebello. **Proceedings** [...]. Detroit: ACI, 1983. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

COURARD, L.; HERFORT, D.; VILLAGRÁN, Y. Limestone powder. In: DE BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYART, E. **Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CUI, H. et al. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Buildings Materials**, n. 93, p. 522-527, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

CYBIS, L. F.; SANTOS, C. V. J. Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada à indústria da construção civil – Estudo de caso. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

CZARNECKI, L.; WOYCIECHOWSKI, P. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, v. 63, p. 43-54, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

CZARNECKI, L.; WOYCIECHOWSKI, P.; ADAMCZEWSKI, G. Risk of concrete carbonation with mineral industrial by-products. **Journal of Civil Engineering**, n. 22, p. 755-764, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DAL RI, M. **Efeito da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: Controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R.; JOHN, V. Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015, Bonito. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DAMTOFT, J. S. et al. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 115–127, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DBIS. Department of Business Innovation & Skills. **Estimating the amount of CO₂ emissions that the construction industry can influence**. London: DBIS, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 21 set. 2018.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. London: E & FN Spon, 1999. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DE WEERDT, K. et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. **Cement and Concrete Research**, n. 41, p. 279-291, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DE WEERDT, K. **Ternary blended cements with fly ash and limestone. Part I: Activation of fly ash**. Trondheim: SINTEF Building and Infrastructure, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DE WEERDT, K.; JUSTNES, H. Microstructure of binder from the pozzolanic reaction between lime and siliceous fly ash, and the effect of limestone addition. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROSTRUCTURE RELATED DURABILITY OF CEMENTITIOUS COMPOSITES, 2008, Nanjing. **Proceedings** [...]. Bagneux: RILEM Publications, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DESCHNER, F. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1389-1400, 2012. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DETWILER, R. J.; MEHTA, P. K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 86, p. 609-614, 1989. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, G. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and bioenergy**, v. 48, p.75-89, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DHIR, R. K. et al. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. **Materials and Structures**, v. 40, p. 459-473, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DIAMANTONIS, N. et al. Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete. **Construct and Building Materials**, v. 24, p. 1518–1522, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DILONARDO, I. et al. Avaliação metodológica da medida de carbonatação de micro concretos. In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015, Bonito. **Anais** [...]. São Paulo: IBRACON, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

DNER. Departamento Nacional de Estradas De Rodagem. **DNER-EM367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro: DNER, 1997. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 07 jan. 2020.

DUAN, P. et al. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 1-6, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

DUCH, C. Custo do Ciclo de Vida (CCV). **Revista Meio Filtrante**, n. 24, ano. 5, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 7 set. 2020.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

EDWARDS, P. The rise and potential peak of cement demand in the urbanized world. **Conerstonemag**, v. 3, p. 37-41, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 21 ago. 2020.

EL BARRAK, M.; MOURET, M.; BASCOUL, A. Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 12-21, 2009. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 ago. 2020.

EL-DIDAMONY, H. et al. Limestone as a retarder and filler in limestone blended cement. **Journal Ceramics – Silikaty**, v. 39, p. 15-19, 1995. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

ELGALHUD, A.; DHIR, R.; GHATAORA, G. Chloride ingress in concrete: Limestone addition effect. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, p. 292-313, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

ELKEM. **Site da empresa**. Oslo: Elkem, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 18 ago. 2020.

ERYANTO, T.; AMRINA, E. Determination of optimal clinker factor in cement production by chemical grinding aids addition. **Applied Mechanics and Materials**, v. 776, p. 223-228, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

ESPINING, O. Effect of limestone filler BET (H_2O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 938-944, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

FÉLIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via redes neurais artificiais. **Revista ALCONPAT**, v. 7, p. 302-316, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

FELTRIN, C. S. **Efeitos sinérgicos de adições minerais em concretos por empacotamento de partículas: resistência, microestrutura e absorção de água**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

FELTRIN, C. S. et al. Empacotamento de partículas com filer calcário em concretos: Um estudo das propriedades e sustentabilidade. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 28 ago. 2020.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, v. 57, p. 73-101, 2012. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; NIJLAND, T. G. Measuring the packing density to lower the cement content in concrete. In: 9º INTERNATIONAL FIB SYMPOSIUM, 2008, Amsterdam. **Proceedings [...]**. London: Taylor & Francis, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

FERNÁNDEZ BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2 . **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, p. 193-205, 2004. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 28 ago. 2020.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

FULLER, S. **Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)**. Washington D. C.: National Institute of Building Sciences, 2020. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 7 set. 2020.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - Part IV: Computer modelling of particle packing phenomena. **Interceram**, n. 42, p. 150-152, 1993. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

_____. Particle packing - Part III: Discrete versus continuous particles sizes. **Interceram**, n. 41, p. 332-334, 1992.

FURNAS, C. C. Grading aggregates – I. – Mathematical relations for beds of broken solids os maximum density. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, p. 1052-1058, 1931. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 7 set. 2020.

GACB. Global Alliance for Buildings and Construction. **2019 Global status report for buildings and construction**. Paris: UNEP, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

GAO, X.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Properties of alkali activated slag–fly ash blends with limestone addition. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 119-128, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

GCCA. Global Cement and Concrete Association. **GNR project reporting CO₂**. London: GCCA, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 02 abr. 2020.

GARRIDO, F. H.; VEGA, A. M. **Ingeniería de vías agroflorestrales: Diseño, cálculo, construcción y mantenimiento de caminos**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 29 dez. 2020.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low CO₂” cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1489-1498, 2004. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

GASPARIM, J. C. **Concreto planejado Elaborada com cimentos especiais: Análise segundo parâmetros de durabilidade**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; BOUER, E. Ecologia industrial - Ferramentas. **Revista Banas Qualidade**, v. 9, p. 76-83, 2007.

GIGATON THROWDOWN. **Redefining what’s possible for clean energy by 2020**. San Francisco: Gigaton Throwdown, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

GITHACHURI, K.; ALEXANDER, M. G. Durability performance potential and strength of blended Portland limestone cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 115-121, 2013. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

GJORV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

GLUCH, P.; BAUMANN, H. The life cycle costing (LCC) approach: A conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. **Building and Environment**, v. 39, p. 571-580, 2004. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietvelt no estudo de cimento Portland**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 dez. 2020.

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 962-972, 1993. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

GRAZIA, M. T.; SANCHEZ, L. F. M.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524-536, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal - Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. São Paulo: PINI, 2002. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

HABERT, G. A method for allocation according to the economic behaviour in the EU-ETS for by-products used in cement industry. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 113-126, 2012. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 06 set. 2020.

HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement and Concrete Composites**, n. 31, p. 397-402, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

HARVEY, F. **Latest data shows steep rises in CO₂ for seventh year**. London: The Guardian, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 12 ago. 2020.

HAWKINS, P.; TENNIS, P.; DETWILER R. J. **The use of limestone in Portland cement: A state of the art review**. Skokie: Portland Cement Association, 2005. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

HELENE, P. R. L.; CASTRO-BORGES, P. A novel method to predict concrete carbonation. **Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo**, v. 1, p. 25-35, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

HELMUTH, R. **Fly ash in cement and concrete**. Skokie: Portland Cement Association, 1987. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

HEMALATHA, M. S.; SANTHANAM, M. Characterizing supplementary cementing materials in blend mortars. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 440-459, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

HENTGES, T. et al. Carbonatação acelerada e natural em amostras de concreto com agregado reciclado de concreto e cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES – CBPAT, 2016, Belém. **Anais [...]**. Porto Alegre: ALCONPAT BRASIL, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HERFORD, D. Developments needed in the production and use of cement for large reductions in CO₂ emissions by 2050. In: ANNA MARIA WORKSHOP IX SUSTAINABLE CEMENTS: CHALLENGES, OPPORTUNITIES & APPLICATIONS, 2008, Holmes Beach. **Proceedings [...]**. Holmes Beach, 2008.

HERRERA, R.; KINRADE, S. D.; CATALAN, L. J. J. A comparison of methods for determining carbonation depth in fly ash-blended cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 112, p. 287-294, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HIGHWAY RESEARCH BOARD. **Special Report. Guide to compounds of interest in cement and concrete research**. Washington D. C.: HRB, 1972. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 28 ago. 2020.

HILLS, T. et al. Statistical analysis of the carbonation rate of concrete. **Cement and Concrete Research**, n. 72, p. 98-107, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HOENIG, V.; HOPPE, H.; EMBERGER, B. **Carbon capture technology – Options and potentials for the cement industry**. Düsseldorf: European Cement Research Academy, 2007.

HOOTON, R. D.; NOKKEN, M.; THOMAS, M. D. A. **Portland-limestone cement: State of the art report and gap analysis for CSA A 3000**. Toronto: University of Toronto, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HOPPE FILHO, J. et al. Degradação do concreto de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico. **Revista ALCONPAT**, v. 4, p. 84-96, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 10 jan. 2021.

HOPPE FILHO, J. **Sistema cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HOUST, Y. F. Microstructural changes of hydrated cement paste due to carbonization. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY'S SYMPOSIUM ON MECHANISMS OF CHEMICAL DEGRADATION OF CEMENT-BASED SYSTEMS, 1997, Boston. **Proceedings [...]**. London: E & F N Spon, 1997. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 24, p. 1165-1176, 1994. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

HUHEEY, J. E. et al. **Inorganic chemistry: Principles of structure and reactivity**. London: Pearson, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

HUMPHREYS, K.; MAHASENAN, M. Substudy 8: Climate Change. In: Battelle Memorial Institute. **Toward a sustainable cement industry**. Geneve: WBCSD, 2002. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

HUSSAIN, S.; BHUNIA, D.; SINGH, S. B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 26-31, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 28 ago. 2020.

IEA. International Energy Agency. **Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 02 ago. 2020.

INNOCENTINI, M. D. M. et al. Relação entre permeabilidade e a velocidade de secagem em concretos refratários de alta alumina. **Cerâmica**, v. 48, n. 307, 2002. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 06 set. 2020.

IPAVEC, A. et al. Carboaluminate phases formation during the hydration of calcite-containing Portland cement. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, p. 1238-1242, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: Mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 12 ago. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: Synthesis report**. Geneva: IPCC, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 08 mar. 2018.

IRASSAR, E. F. et al. Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria. **Revista ALCONPAT**, v. 5, p. 84-96, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 24 ago. 2020.

IRASSAR, E. F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 241-254, 2009. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 28 ago. 2020.

ISAIA, G. C. et al. Influência das adições minerais sobre as ações físicas e químicas intervenientes na resistência mecânica do concreto. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2000, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 69-76, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

JATURAPITAKKUL, C. et al. Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 549-555, 2004. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

JIA, Y.; ARUHAN, B.; YAN, P. Natural and accelerated carbonation of concrete containing fly ash and GGBS after different initial curing period. **Magazine of Concrete Research**, n. 64, p. 143-150, 2012. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 19 ago. 2020.

JOHN, V. M. Desafios da construção sustentável. In: JOHN, V. M.; PRADO, R. T. A. **Boas práticas para habitação mais sustentável**. São Paulo: Páginas & Letras, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

JOHN, V. M.; DAMINELI, B. L.; QUATTRONE, M. Fillers in cementitious materials: Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; LIMA, J. A. R. **Levantamento do estado da arte: Seleção de materiais**. São Paulo: FINEP, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 29 ago. 2020.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal**. Ribeirão Preto: NEEBC, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

JOHNSON, J. **Single most important stat on the planet: Alarm as atmospheric CO₂ soars to 'legit scary' record high**. Portland: Common Dreams, 2019. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 02 ago. 2020.

JOHNSON, R. **The economics of building: A practical guide for the design professional**. Hoboken: John & Sons, 1990. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI materials Journal**, v. 99, p. 138-142, 2002. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KARI, O. P.; PUTTONEN, J.; SKANTZ, E. Reactive transport modelling of long-term carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v. 52, p. 42-53, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KASAI, Y. et al. Air permeability and carbonation of blended cement mortars. In: FIRST CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, 1983, Montebello. **Proceedings** [...]. Detroit: ACI, 1983. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KASTING, J. F.; CATLING, D. Evolution of a habitable planet. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, n. 41, p. 429 - 463, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. **Determinação da eficiência de películas usadas como proteção contra carbonatação**. São Paulo: USP, 1995. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

KAZMIERCZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. Comparação entre metodologias utilizadas para determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO E PERFORMANCE E DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1996, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

KJELLEN, K. O.; GUIMARAES, M.; NILSSON, A. **The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective**. Taastrup: Danish Technological Institute, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

KLIEGER, P.; HOOTON, R. D. **Carbonate additions to cement**. West Conshohocken: ASTM, 1990. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KOTAJI, S.; SCHUURMANS, A.; EDWARDS, S. **Life-cycle assessment in building and construction**. Pensacola: SETACPRESS, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 23 ago. 2020.

KRISHNAN, S. et al. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 265-274, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

KULAKOWSKI, M. P., PEREIRA, F. M., DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in sílica fume concrete. **Construction and Building Materials**, n. 23, p. 1189-1195, 2009. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

KUMAR, A. et al. Simple methods to estimate the influence of limestone fillers on reaction and property evolution in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 20-29, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

LAGERBLAD, B. **Carbon dioxide uptake during concrete life cycle—State of the art**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2006. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LAMBERTI, L. A. **Análise do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto frente à carbonatação: Do berço ao túmulo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LANGSTON, C. A. **Life-cost approach to building evaluation**. Sydney: University of New South Wales, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 23 ago. 2020.

LAPAM. Laboratório de Processos Ambientais. **Relatório de caracterização de aglomerantes – UFSM/2019**. Santa Maria: UFSM, 2019.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1092-1105, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939-1947, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

LEEMANN, A.; MORO, F. Carbonation of concrete - The role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity. **Materials and Structures**, v. 50, p. 30, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LILKOV, V. et al. Long term study of hardened cement pastes containing silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 60, p. 48-56, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LIU, S.; YAN, P. Effect of limestone powder on microstructure of concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, v. 25, p. 328-331, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2020.

LIU, X. et al. Pore solution pH for the corrosion initiation of rebars embedded in concrete under a long-term natural carbonation reaction. **Applied Sciences**, n. 8, v. 128, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LIVESEY, P. Performances of limestone-filled cements. In: SWAMY, R. N. **Blended cements in construction**. Essex: Elsevier Science Publishers 1991. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 26 ago. 2020.

