

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

Diego da Luz Adorna

**CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
CINZAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Santa Maria, RS
2016**

Diego da Luz Adorna

**CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CINZAS
DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof.Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS
2016**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

da Luz Adorna, Diego
Carbonatação acelerada em concretos com adição de
cinzas de lodo de estação de tratamento de água / Diego
da Luz Adorna.- 2016.
143 p. ; 30 cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2016

1. Carbonatação acelerada 2. Concreto 3. Estação de
tratamento de água 4. Adições minerais I. Guerra
Gastaldini, Antônio Luiz II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Diego da Luz Adorna. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: eng.diegoadorna@gmail.com

Diego da Luz Adorna

**CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CINZAS
DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 14 de julho de 2016:

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)

Eduvaldo Paulo Sichieri, Dr. (USP)

**Santa Maria, RS
2016**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Ilce e Antonio, e à minha irmã, Elisa, que me deram apoio e me ajudaram a seguir em frente nessa jornada.

Ao meu professor orientador, Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela oportunidade de realizar este mestrado, pela orientação e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores do curso de pós-graduação em engenharia civil, bem como aos professores membros da banca.

Aos colegas mestrandos, especialmente Taís e Ronei, pela ajuda e companheirismo nos momentos difíceis.

Aos bolsistas, voluntários e funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) pela colaboração nesta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico) pela estrutura e recursos financeiros disponibilizados.

Obrigado!

Diego da Luz Adorna

“Ideias e somente ideias podem iluminar a
escuridão”

(Ludwig Von Mises)

RESUMO

CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CINZAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

AUTOR: Diego da Luz Adorna