LME. Laboratório de Microscopia Eletrônica. **Relatório de caracterização de aglomerantes – UFSM/2019**. Santa Maria: UFSM, 2019.

LOLLINI, F.; REDAELI, E.; BERTOLINI, L. Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 32-40, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

LOTHENBACH, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 848-860, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 19 ago. 2020.

LOTHENBACH, B.; DURDZINKI, P.; DE WEERDT, K. Thermogravimetric analysis. In: SRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 26 ago. 2019.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1244–1256, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 19 ago. 2020.

LOUETTE, A. **Gestão do conhecimento. Compêndio para sustentabilidade: Ferramentas de gestão de responsabilidade socioambiental**. São Paulo: Antakarana Cultura Arte e Ciência, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 23 ago. 2020.

LU, C. et al. Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete. **Journal of Cleaner Production**, n. 181, p. 309-317, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 ago. 2020.

MACHNER, A. et al. Portland metakaolin cement containing dolomite or limestone – Similarities and differences in phase assemblage and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 214-225, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 19 ago. 2020.

MADANI, H. et al. The influence of ultrafine filler materials on mechanical and durability characteristics of concrete. **Civil Engineering Infrastructures Journal**, v. 49, p. 251-262, 2016. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

MAKHLOUFI, Z. et al. Effect of quaternary cementitious systems containing limestone, blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 647-657, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

MANGULKAR, M. N.; JAMKAR, S. S. Review of particle packing theories used for concrete mix proportioning. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 4, p. 143-148, 2013. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 19 ago. 2020.

MASSAZZA, F.; DAIMON, M. Chemistry of hidrattion of cements and cementitious cements. In: 9° INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENTS, 1992, New Dehli. **Proceedings** [...]. New Dehli: National Council of Cement and Building Materials, 1992. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 29 ago. 2020.

MAYFIELD, L. Limestone additions to Portland cement - An old controversy revisited. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 10, p. 3-8, 1988. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 ago. 2020.

MEDJIGBODO, G. et al. Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filer and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 114-126, 2018. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MEHDIPOUR, I.; KUMAR, A.; KHAYAT, K. H. Rheology, hydration, and strength evolution of interground limestone cement containing PCE dispersant and high volume supplementary cementitious materials. **Materials & Desing**, v. 127, p. 54-56, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MEHTA, P. K. Sustainable cements and concrete for the climate change era – A review. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 2010, Ancona. **Proceedings** [...]. Milwaukee: UWM Center for By-Products Utilization, 2010. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MEIER, S. A. et al. Dynamics of the internal reaction layer arising during carbonation of concrete. **Chemical Engineering Science**, n. 62, p. 1125-1137, 2007. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. New Jersey: Prentice Hall, 2003. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MIRA, P.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 683-689, 2002. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MOBIN RAJ, T.; MUTHUPRIYA, P. Determination of concrete carbonation depth by experimental investigation. **International Journal of Engineering Science Invention Research e Development**, v. 2, p. 534-541, 2016. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MOIR, G. K.; KELHAN, S. Developments in the manufacture and use of Portland limestone cement. **ACI Special Publication**, v. 172, p. 797-819, 1999. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MONTEIRO, I. et al. Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 263-269, 2012. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MORANDEAU, A. E.; WHITE, C. E. In situ x-ray pair distribution function analysis of accelerated carbonation of a synthetic calcium–silicate–hydrate gel. **Journal of Materials Chemistry**, v. 3, p. 8597-8605, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and CSH in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153-170, 2014. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MOREIRA, P. M.; AGUIAR, J. B.; CAMÕES, A. Systems for superficial protection of concretes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM POLYMERS IN CONCRETE, 2006, Guimarães. **Proceedings** [...]. Minho: University of Minho, 2006. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 20 ago. 2020.

MORTON, R.; JAGGAR, D. **Design and the Economics of Buildings**. London: Taylor & Francis, 1995. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. São Paulo: Artliber, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

MULLER, N.; HARNISH, J. **A blueprint for a climate friendly cement industry**. Nürnberg: Ecofys Germany, 2008. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 17 ago. 2020.

MUNTEAN, A. et al. **A note on limitations of the use of accelerated concrete-carbonation tests for service-life predictions**. Bremen: Bremen University, 2005. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 17 ago. 2020.

NAGATAKI, S.; OHGA, H. Combined effect of carbonation and chloride on corrosion of reinforcement in fly ash concrete. In: 4^o INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 1992, Istanbul. **Proceedings** [...]. Farmington Hills: ACI, 1992. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

NEPOMUCENO, A. A.; PESSOA, P. O. A. Influência da reserva alcalina na corrosão de armaduras em peças de argamassas com diferentes relações água/cimento sujeitas à carbonatação. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2004.

NEVES, R. et al. Assessing concrete carbonation resistance through air permeability measurements. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 304-309, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

NGUYEN, T. T. H.; BARY, B.; LARRARD, T. Coupled carbonation-rust formation-damage modeling and simulation of steel corrosion in 3D mesoscale reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 74, p. 95-107, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

NIELSEN, C. V. Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective. In: CONCRETE TECHNOLOGY FORUM, 2008, Denver. **Proceedings [...]**. Silver Spring: NRMCA, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 17 ago. 2020.

NILSSON, L. O.; TANG, L. Transport mechanism in porous materials. In: JENNINGS, H.; KROPP, J.; SCRIVENER, K. **The modeling of microstructure and its potencial for studying transport properties and durability**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 17 ago. 2020.

NORNES, D. **Use of life cycle costing in the U.S. green building industry**. 2005. Dissertation (Master in Engineering) – Colorado State University, Fort Collins, 2005. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

O'CONNOR, J. **Survey on actual service lives for North American buildings**. In: WOODFRAME HOUSING DURABILITY AND DISASTER ISSUES CONFERENCE. Las Vegas, 2004. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 17 ago. 2020.

O'NEILL, T. J. **Life cycle assessment and environmental impact of polymeric products**. Shawbury: Rapra Review Reports, v. 13, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte Editorial, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

OLIVEIRA, M. J.; VECCHIA, F. A. S. Mudanças climáticas. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Nosso futuro comum - A comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento**. Oxford: Editora da Universidade de Oxford, 1987. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

_____. **Projeto final de acordo climático de Paris**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 15 ago. 2020.

ORTIZ, R. G. **Avaliação da integridade da pasta de cimento classe G com a rocha arenito da bacia do Paraná em condições de armazenamento geológico de CO₂**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 dez. 2020.

OSTERMEYER, Y.; WALLBAUM, H.; REUTER, F. Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 1762-1779, 2013. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 years perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1348-1356, 2007. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

PALM, S. et al. Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 308-318, 2016. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

PAPADAKIS, V. G. Efficiency factors (*k-values*) for supplementary cementing materials regarding carbonation and chloride penetration. In: 5^o INTERNATIONAL CONFERENCE OF DURABILITY OF CONCRETE, 2000, Barcelona. **Proceedings** [...]. Farmington Hills: ACI, 2000. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, p. 363-373, 1991. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 17 ago. 2020.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. **Materials and Structures**, v. 25, p. 293–304, 1992. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

PAPROCKI, A.; CARDOSO, A. M.; LIGAVUE, R. A. Caracterização de cinzas leves oriundas da combustão de carvão pulverizado visando sua aplicação na síntese de zeólitas. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 2008, Porto de Galinhas. **Anais** [...]. Porto de Galinhas: CBECIMAT, 2008.

PARDINI, A. F. **Contribuição ao entendimento da aplicação da certificação LEED e do conceito de custos no ciclo de vida em empreendimentos mais sustentáveis no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

PARIS, J. M. F. **La carbonatacion de la pasta hidratada de cemento Portland**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1973. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 10 set. 2020.

PARK, D. C. Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings. **Construct and Building Materials**, v. 22, p. 2260-2268, 2008. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 29 dez. 2020.

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 50-57, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

PETER, M. A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, n. 38, p. 1385-1393, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

PETROBRÁS. **Densidade e poderes caloríficos superiores**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 22 jul. 2019.

PHAM, S. T. Experimental investigation and modelling of carbonation process in cement materials. **Open Civil Engineering Journal**, n. 7, p. 116-125, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

PHUNG, Q. T. et al. Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions. **Construction and Building Materials**, n. 82, p. 376-390, 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

PIMENTEL, C. **Tipos de Calcário (Dolomítico, Calcítico e Margas)**. Ciências – geologia blogspot, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 19 nov. 2018.

POSSAN, E. et al. Carbonatação em ambiente urbano: Correlação entre ensaios acelerados e não acelerados. In: 8º CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 10º CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO - CONPAT, 2005, Assunção. **Anais [...]**. Mérida: ALCONPAT, 2005.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: Abordagem geral. **Revista Técnico Científica do CREA/PR**, n. 1, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 17 ago. 2020.

PRABAKAR, J.; HEMALATHA, T.; JONES, M. R. Durability characteristics of cement containing high volume supplementary cementitious materials. **The Indian Concrete Journal**, v. 90, p. 28-38, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

PROSKE, T. et al. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contentes – Mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 38-46, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

_____. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contente – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 413-421, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 02 set. 2020.

RAM, L. C.; MASTO, R. E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. **Earth-Science Reviews**, v. 128, p. 52-74, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

RAMEZANIANPOUR, A. M.; HOOTON, R. D. A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 1-13, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 27 ago. 2020.

RAVINA, D. Optimized determination of PFA (*fly ash*) fineness with reference to pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, v. 10, p. 573-580, 1980. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 27 ago. 2020.

REAL, S. A. C. F. **Contributo da análise dos custos do ciclo de vida para projectar a sustentabilidade na construção**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: Desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

REN, G.; ZHANG, Q. **Benchmarking the life cycle cost management of building project**. Tianjun: Tianjun University of Technology, 2004. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 17 ago. 2020.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D. V. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

RICO, J. R. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes**. 2000. Thesis (Engineering Doctorate) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

RILEM. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. CPC-18 measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21 p. 453-455, 1988. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

_____. TC 116-PCD tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**. v. 32, p. 174-179, 1999. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

RODRIGUES, M. P. Protecção do betão com revestimentos orgânicos. In: SEMINÁRIO PREVENÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO, 1996, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: LNEC, 1996.

ROHDE, G. M. et al. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil: Aspectos técnicos e ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

ROHDE, G. M.; MACHADO, C. S. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Porto Alegre: CIENTEC, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of hydration phases of metakaolin – lime – water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p.133-138, 2002. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 29 dez. 2020.

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, I. O. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 432-440, 2006. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. Carbonation resistance of one industrial mortar use as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, p. 949-953, 2001. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 15 dez. 2020.

SANTOS, H. C. **Influência de nanopartículas de carbonato de cálcio na formação de Etringita tardia em pastas de cimento submetidas à cura térmica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Sergipe, Aracajú, 2020. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 10 jan. 2021.

SAUMAN, Z. Carbonization of porous concrete and its main binding components. **Cement and Concrete Research**, v. 1, p. 645-662, 1971. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 30 dez. 2020.

SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, 2016. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SCHUTTER, G. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. In: 36° CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 2011, Singapore. **Proceedings** [...]. Ghent: Ghent University, 2011. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SCRIVENER, K. L. et al. TC 238-SCM: Hydration and microstructure of concrete with SCMs. **Materials and Structures**, v. 48, p. 835-862, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SCRIVENER, K. L.; NEMATI, K. M. The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. **Cement and concrete research**, v. 26, p. 35-40, 1996. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio as Micro e Pequenas Empresas. **Mas o que são créditos de carbon?** Brasília: SEBRAE, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 26 dez. 2019.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, art. 4, 2006. Disponível em: Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 17 ago. 2020.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Pearson Universidades, 2008. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, n. 178, p. 219-232, 2018. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary cementing materials**. New York: Springer, 2011. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SIDERIS, K. K.; SAVVA, A. E.; PAPAYIANNI, J. Sulfate resistance attack and carbonation of plain and blended cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 47-56, 2006. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SILVA, A. O. **Estudo comparativo do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: [link]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, A.; NEVES, R.; DE BRITO, J. Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 73–81, 2014. Disponível em: [link]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, F. G. et al. Sources of variations when comparing concrete carbonation results. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, p. 333-342, 2009. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SILVA, P. R.; BRITO, J. Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Materials and Structures**, v. 49, p. 2749-2766, 2016. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SILVA, V. G. Uso de materiais e sustentabilidade. **Revista Sistemas Prediais**, v.1, p. 30-34, 2007.

SILVA, V. G.; PARDINI, A. F. Contribuição ao entendimento da aplicação da certificação LEED no Brasil com base em dois estudos de caso. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 81-97, 2010. Disponível em: [link]. Acesso em: 17 set. 2020.

SILVA, V. M.; LIBORIO, J. B. L. Ajuste do modelo teórico e experimental para o processo de carbonatação. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2003. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

SILVEIRA, R. G. **Estudo de concretos com pozolana submetidos à carbonatação em ensaios acelerados e natural monitorado por 20 anos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em: [link]. Acesso em: 20 ago. 2020.

SIMAPRO. **Inventário de emissões (Metro cúbico de concreto)**. Curitiba: ACV Brasil, 2020a. Disponível em: [link]. Acesso em 9 set. 2020.

_____. **Inventário de emissões (Pilar estrutural de concreto)**. Curitiba: ACV Brasil, 2020b. Disponível em: [link]. Acesso em 9 set. 2020.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. **Referências para custos horários e encargos: Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil/ Caixa Econômica Federal**. Brasília: CAIXA, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 17 ago. 2020.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, n. 37, p. 1647-1653, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

SNELLINGS, R. X-ray powder diffraction applied to cement. In: SRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. New York: Taylor & Francis Group, 2016. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

SONG, H. W.; KWON, S. J.; BYUN, K. J.; PARK, C. K. Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 979-989, 2006. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

SOROKA, I.; SETTER, N. The effect of fillers on strength of cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 7, p. 449-456, 1977. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – Método de ensaio acelerado**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em [\[link\]](#). Acesso em 29 dez. 2020.

SOUZA, T. M. et al. Hidratação da magnésia e seu efeito ligante em concretos refratários sem cimento. **Revista Cerâmica**, v.59, p. 206-215, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 29 dez. 2020.

STARK, J. Optimierte Bindemittelsysteme für die Betonindustrie. **Beton**, v. 54, p. 486-490, 2004. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

STARK, J.; FREYBURG, E.; LÖHMER, K. Investigations in to the influence of limestone additions to Portland cement clinker phases on the early phase of hydration. In: DHIR, R. K.; DYER, T. D. **Modern concrete materials: Binders, additions and admixtures**. London: Thomas Telford, 1999. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

STATISTA. **Major countries in worldwide cement production from 2015 to 2019**. New York: Statista, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 16 jul. 2020.

STERNER, E. Life-cycle costing and its use in the Swedish building sector. **Building Research and Information**, v. 28, p. 387-393, 2000. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

SU, N.; MIAO, B. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 215-222, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

SULAPHA, P. et al. Carbonation of concrete containing mineral admixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.15, p. 134-143, 2003. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 02 de abr. 2021.

SUN, H. et al. Jet mill grinding of Portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 41-49, 2013. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

SWAMY, R. N. Fly ash concrete – Potential without misuse. **Materials and Structures**, v. 23, p. 397-411, 1990. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford Publishing, 1997. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

TCPO. Tabela de Composições e Preços para Orçamentos. **Tabela de composição de preços para orçamento**. São Paulo, PINI, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

THIERY, M. et al. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1047-1058, 2007. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

_____. Effect of Carbonation on the microstructure and moisture properties of cement-based materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 2011, Porto. **Proceedings** [...]. Porto: FEUP, 2011. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 28 dez. 2020.

THONGSANITGARN, P. et al. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 410-417, 2014. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

TORRES, H. et al. Simplified mathematical model for concrete carbonation. **Journal of Materials Civil Engineering**, v. 29, n. 10, 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

TQS. **Programa P-Calc V1 4.0**. São Paulo: TQS, 2020. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em 25 mar. 2020.

TSIVILIS, S. et al. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, p. 107-116, 1999. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

_____. An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 371-378, 2002. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 ago. 2020.

TSIVILIS, S.; ASPROGERAKAS, A. A study on the chloride diffusion into Portland limestone cement concrete. **Materials Science Forum**, v. 636–637, p. 1355-1361, 2010. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 27 ago. 2020.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra alto desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Disponível em: [link]. Acesso em: 20 ago. 2020.

TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stokholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. Disponível em: [link]. Acesso em: 18 ago. 2020.

UNEP. United Nations Environmental Programme. **Buildings and climate change: Current status, challenges and opportunities**. Nairobi: UNEP, 2007. Disponível em: [link]. Acesso em: 27 ago. 2020.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Greenhouse gas emissions**. Washington D. C: USEPA, 2020. Disponível em: [link]. Acesso em: 10 ago. 2020.

USGS. United States Geological Survey. Cement – Mineral commodity summaries. **Mineral commodity summaries 2017**. Reston: USGS, 2017. Disponível em: [link]. Acesso em: 09 ago. 2020.

_____. Cement – Mineral commodity summaries. In: **Cement statistics and information - Annual publications**. Reston: USGS, 2020. Disponível em: [link]. Acesso em: 05 ago. 2020.

UYSAL, M.; YILMAZ, K.; IPEK, M. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. **Construction and Buildings Materials**, v. 27, p. 263-270, 2012. Disponível em: [link]. Acesso em: 28 ago. 2020.

VAN DEN HEEDE, P.; DE SCHEPPER, M.; DE BELIE, N. Accelerated and natural carbonation of concrete with high volumes of fly ash: Chemical, mineralogical and microstructural effects. **Royal Society Open Science**, v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: [link]. Acesso em: 18 ago. 2020.

VANCE, K. et al. Hydration and strength development in ternary Portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 93-103, 2013. Disponível em: [link]. Acesso em: 28 ago. 2020.

VARES, S.; HAKKINEN, T. Environmental burdens of concrete and concrete products. **Nordic Concrete Research Publication**, v. 21, p. 98-107, 1998. Disponível em: [link]. Acesso em: 24 ago. 2020.

VAZQUEZ, F. T. Identificación de los compuestos anhidros e hidratados del cemento. **Materiales de Construcción**, v. 142, p. 49-58, 1971. Disponível em: [link]. Acesso em: 28 ago. 2020.

VÉNUAT, M. **Relation entre la carbonatation du béton et les phenomenes de corrosion des armatures du béton**. Paris: Rencontres CEFRACOR, 1977.

VERNET, C. P. Ultra-durable concretes: Structure at the micro and nanoscale. **Construction Materials**, v. 29, p. 324-327, 2004. Disponível em: [link]. Acesso em: 28 ago. 2020.

VERNET, C. P.; NOWORYTA G. Mechanisms of limestone fillers reactions in the system {C₃A-CSH₂-CH-CC-H}: Competition between calcium monocarbo - and monosulfoaluminate hydrates formation. In: 9^o INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 1992, New Delhi. **Proceedings** [...]. Ballabgarh: National Council for Cement and Building Materials, 1992. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 24 ago. 2020.

VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete: Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. 2010. Thesis (Engineering Doctorate) - Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

VUK, T. et al. The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 135-139, 2001. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: A must or a myth? **Materials and Structures**, v. 42, p. 973-982, 2009. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. **Getting the numbers right (GNR), cement sustainable initiative, 2017**. Geneve: WBCSD, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 16 dez. 2018.

WESCHE, K. **Fly ash in concrete: Properties and performance**. New York: Taylor & Francis, 1991. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

WIKIPEDIA. **Desenvolvimento sustentável**. San Francisco: WIKIPEDIA, 2020. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em 29 dez. 2020.

WONGKEO, W. et al. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and sílica fume. **Materials and Design**, v. 64, p. 261-269, 2014. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

WORLDMETERS. **Current world population**. Worldmeters, 2020. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 05 jan. 2020.

WU, B.; YE, G. Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation. **Construction and Buildings Materials**, n. 145, p. 52-61, 2017. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

YAMAMOTO, J. K. et al. Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil. **Environmental Geosciences**, v. 4. p. 192-206, 1997. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

YILMAZ, B.; OLGUN, A. Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 194-201, 2008. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

YOSHITAKE, M. Gestão de custos do ciclo de vida de um ativo. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO ESTRATÉGICA DE CUSTOS, 1995, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP/USP, 1995. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 18 ago. 2020.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (*UHPC*) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383-394, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 20 ago. 2020.

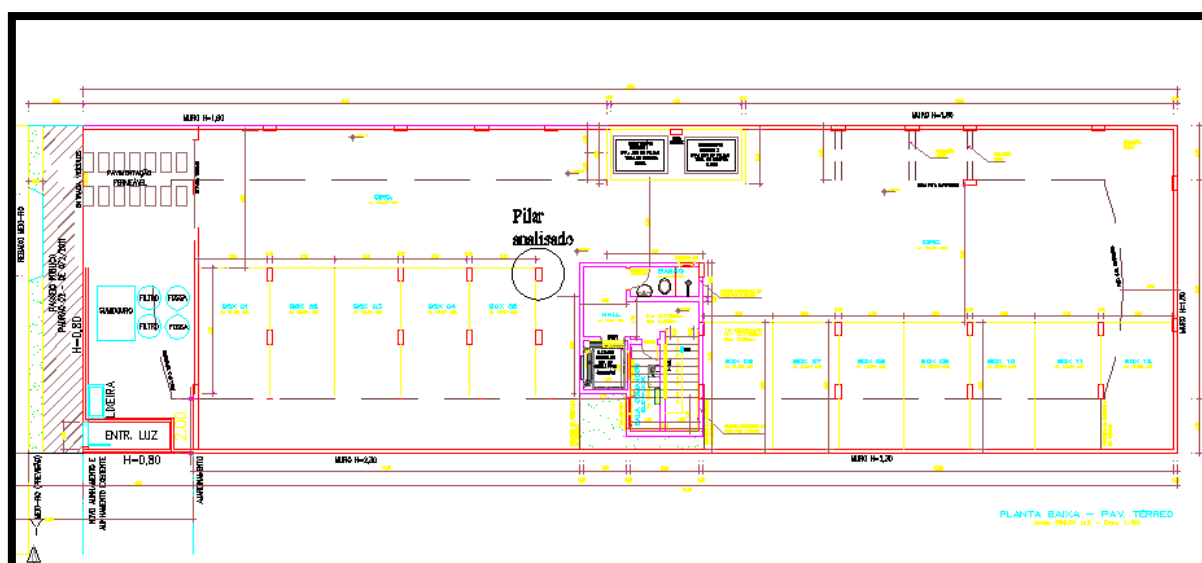
ZHAO, H. et al. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p.66-74, 2015. Disponível em: [[link](#)]. Acesso em: 28 ago. 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS DE PROJETO

Os esforços solicitantes foram obtidos através do software Eberick V9 (ALTOQI, 2020), por meio do projeto de um edifício com oito pavimentos (*Figura APA.1*). Fez-se a escolha de um pilar central da estrutura, no primeiro pavimento (*pilotis*).

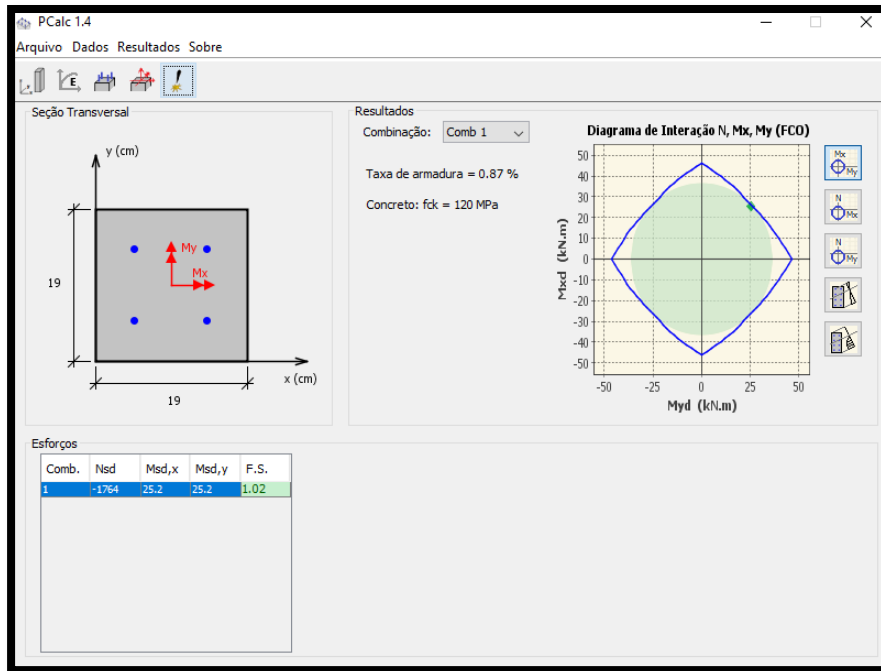
Figura APA.1 – Planta baixa do térreo do edifício e posição do pilar analisado



Fonte: Silva (2014).

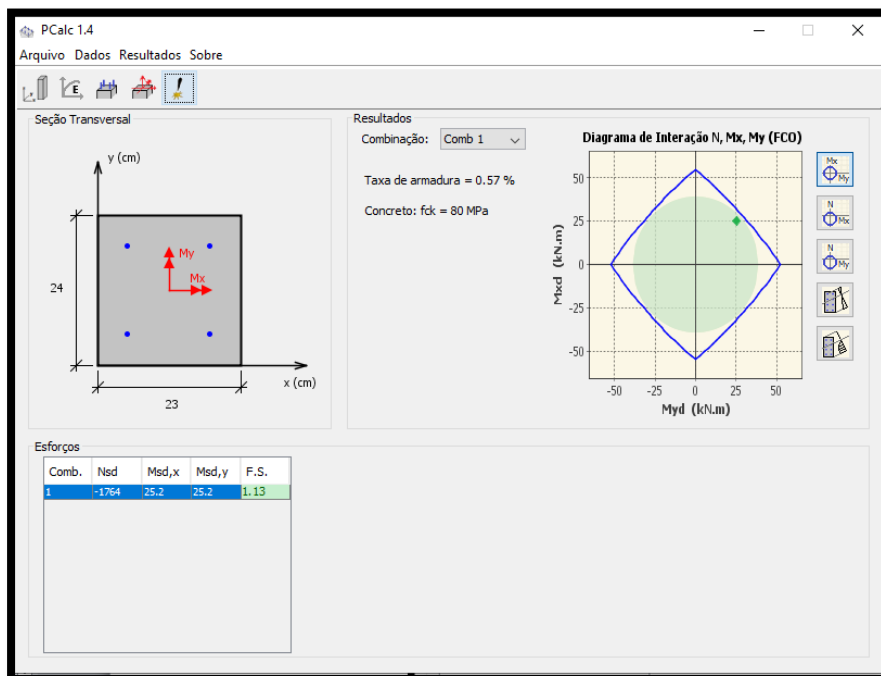
Em seguida, fez-se o cálculo estrutural do pilar de concreto armado para os traços: REF, FC50, FC60, FC60P, FC60CH10, FC70CV10P, FC70CV10CH10, por meio do software P-Calc V1 4.0 (TQS, 2020).

Figura APA.2 – Dimensionamento do pilar para o traço REF



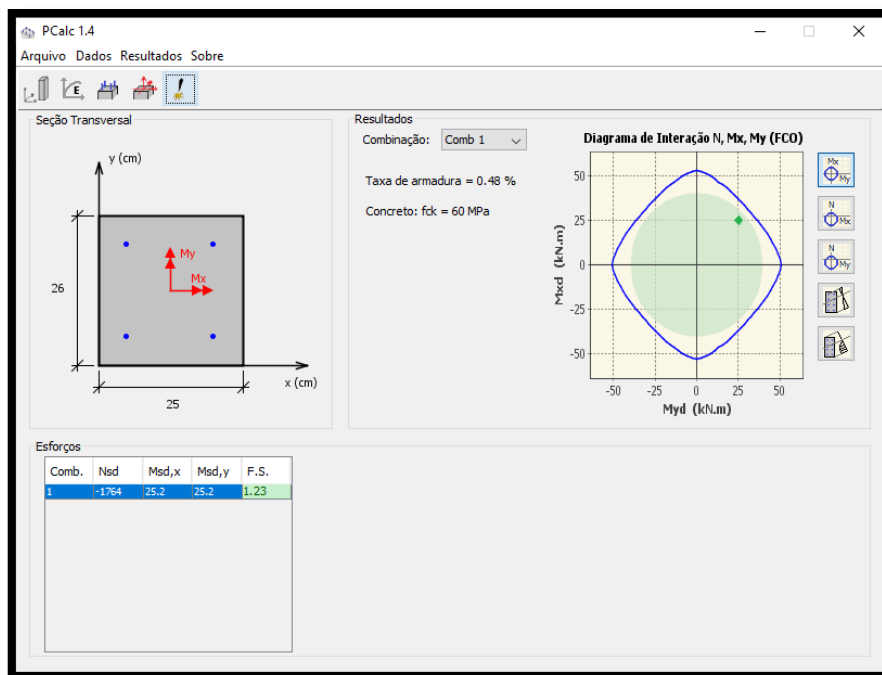
Fonte: TQS (2020).

Figura APA.3 – Dimensionamento do pilar para o traço FC50



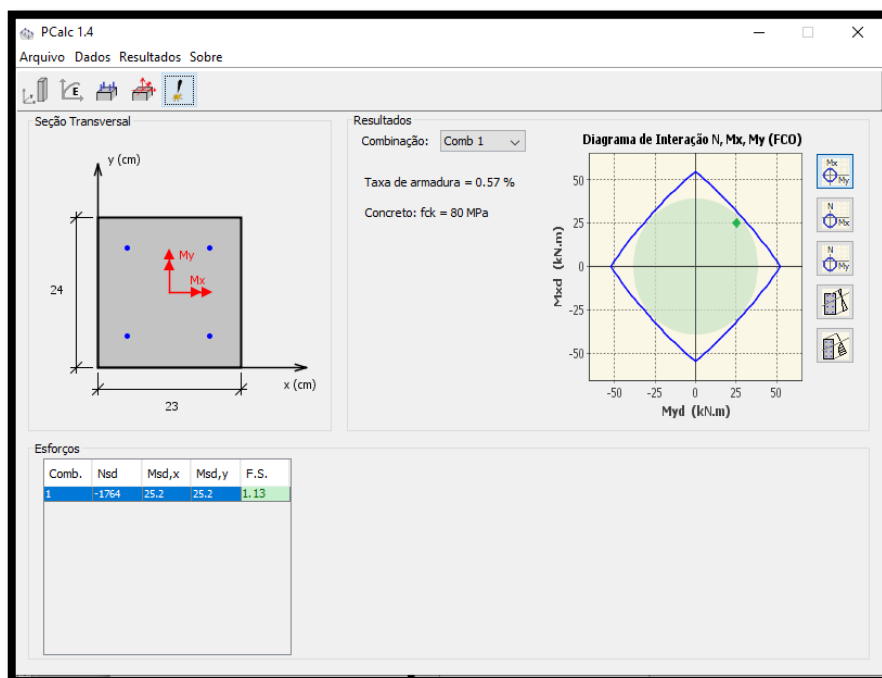
Fonte: TQS (2020).

Figura APA.4 – Dimensionamento do pilar para o traço FC60 e FC60P



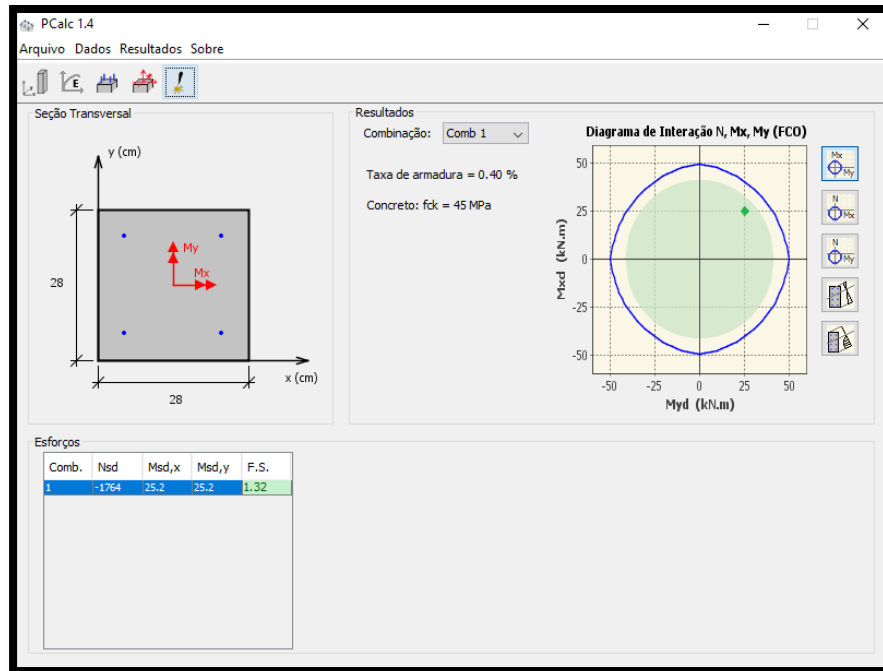
Fonte: TQS (2020).

Figura APA.5 – Dimensionamento do pilar para o traço FC60CH10



Fonte: TQS (2020).

Figura APA.6 – Dimensionamento do pilar para o traço FC70CV10P



Fonte: TQS (2020).

APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA NO SIMAPRO

Tabela APB.1 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - REF

Traço REF	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	42,4 kg
Areia fina	40,3 kg
Areia média	40 kg
Brita 0	97,1 kg
Água	436,96 kg
Aditivo hiperplastificante	1,8 kg
Madeira	0,0375 m ³
Querosene	9,24 L
Processos	
Energia elétrica	21,47 kWh
Óleo Diesel	3,99 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.2 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - FC50

Traço FC50	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	35,7 kg
FC	27 kg
Areia fina	66,75 kg
Areia média	66,3 kg
Brita 0	160,95 kg
Água	544,11 kg
Aditivo hiperplastificante	2,26 kg
Madeira	0,0464 m ³
Querosene	11,45 L
Processos	
Energia elétrica	24,06 kWh
Óleo Diesel	5,89 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.3 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - FC60

Traço FC60	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	34,56 kg
FC	40,68 kg
Areia fina	81,18 kg
Areia média	80,64 kg
Brita 0	195,84 kg
Água	591,96 kg
Aditivo hiperplastificante	2,75 kg
Madeira	0,0504 m ³
Querosene	12,42 L
Processos	
Energia elétrica	25,5 kWh
Óleo Diesel	7,04 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.4 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - FC60P

Traço FC60P	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	34,56 kg
FC	40,68 kg
Areia fina	81,18 kg
Areia média	80,64 kg
Brita 0	195,84 kg
Água	18,72 kg
Aditivo hiperplastificante	2,75 kg
Madeira	0,0504 m ³
Tinta acrílica	12,65 L
Processos	
Energia elétrica	6,39 kWh
Óleo Diesel	7,04 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.5 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto – FC60CH10

Traço FC60CH10	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	28,8 kg
FC	33,9 kg
CH	6,3 kg
Areia fina	67,65 kg
Areia média	67,2 kg
Brita 0	163,2 kg
Água	543,96 kg
Aditivo hiperplastificante	2,29 kg
Madeira	0,0464 m ³
Querosene	11,45 L
Processos	
Energia elétrica	24,06 kWh
Óleo Diesel	5,89 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.6 – Dados de entrada SimaPro pilar estrutural de concreto - FC70CV10P

Traço FC70CV10P	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	21,34 kg
FC	62,26 kg
CV	7,92 kg
Areia fina	102,74 kg
Areia média	101,86 kg
Brita 0	247,5 kg
Água	22,88 kg
Aditivo hiperplastificante	3,26 kg
Madeira	0,0553 m ³
Tinta acrílica	13,86 L
Processos	
Energia elétrica	4,49 kWh
Óleo Diesel	8,53 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.7 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - REF

Traço REF	
Materiais/montagens	
CPV – ARI	424 kg
Areia fina	403 kg
Areia média	400 kg
Brita 0	971 kg
Água	106 kg
Aditivo hiperplastificante	17,97 kg
Processos	
Energia elétrica	66,69 kWh
Óleo Diesel	2,52 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.8 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC50

Traço FC50	
Materiais/montagens	
CPV – ARI	238 kg
FC	180 kg
Areia fina	445 kg
Areia média	442 kg
Brita 0	1.073 kg
Água	105 kg
Aditivo hiperplastificante	15,05 kg
Processos	
Energia elétrica	37,78 kWh
Óleo Diesel	1,86 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.9 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC60

Traço FC60P	
Materiais/montagens	
CPV – ARI	192 kg
FC	226 kg
Areia fina	451 kg
Areia média	448 kg
Brita 0	1.088 kg
Água	104 kg
Aditivo hiperplastificante	15,26 kg
Processos	
Energia elétrica	30,62 kWh
Óleo Diesel	1,69 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.10 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC60CH10

Traço FC60CH10	
Materiais/montagens	
CPV – ARI	192 kg
FC	226 kg
CH	42 kg
Areia fina	451 kg
Areia média	448 kg
Brita 0	1.088 kg
Água	104 kg
Aditivo hiperplastificante	15,26 kg
Processos	
Energia elétrica	30,62 kWh
Óleo Diesel	1,69 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.11 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC70CV10

Traço FC70CV10P	
Materiais/montagens	
CPV – ARI	97 kg
FC	283 kg
CV	36 kg
Areia fina	467 kg
Areia média	463 kg
Brita 0	1.125 kg
Água	104 kg
Aditivo hiperplastificante	14,81 kg
Processos	
Energia elétrica	15,84 kWh
Óleo Diesel	1,33 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.12 – Dados de entrada SimaPro metro cúbico de concreto - FC70CV10CH10

Traço FC70CV10CH10	
Materiais/montagens	
CPV - ARI	97 kg
FC	283 kg
CV	36 kg
CH	42 kg
Areia fina	467 kg
Areia média	463 kg
Brita 0	1.125 kg
Água	104 kg
Aditivo hiperplastificante	14,81 kg
Processos	
Energia elétrica	15,84 kWh
Óleo Diesel	1,33 L

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APB.13 – Dados de entrada SimaPro consumo de Diesel e energia elétrica

Item	REF		FC50		FC60		FC60P		FC60CH10		FC70CV10		FC70CV10P		FC70CV10 CH10	
	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC	MCC	PEC
1 - Consumo Diesel (L)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1.1 - Areia (MCC/PEC) Coeficiente 0,79 L.t ⁻¹	0,63	0,06	0,7	0,11	0,71	0,13	x	0,13	0,71	0,11	0,73	x	x	0,16	0,73	x
1.2 - Brita 0 (MCC/PEC) Coeficiente 0,19 L.t ⁻¹	0,18	0,02	0,2	0,03	0,21	0,04	x	0,04	0,21	0,03	0,21	x	x	0,05	0,21	x
1.3 - CP (MCC/PEC) Coeficiente 4,04 L.t ⁻¹	1,71	0,17	0,96	0,14	0,77	0,14	x	0,14	0,77	0,14	0,39	x	x	0,09	0,39	x
1.4 - Desc. e rec. (PEC) Coeficiente 37,41 L.m ⁻³	x	3,74	x	5,61	x	6,73	x	6,73	x	5,61	x	x	x	8,23	x	x
Total Diesel (L)	2,52	3,99	1,86	5,89	1,69	7,04	x	7,04	1,69	5,89	1,33	x	x	8,53	1,33	x
2 - Consumo kWh	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1 - Brita 0 (MCC/PEC) Coeficiente 0,25 kWh.t ⁻¹	0,24	0,02	0,27	0,04	0,27	0,05	x	0,05	0,27	0,04	0,28	x	x	0,06	0,28	x
2.2 - CP (MCC/PEC) Coeficiente 155,6 kWh.t ⁻¹	65,98	6,6	37,04	5,56	29,88	5,38	x	5,38	29,88	5,56	15,09	x	x	3,32	15,09	x
2.3 - Betoneira (MCC) Coeficiente 0,47 kWh.m ⁻³	0,47	x	0,47	x	0,47	x	x	x	0,47	x	0,47	x	x	x	0,47	x
2.4 - Concretagem (PEC) Coeficiente 2,23 kWh.m ⁻³	x	0,22	x	0,33	x	0,4	x	0,4	x	0,33	x	x	x	0,49	x	x
2.5 - Forma (PEC) Coeficiente 0,2 kWh.m ⁻²	x	0,42	x	0,52	x	0,56	x	0,56	x	0,52	x	x	x	0,62	x	x
2.6 - Lava-jato (PEC) Coeficiente 0,2 kWh.m ⁻²	x	14,21	x	17,61	x	19,11	x	x	x	17,61	x	x	x	x	x	x
Total kWh	66,69	21,47	37,78	24,06	30,62	25,5	x	6,39	30,62	24,06	15,84	x	x	4,49	15,84	x

(MCC) MetroCúbico de Concreto / (PEC) Pilar Estrutural de Concreto

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

APÊNDICE C – PLANILHAS DE CUSTOS UNITÁRIOS

Tabela APC.1 – Encargos sociais – RS (SINAPI – cálculos e parâmetros)

RIO GRANDE DO SUL		VIGÊNCIA A PARTIR DE 01/2020			
ENCARGOS SOCIAIS SOBRE A MÃO DE OBRA					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	COM DESONERAÇÃO		SEM DESONERAÇÃO	
		HORISTA (%)	MENSALISTA (%)	HORISTA (%)	MENSALISTA (%)
GRUPO A					
A1	INSS	0,00%	0,00%	20,00%	20,00%
A2	SESI	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%
A3	SENAI	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
A4	INCRA	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%
A5	SEBRAE	0,60%	0,60%	0,60%	0,60%
A6	Salário Educação	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%
A7	Seguro Contra Acidentes de Trabalho	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%
A8	FGTS	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%
A9	SECONCI	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
A	Total	16,80%	16,80%	36,80%	36,80%
GRUPO B					
B1	Repouso Semanal Remunerado	17,93%	Não incide	17,93%	Não incide
B2	Feriados	4,24%	Não incide	4,24%	Não incide
B3	Auxílio Enfermidade	0,89%	0,69%	0,89%	0,69%
B4	13º Salário	10,77%	8,33%	10,77%	8,33%
B5	Licença Paternidade	0,07%	0,06%	0,07%	0,06%
B6	Faltas Justificadas	0,72%	0,56%	0,72%	0,56%
B7	Dias de Chuva	1,53%	Não incide	1,53%	Não incide
B8	Auxílio Acidente do Trabalho	0,11%	0,09%	0,11%	0,09%
B9	Férias Gozadas	7,40%	5,72%	7,40%	5,72%
B10	Salário Maternidade	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%
B	Total	43,69%	15,48%	43,69%	15,48%
GRUPO C					
C1	Aviso Prévio Indenizado	4,28%	3,32%	4,28%	3,32%
C2	Aviso Prévio Trabalhado	0,10%	0,08%	0,10%	0,08%
C3	Férias Indenizadas	5,29%	4,09%	5,29%	4,09%
C4	Depósito Rescisão Sem Justa Causa	3,63%	2,81%	3,63%	2,81%
C5	Indenização Adicional	0,36%	0,28%	0,36%	0,28%
C	Total	13,66%	10,58%	13,66%	10,58%
GRUPO D					
D1	Reincidência do Grupo A sobre o Grupo B	7,34%	2,60%	16,08%	5,70%
D2	Reincidência do Grupo A Sobre Aviso Prévio Trabalhado e Reincidência do FGTS Sobre Aviso Prévio Indenizado	0,36%	0,28%	0,38%	0,30%
D	Total	7,70%	2,88%	16,46%	6,00%
TOTAL (A + B + C + D)		81,85%	45,74%	110,61%	68,86%

Fonte: SINAPI (2020).

Tabela APC.2 – Composição da fôrma para pilares com madeira compensada 12 mm

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ²
					Data	12/2020
FORMA PARA PILARES MADEIRA COMPENSADA 12 mm					Total (R\$)	50,27
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.
Ajudante de carpinteiro	0,204	h	-	9,60	-	1,96
Carpinteiro	0,82	h	-	12,75	-	10,46
Chapa compensada 12 mm	0,25	m ²	34,39	-	8,60	-
Prego 17x21 com cabeça	0,04	kg	9,88	-	0,39	-
Pontaletes 75x75 mm	1,20	m	4,61	-	5,53	-
Sarrafo 25x75 mm	1,65	m	1,98	-	3,27	-
Tábua 25x200 mm	0,104	m ²	16,51	-	1,72	-
Tábua 25x150 mm	0,10	m ²	17,11	-	1,71	-
Desmoldante para forma de concreto	0,02	L	12,09	-	0,24	-
Prego 17x27 com cabeça dupla	0,10	kg	9,88	-	0,99	-
Prego 15x15 com cabeça	0,05	kg	10,29	-	0,51	-
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					22,96	12,42
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	13,74
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	1,15	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					24,11	26,16

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.3 – Composição de custos do pilar REF

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	1 pilar
PILAR REF					Data	12/2020
					Total (R\$)	287,61
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.
CPV-ARI	42,4	kg	0,6	-	25,44	-
Areia fina	40,3	kg	0,05	-	2,02	-
Areia média	40	kg	0,04	-	1,6	-
Brita 0	97,1	kg	0,03	-	2,91	-
Água para concreto	10,6	L	0,006	-	0,06	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	1,8	kg	17,15	-	30,87	-
Forma de madeira compensada 12 mm	2,09	m ²	22,96	12,42	47,99	25,96
Servente	6	h	-	9,22	-	55,32
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					110,89	81,28
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	89,9
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	5,54	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					116,43	171,18

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.4 – Composição de custos do pilar FC50

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	1 pilar
PILAR FC50						Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
CPV-ARI	35,7	kg	0,6	-	21,42	-	
FC	27	kg	0,05	-	1,35	-	
Areia fina	66,75	kg	0,05	-	3,34	-	
Areia média	66,3	kg	0,04	-	2,65	-	
Brita 0	160,95	kg	0,03	-	4,83	-	
Água para concreto	15,75	L	0,006	-	0,09	-	
Hiperplastificante Master Glenium 54	2,26	kg	17,15	-	38,76	-	
Forma de madeira compensada 12 mm	2,59	m ²	22,96	12,42	59,47	32,17	
Servente	6	h	-	9,22	-	55,32	
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					131,91	87,49	
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	96,77	
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	6,6	-	
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					138,51	184,26	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.5 – Composição de custos do pilar FC60 e FC60P

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	1 pilar
PILAR FC60/FC60P						Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
CPV-ARI	34,56	kg	0,6	-	20,74	-	
FC	40,68	kg	0,05	-	2,03	-	
Areia fina	81,18	kg	0,05	-	4,06	-	
Areia média	80,64	kg	0,04	-	3,23	-	
Brita 0	195,84	kg	0,03	-	5,88	-	
Água para concreto	18,72	L	0,006	-	0,11	-	
Hiperplastificante Master Glenium 54	2,75	kg	17,15	-	47,16	-	
Forma de madeira compensada 12 mm	2,81	m ²	22,96	12,42	64,52	34,9	
Servente	6	h	-	9,22	-	55,32	
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					147,73	90,22	
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	99,79	
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	7,39	-	
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					155,12	190,01	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.6 – Composição de custos do pilar FC60CH10

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	1 pilar
PILAR FC60CH10						Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
CPV-ARI	28,8	kg	0,6	-	17,28	-	-
FC	33,9	kg	0,05	-	1,7	-	-
CH	6,3	kg	0,70	-	4,41	-	-
Areia fina	67,65	kg	0,05	-	3,38	-	-
Areia média	67,2	kg	0,04	-	2,69	-	-
Brita 0	163,2	kg	0,03	-	4,9	-	-
Água para concreto	15,6	L	0,006	-	0,09	-	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	2,29	kg	17,15	-	39,27	-	-
Forma de madeira compensada 12 mm	2,59	m ²	22,96	12,42	59,47	-	32,17
Servente	6	h	-	9,22	-	-	55,32
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					133,19	-	87,49
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	-	96,77
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	6,66	-	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					139,85	-	184,26

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.7 – Composição de custos do pilar FC70CV10P

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	1 pilar
PILAR FC70CV10P						Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
CPV-ARI	21,34	kg	0,6	-	12,8	-	-
FC	62,26	kg	0,05	-	3,11	-	-
CV	7,92	kg	0,26	-	2,06	-	-
Areia fina	102,74	kg	0,05	-	5,14	-	-
Areia média	101,86	kg	0,04	-	4,07	-	-
Brita 0	247,5	kg	0,03	-	7,43	-	-
Água para concreto	22,88	L	0,006	-	0,14	-	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	3,26	kg	17,15	-	55,91	-	-
Forma de madeira compensada 12 mm	3,08	m ²	22,96	12,42	70,72	-	38,25
Servente	6	h	-	9,22	-	-	55,32
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					161,38	-	93,57
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	-	103,5
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	8,07	-	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					169,45	-	197,07

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.8 – Composição de custos da limpeza do pilar

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	m ²
LIMPEZA DO SUBSTRATO DO PILAR COM JATO DE ÁGUA						Data	12/2020
						Total (R\$)	9,87
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo	
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
Servente	0,13	h	-	9,22	-	1,20	
Água	6	L	0,006	-	0,04	-	
Solução limpadora diluída em água	0,1	L	47,87	-	4,79	-	
[Lava-jato pressão 1.700 psi (<i>locação</i>)	2,5.10 ⁻⁴	h	1609,62	-	0,40	-	
Querosene	0,13	L	13,51	-	1,76	-	
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS						6,99	1,20
Leis sociais						110,61	1,33
Ferramentas e equipamentos						5	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS						7,34	2,53

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.9 – Composição de custos da demolição com martelo rompedor do pilar

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	m ³
DEMOLIÇÃO COM MARTELO ROMPEDOR						Data	12/2020
						Total (R\$)	193,11
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo	
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
Pedreiro	1,5	h	-	12,31	-	18,47	
Ponteiro para rompedor (<i>l= 160 mm/φ =32 mm</i>)	0,075	un	86,31	-	6,47	-	
Compressor de ar portátil, rebocável, Diesel, potência 63 HP, capacidade 3,3 m ³ /mim	5	h	11,70	-	58,5	-	
Martelo rompedor, pneumático, φ =32 mm	15	h	5,46	-	81,90	-	
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS						146,87	18,47
Leis sociais						110,61	20,43
Ferramentas e equipamentos						5	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS						154,21	38,90

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.10 – Composição de custos para carga mecanizada do entulho do pilar

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	m ³
CARGA MECANIZADA DO ENTULHO EM CAMINHÃO BASCULANTE						Data	12/2020
						Total (R\$)	4,11
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo	
			Mat.	M.O.	material	M.O.	
Servente	0,0208	h	-	9,22	-	0,19	
Carregador sobre rodas 129 HP com caçamba (2,10 m ³) para aplicação geral	0,0104	h	217,70	-	2,26	-	
Caminhão basculante Diesel 228 HP c com caçamba de 6 m ³	0,01	h	127,49	-	1,27	-	
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS						3,53	0,19
Leis sociais						110,61	0,21
Ferramentas e equipamentos						5	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS						3,71	0,40

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.11 – Composição de custos transporte caminhão basculante

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	h
CAMINHÃO BASCULANTE COM CAÇAMBA DE 6 m ³					Data	12/2020
					Total (R\$)	271,26
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.
Motorista de caminhão	1	h	-	15,75	-	15,75
Jogo de pneus 10x20x16 com câmara	0,004	un	11.385,09	-	45,54	-
Graxa	0,009	kg	17,36	-	0,16	-
Óleo Diesel	36,5	L	3,38	-	123,37	-
Depreciação equipamentos de transporte	3,96.10 ⁻⁵	-	299,853,6	-	11,87	-
Juros de capital equipamentos de transporte	3,98.10 ⁻⁵	-	299,853,6	-	11,93	-
Manutenção equipamentos de transporte	1,13.10 ⁻⁴	-	299,853,6	-	33,88	-
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					226,75	15,75
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	17,42
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	11,34	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					238,09	33,17

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.12 – Composição de custos manejo do RCD

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ³
MANEJO DO RCD					Data	12/2020
					Total (R\$)	9,26
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.
Manejo do resíduo de construção e demolição (RCD)	1	m ³	8,82	-	8,82	-
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					8,82	-
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	-
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	0,44	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					9,26	-

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.13 – Composição de custos pintura acrílica

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ²
PINTURA COM TINTA ACRÍLICA COM TRÊS DE MÃOS EM CONCRETO					Data	12/2020
					Total (R\$)	56,04
Discriminação	Coefficiente	Unidade	Preço unitário		Custo	Custo
			Mat.	M.O.	material	M.O.
Ajudante de pintor	0,3	h	-	11,39	-	3,42
Pintor	1,2	h	-	15,79	-	18,95
Tinta acrílica	0,45	L	18,89	-	8,50	-
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					8,50	22,37
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	24,74
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	0,43	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					8,93	47,11

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.14 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto REF

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ³
TRAÇO – REF					Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	767,33
			Mat.	M.O.	Custo material	Custo M.O.
CPV-ARI	424	kg	0,6	-	254,40	-
Areia fina	403	kg	0,05	-	20,15	-
Areia média	400	kg	0,04	-	16,00	-
Brita 0	971	kg	0,03	-	29,13	-
Água para concreto	106	L	0,006	-	0,64	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	17,97	kg	17,15	-	308,19	-
Servente	5,53	h	-	9,22	-	50,99
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					628,51	50,99
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	56,40
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	31,43	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					659,94	107,39

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.15 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC50

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ³
TRAÇO – FC50					Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	614,18
			Mat.	M.O.	Custo material	Custo M.O.
CPV-ARI	238	kg	0,6	-	142,80	-
FC	180	kg	0,05	-	9	-
Areia fina	445	kg	0,05	-	22,25	-
Areia média	442	kg	0,04	-	17,68	-
Brita 0	1.073	kg	0,03	-	32,19	-
Água para concreto	105	L	0,006	-	0,63	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	15,05	kg	17,15	-	258,11	-
Servente	5,53	h	-	9,22	-	50,99
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					482,66	50,99
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	56,40
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	24,13	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					506,79	107,39

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.16 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC60

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	m ³				
TRAÇO – FC60P						Data	12/2020				
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	Custo				
			Mat.	M.O.	material	M.O.					
CPV-ARI	192	kg	0,6	-	115,20	-	-				
FC	226	kg	0,05	-	11,30	-	-				
Areia fina	451	kg	0,05	-	22,55	-	-				
Areia média	448	kg	0,04	-	17,92	-	-				
Brita 0	1.088	kg	0,03	-	32,64	-	-				
Água para concreto	104	L	0,006	-	0,62	-	-				
Hiperplastificante Master Glenium 54	15,26	kg	17,15	-	261,71	-	-				
Servente	5,53	h	-	9,22	-	-	50,99				
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS						461,94	50,99				
Leis sociais						110,61	%	-	-	56,40	
Ferramentas e equipamentos						5	%	-	-	23,10	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS						485,04				107,39	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.17 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC60CH10

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO						Unidade	m ³				
TRAÇO – FC60CH10						Data	12/2020				
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	Custo	Custo				
			Mat.	M.O.	material	M.O.					
CPV-ARI	192	kg	0,6	-	115,20	-	-				
FC	226	kg	0,05	-	11,30	-	-				
CH	42	kg	0,70	-	29,40	-	-				
Areia fina	451	kg	0,05	-	22,55	-	-				
Areia média	448	kg	0,04	-	17,92	-	-				
Brita 0	1.088	kg	0,03	-	32,64	-	-				
Água para concreto	104	L	0,006	-	0,62	-	-				
Hiperplastificante Master Glenium 54	15,26	kg	17,15	-	261,71	-	-				
Servente	5,53	h	-	9,22	-	-	50,99				
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS						491,34	50,99				
Leis sociais						110,61	%	-	-	56,40	
Ferramentas e equipamentos						5	%	-	-	24,57	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS						515,91				107,39	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Tabela APC.18 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC70CV10

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ³
TRAÇO – FC70CV10P					Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	539,93
			Mat.	M.O.	Custo material	Custo M.O.
CPV-ARI	97	kg	0,6	-	58,20	-
FC	283	kg	0,05	-	14,15	-
CV	36	kg	0,26	-	9,36	-
Areia fina	467	kg	0,05	-	23,35	-
Areia média	463	kg	0,04	-	18,52	-
Brita 0	1.125	kg	0,03	-	33,75	-
Água para concreto	104	L	0,006	-	0,62	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	14,81	kg	17,15	-	253,99	-
Servente	5,53	h	-	9,22	-	50,99
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					411,94	50,99
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	56,40
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	20,60	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					432,54	107,39

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

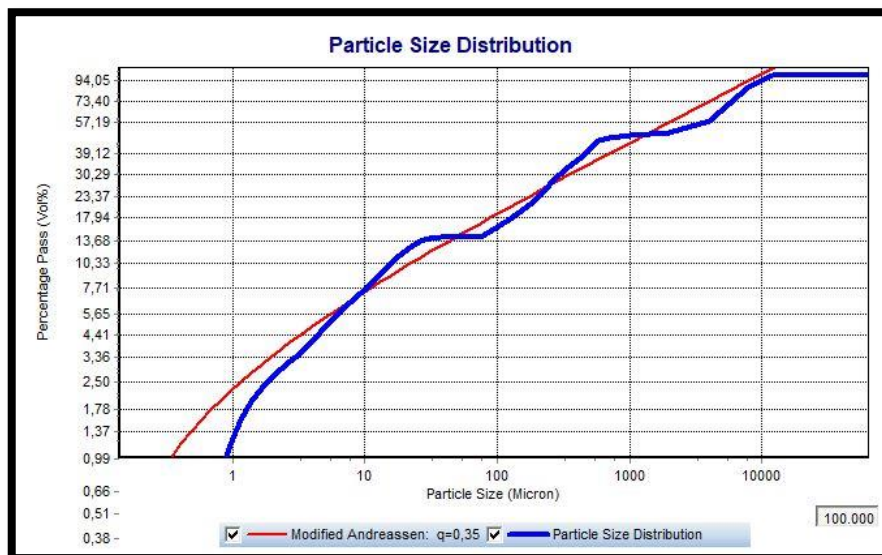
Tabela APC.19 – Composição de custo de um metro cúbico de concreto FC70CV10CH10

COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO					Unidade	m ³
TRAÇO – FC70CV10CH10					Data	12/2020
Discriminação	Coeficiente	Unidade	Preço unitário		Total (R\$)	570,80
			Mat.	M.O.	Custo material	Custo M.O.
CPV-ARI	97	kg	0,6	-	58,20	-
FC	283	kg	0,05	-	14,15	-
CV	36	kg	0,26	-	9,36	-
CH	42	kg	0,70	-	29,40	-
Areia fina	467	kg	0,05	-	23,35	-
Areia média	463	kg	0,04	-	18,52	-
Brita 0	1.125	kg	0,03	-	33,75	-
Água para concreto	104	L	0,006	-	0,62	-
Hiperplastificante Master Glenium 54	14,81	kg	17,15	-	253,99	-
Servente	5,53	h	-	9,22	-	50,99
TOTAL SEM ENCARGOS SOCIAIS					441,34	50,99
Leis sociais	110,61	%	-	-	-	56,40
Ferramentas e equipamentos	5	%	-	-	22,07	-
TOTAL COM ENCARGOS SOCIAIS					463,41	107,39

Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

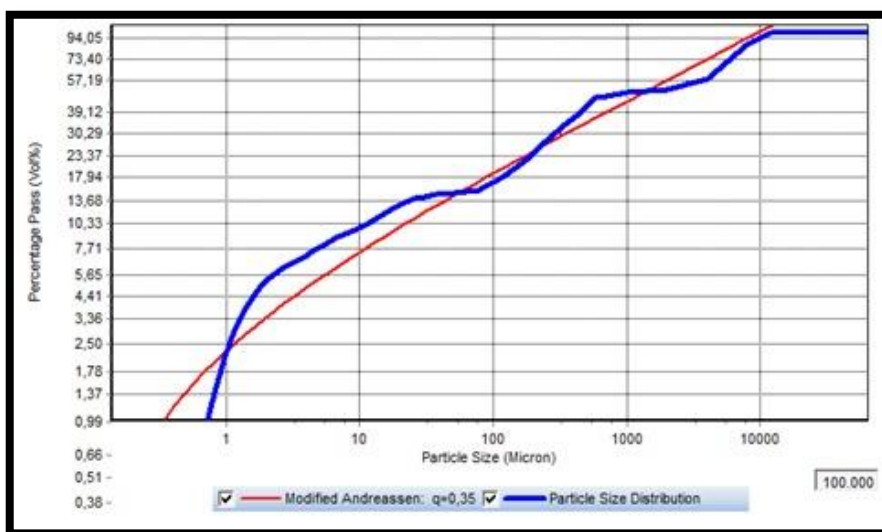
APÊNDICE D – CURVAS DE EMPACOTAMENTO (EMMA)

Figura APD.1 – Curva de empacotamento para a mistura REF



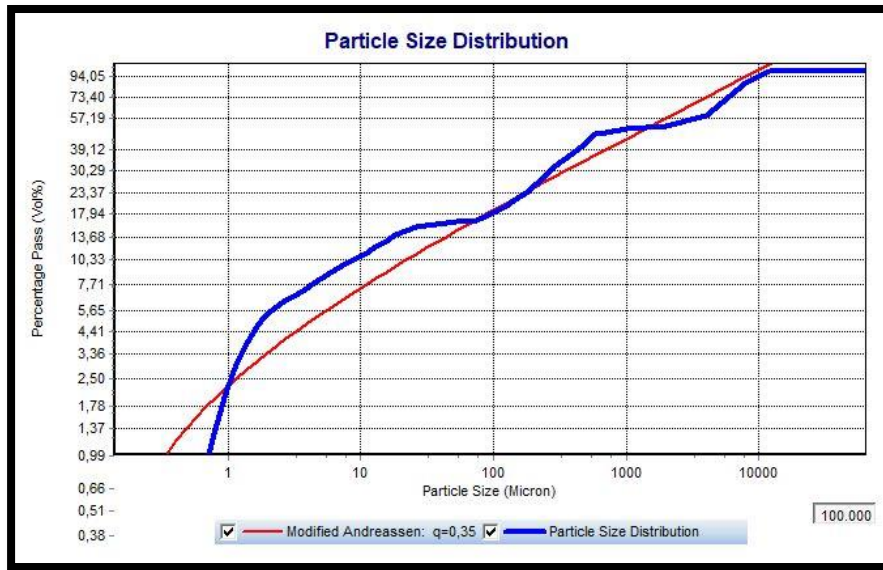
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APD.2 – Curva de empacotamento para a mistura FC60e FC60P



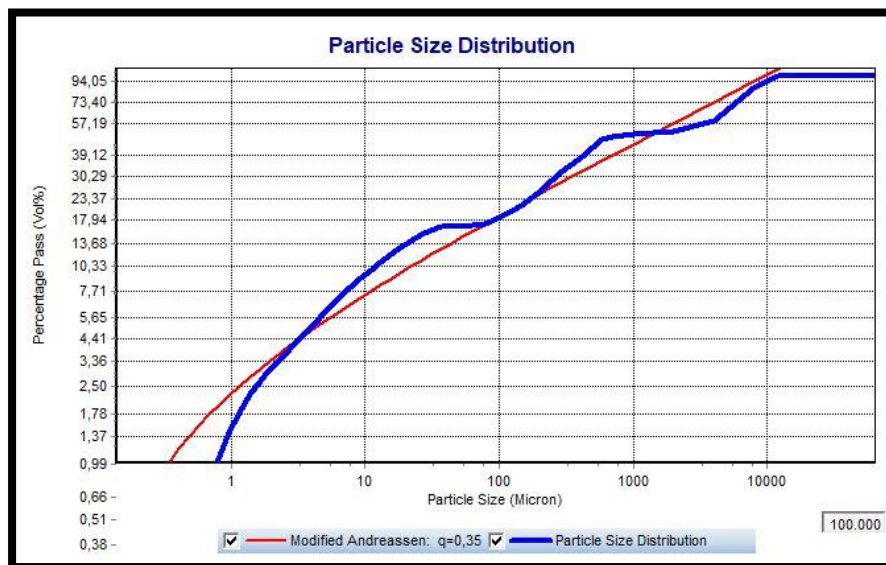
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APD.3 – Curva de empacotamento para a mistura FC60CH10



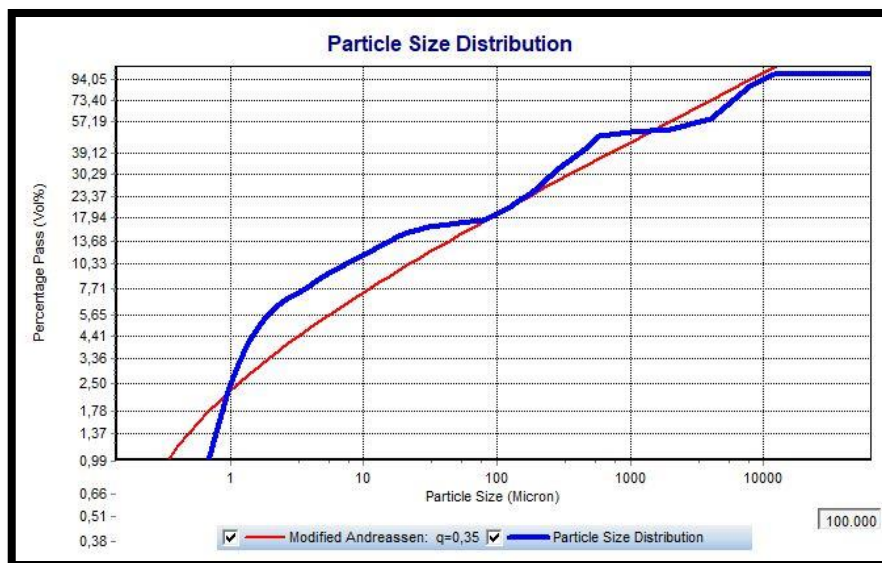
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APD.4 – Curva de empacotamento para a mistura FC70CV10 e FC70CV10P



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

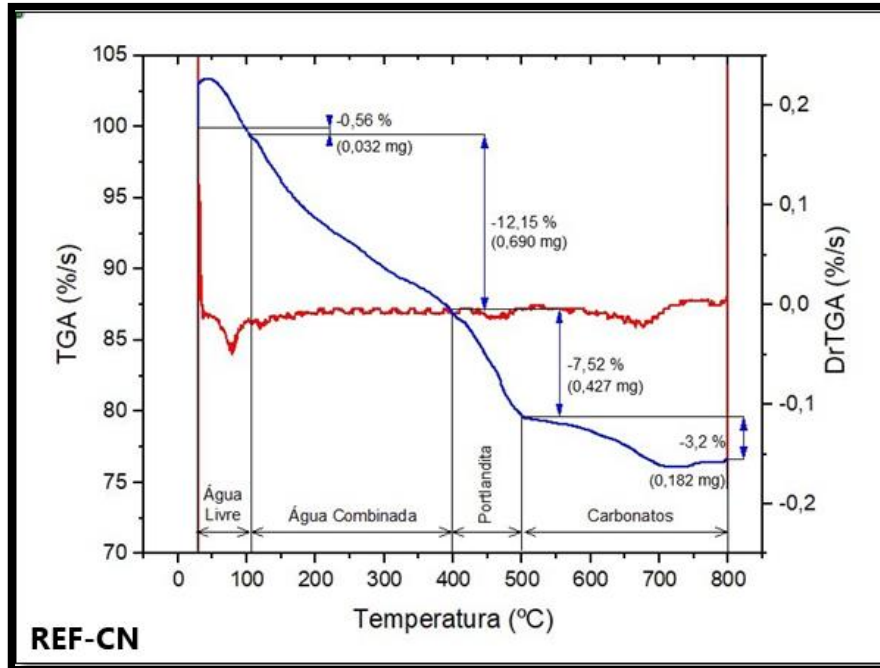
Figura APD.5 – Curva de empacotamento para a mistura FC70CV10CH10



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

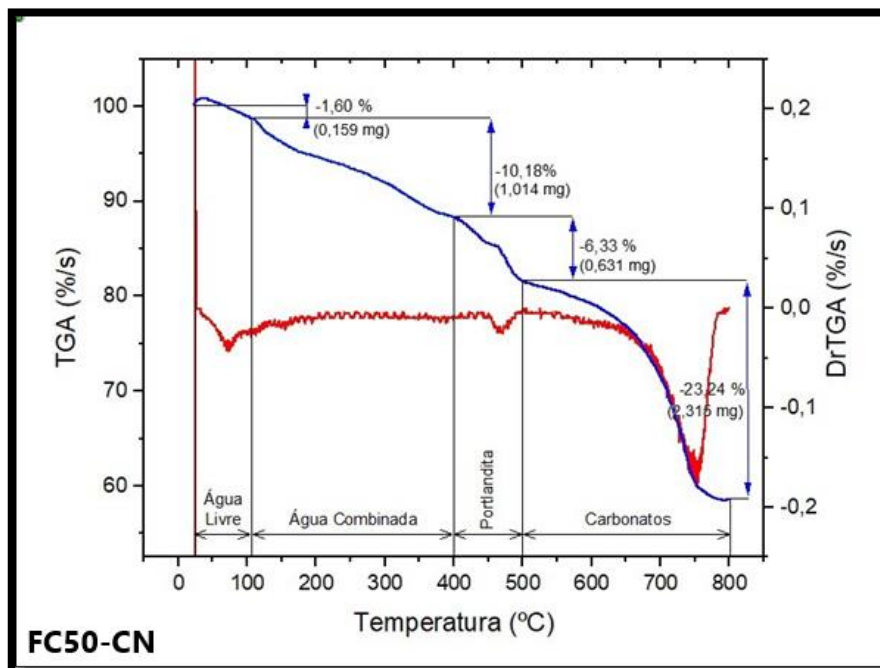
APÊNDICE E – GRÁFICOS TG/DTG

Figura APE.1 – TG/DTG para o traço REF-CN



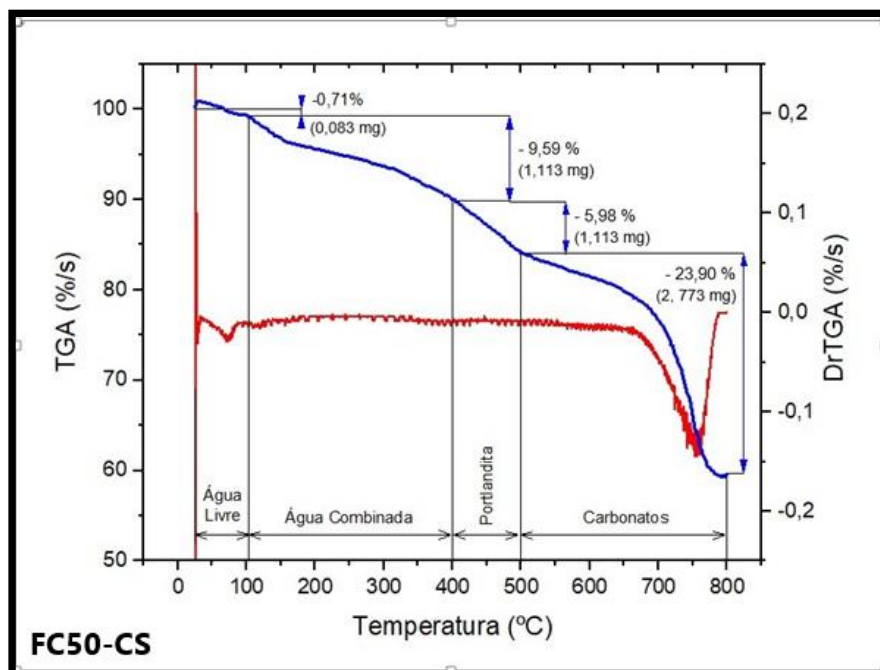
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.2 – TG/DTG para o traço FC50-CN



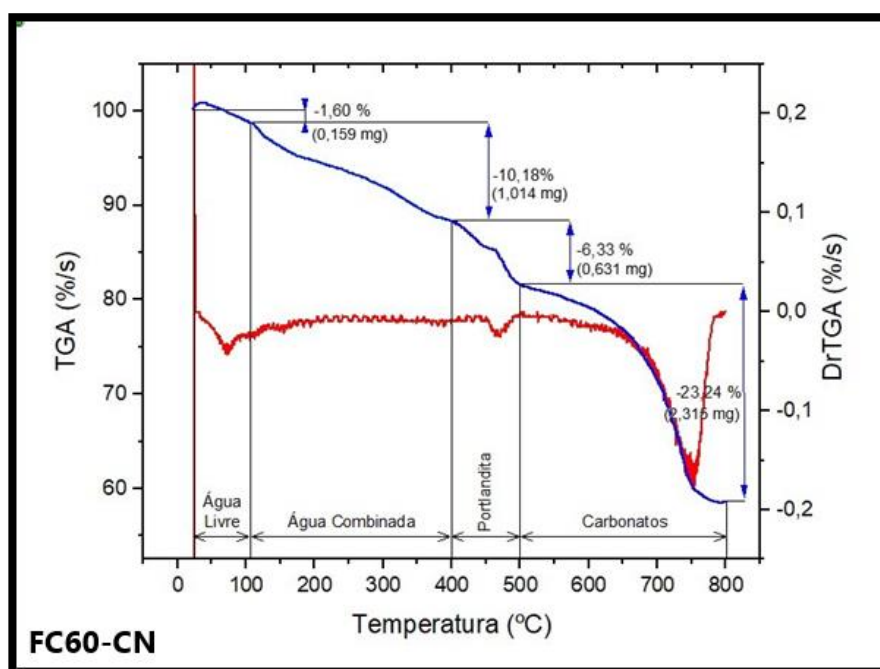
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.3 – TG/DTG para o traço FC50-CS



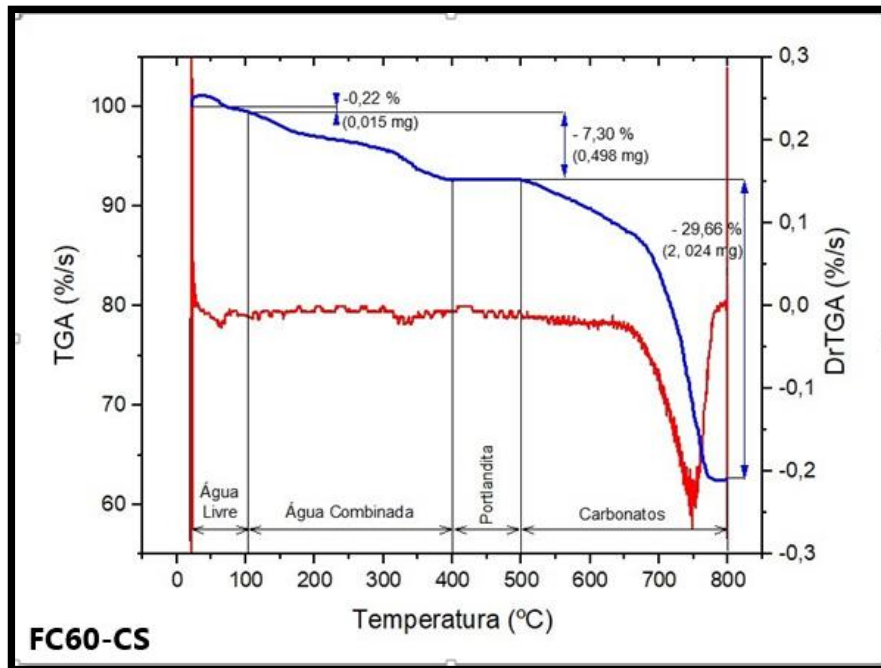
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.4 – TG/DTG para o traço FC60-CN



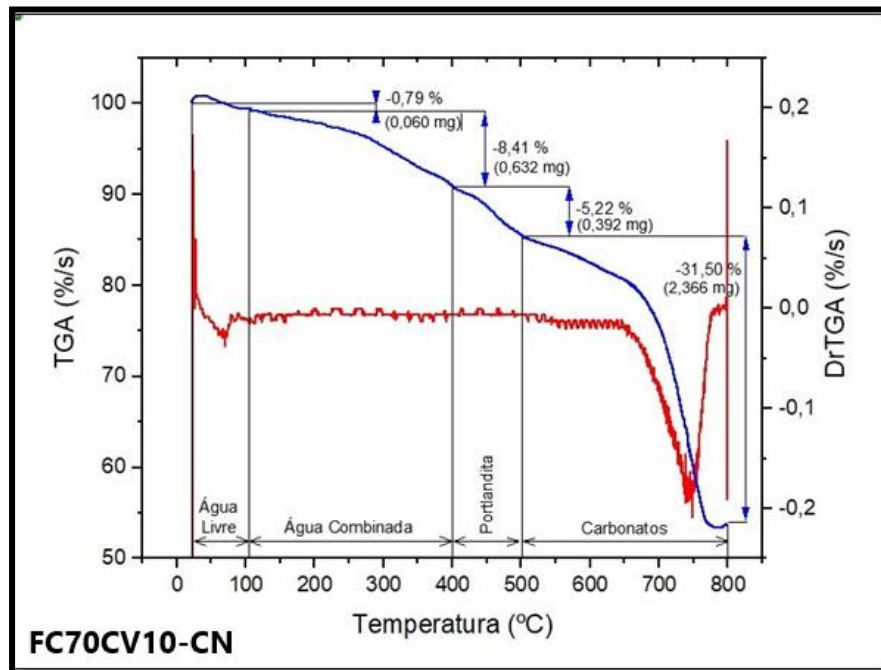
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.5 – TG/DTG para o traço FC60-CS



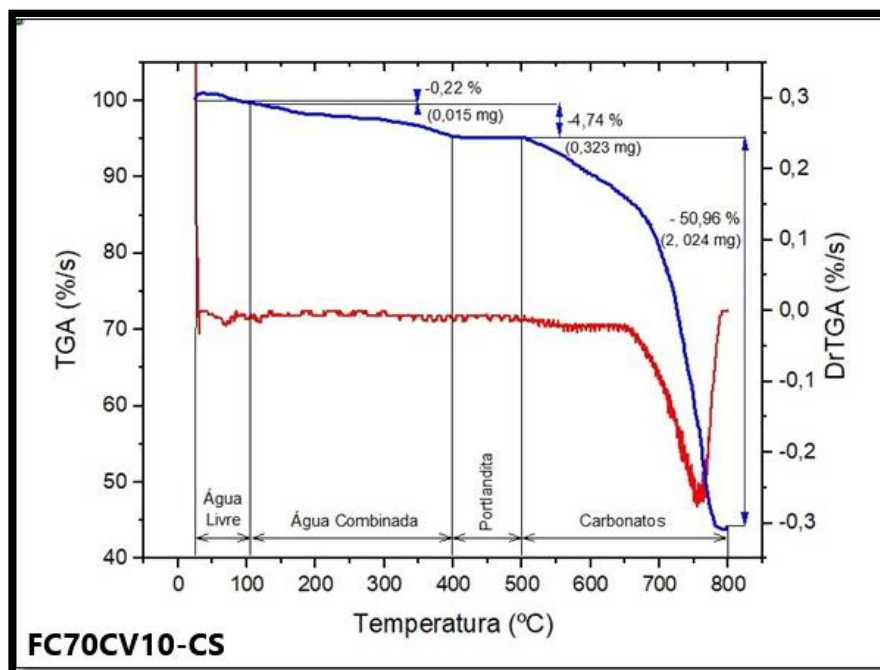
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.6 – TG/DTG para o traço FC70CV10-CN



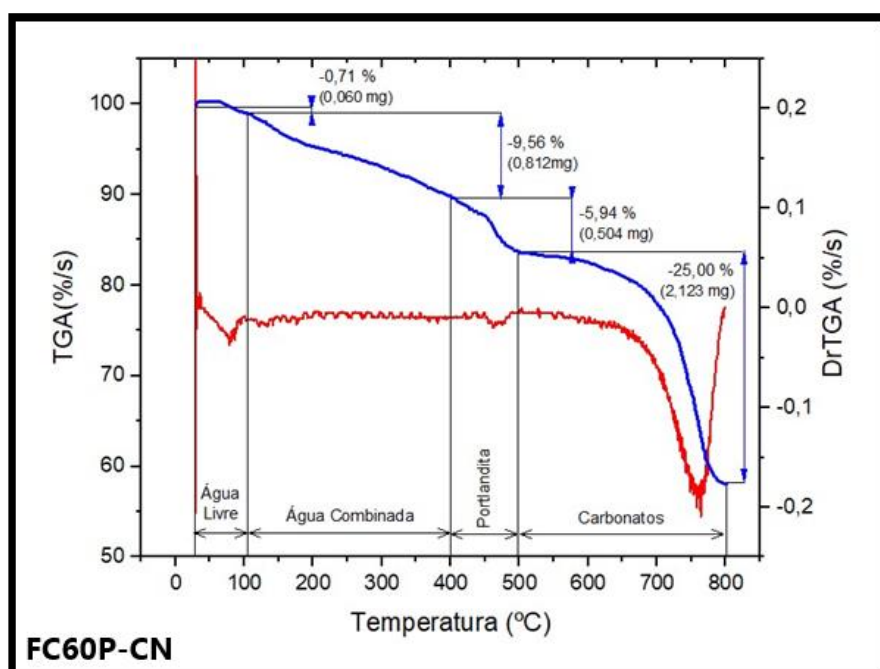
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.7 – TG/DTG para o traço FC70CV10-CS



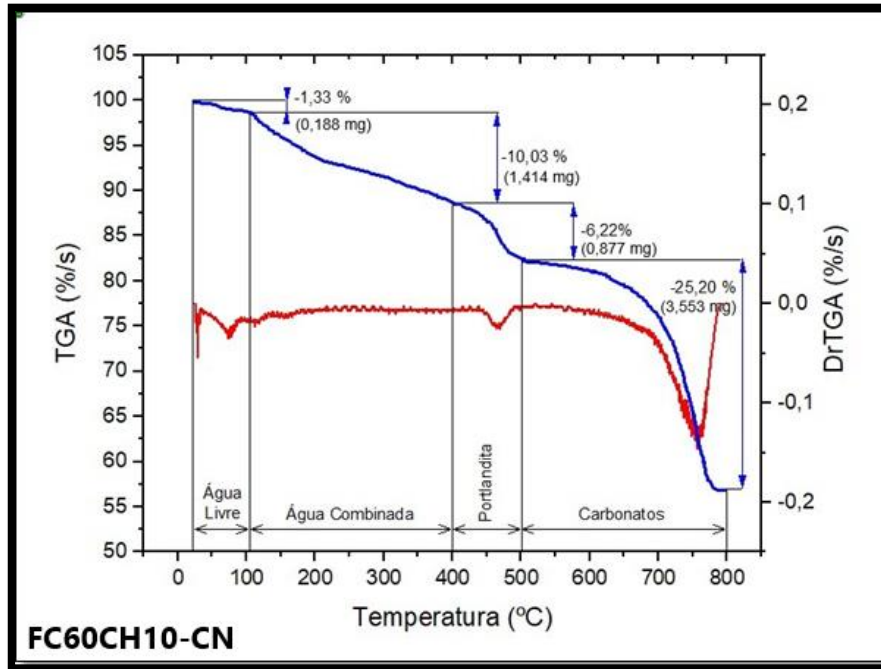
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.8 – TG/DTG para o traço FC60P-CN



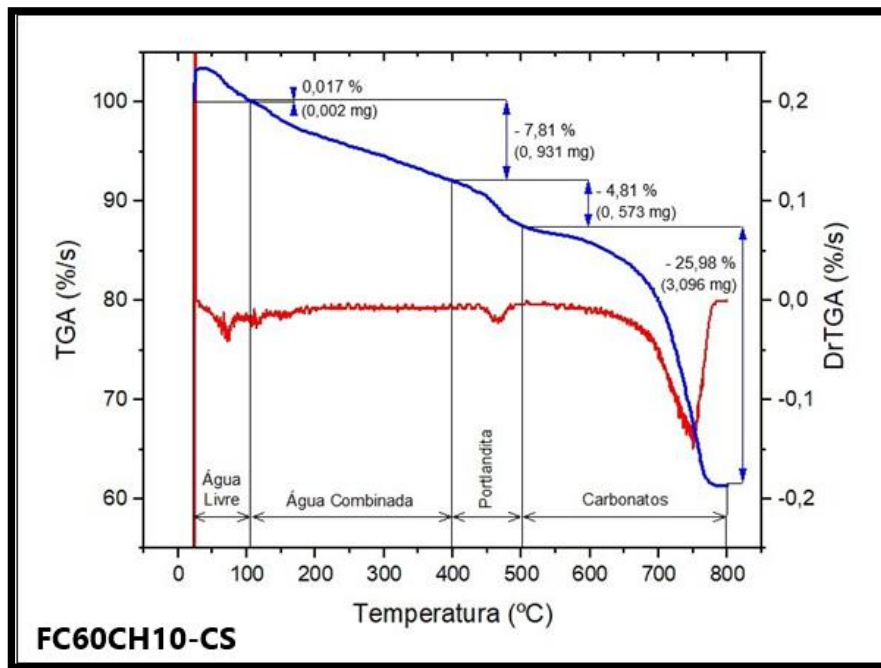
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.9 – TG/DTG para o traço FC60CH10-CN



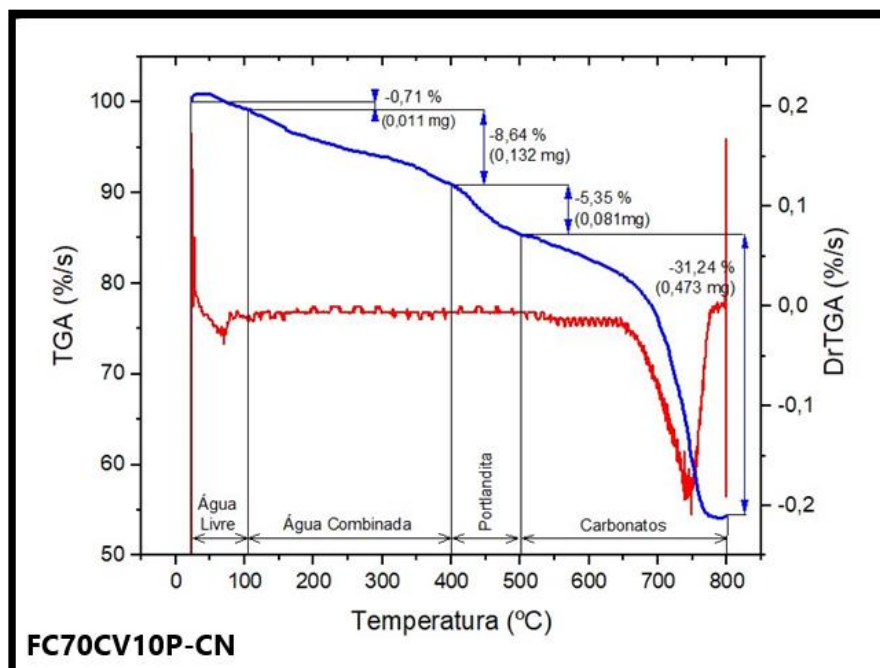
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.10 – TG/DTG para o traço FC60CH10-CS



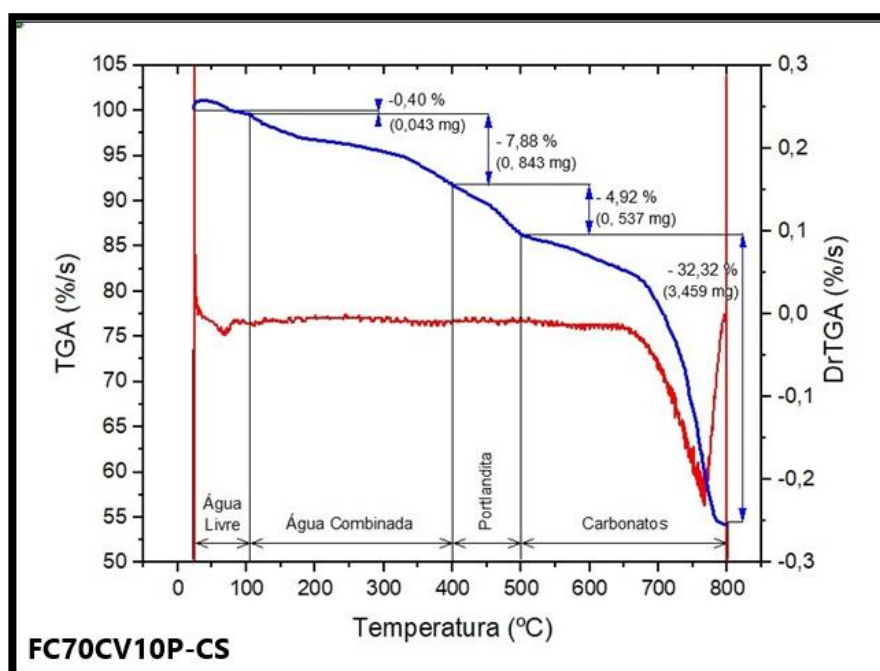
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.11 – TG/DTG para o traço FC70CV10P-CN



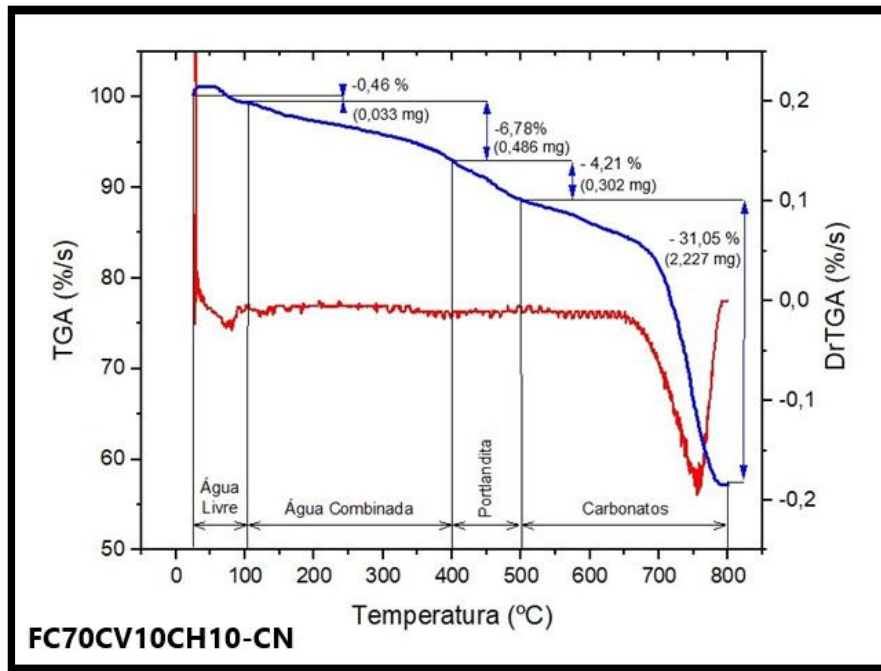
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.12 – TG/DTG para o traço FC70CV10P-CS



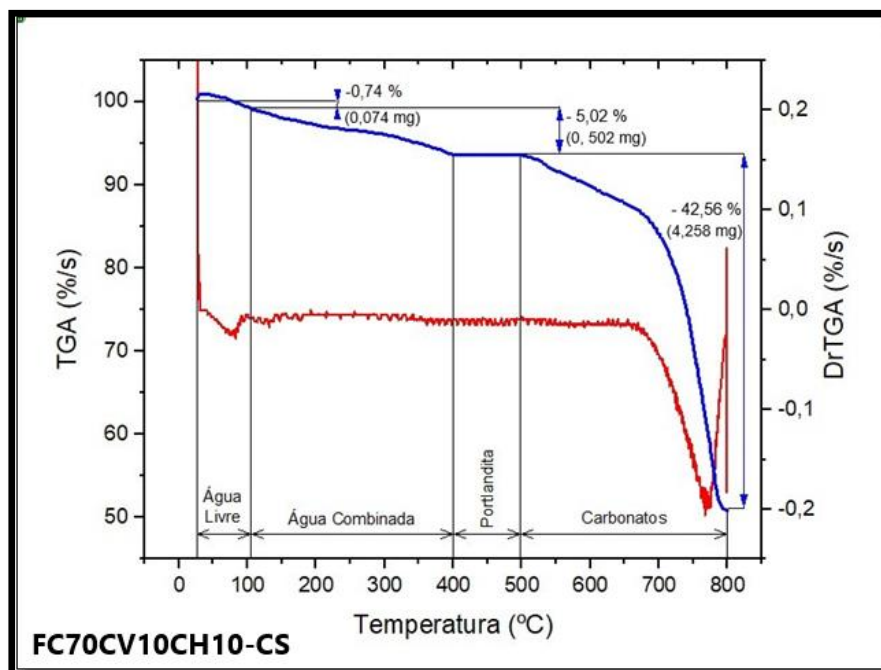
Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.13 – TG/DTG para o traço FC70CV10CH10-CN



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

Figura APE.14 – TG/DTG para o traço FC70CV10CH10-CS



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021).

ANEXO

ANEXO A – INVENTÁRIO DE EMISSÕES

Tabela ANA.1 – Inventário de emissões (MCC)

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60CH10	FC70CV10	FC70CV10CH10
1	1-Butanol	Ar	ng	1,27	1,06	1,07	1,08	1,03	1,03
2	1-Butanol	Água	µg	109	91	92,3	92,3	89,6	89,6
3	1-Pentanol	Ar	ng	5,45	5,06	5	5,58	4,47	5,05
4	1-Pentanol	Água	ng	13,1	12,1	12	13,4	10,7	12,1
5	1-Pentene	Ar	ng	4,12	3,82	3,78	4,21	3,38	3,81
6	1-Pentene	Água	ng	9,88	9,17	9,07	10,1	8,1	9,15
7	1-Propanol	Ar	ng	190	163	164	168	156	160
8	1-Propanol	Água	ng	18,6	17,1	17	18,8	15,2	17,1
9	1,4-Butanediol	Ar	ng	346	290	294	294	285	285
10	1,4-Butanediol	Água	ng	138	116	117	118	114	114
11	2-Aminopropanol	Ar	pg	129	111	111	115	104	108
12	2-Aminopropanol	Água	pg	321	274	275	285	258	268
13	2-Butene, 2-methyl-2-	Ar	pg	0,913	0,847	0,838	0,935	0,749	0,846
14	Chloroacetophenone	Ar	pg	189	189	189	189	189	189
15	2-Hexanone	Água	µg	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5
16	2-Methyl-1-propanol	Ar	ng	9,55	8,84	8,74	9,74	7,81	8,81
17	2-Methyl-1-propanol	Água	ng	22,9	21,2	21	23,4	18,7	21,2
18	2-Methyl-2-butene	Água	pg	2,19	2,03	2,01	2,24	1,8	2,03
19	2-Nitrobenzoic acid	Ar	pg	171	141	142	143	136	137
20	2-Propanol	Ar	mg	6,45	5,41	5,48	5,48	5,32	5,32
21	2-Propanol	Água	ng	4,13	3,69	3,68	3,96	3,38	3,66
22	2,4-D	Solo	µg	1,19	0,874	0,829	0,945	0,7	0,816
23	4-Methyl-2-pentanone	Água	µg	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7
24	5-methyl Chrysene	Ar	ng	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
25	Acenaphthene	Ar	ng	67,4	56,8	54,9	55,9	50	51
26	Acenaphthene	Água	µg	5,4	3,62	3,21	4,05	2,3	3,14
27	Acenaphthylene	Ar	ng	14	14	14	14	14	14
28	Acenaphthylene	Água	ng	337	226	201	253	144	196
29	Acetaldehyde	Ar	mg	64,3	52,1	49,2	50,9	43	44,7
30	Acetaldehyde	Água	µg	199	167	169	169	164	164
31	Acetic acid	Ar	mg	58,8	45,6	44,3	45,5	39,6	40,8

Fonte: SimaPro (2020a).

Tabela ANA.2 – Inventário de emissões (PEC)

N°	Substância	Compartimento	Unidade	REF	FC50	FC60	FC60CH10	FC60P	FC70CV10P
1	1-Butanol	Ar	ng	43,2	26,7	29	26,7	30,4	33,4
2	1-Butanol	Água	µg	169	105	116	105	233	257
3	1-Pentanol	Ar	ng	23,1	14,3	15,6	14,4	16,4	18
4	1-Pentanol	Água	ng	55,3	34,4	37,5	34,5	39,4	43,1
5	1-Pentene	Ar	ng	17,4	10,8	11,8	10,9	12,4	13,6
6	1-Pentene	Água	ng	41,8	26	28,3	26,1	29,8	32,6
7	1-Propanol	Ar	µg	9,3	5,35	5,72	5,35	3,11	3,01
8	1-Propanol	Água	ng	500	309	336	310	340	373
9	1,4-Butanediol	Ar	ng	670	414	455	414	825	908
10	1,4-Butanediol	Água	ng	268	165	182	166	330	363
11	2-Aminopropano 1	Ar	ng	34,7	21,5	23,3	21,5	23,5	25,7
12	2-Aminopropano 1	Água	ng	87,3	54	58,7	54	59	64,7
13	2-Butene, 2- methyl- 2-	Ar	pg	3,87	2,4	2,62	2,41	2,75	3,01
14	Chloroacetoph enone	Ar	ng	1,87	1,23	1,38	1,23	0,523	0,633
15	2-Hexanone	Água	µg	578	380	427	380	162	196
16	2-Methyl-1- propanol	Ar	ng	75,2	46,6	50,8	46,7	52,3	57,4
17	2-Methyl-1- propanol	Água	ng	180	112	122	112	126	138
18	2-Methyl-2- butene	Água	pg	9,28	5,76	6,29	5,79	6,61	7,23
19	2-Nitrobenzoic acid	Ar	ng	62,7	38,7	42,1	38,7	42,3	46,4
20	2-Propanol	Ar	mg	9,92	6,14	6,77	6,15	13,8	15,2
21	2-Propanol	Água	ng	252	156	169	156	170	187
22	2,4-D	Solo	µg	4,39	2,78	3,11	2,83	4,23	4,65
23	4-Methyl-2- pentanone	Água	µg	372	245	275	245	104	126
24	5-methyl Chrysene	Ar	ng	12,2	8,02	9,01	8,02	3,41	4,13
25	Acenaphthene	Ar	ng	337	219	245	218	141	163
26	Acenaphthene	Água	µg	2,74	1,57	1,69	1,63	2,72	2,85
27	Acenaphthylen e	Ar	ng	139	91,1	102	91,1	38,7	46,9
28	Acenaphthylen e	Água	ng	171	97,9	106	102	170	178
29	Acetaldehyde	Ar	mg	168	115	133	115	138	160
30	Acetaldehyde	Água	µg	334	206	227	206	443	487
31	Acetic acid	Ar	g	0,128	0,078 7	0,086 2	0,0787	8,54	9,36

Fonte: SimaPro (2020b)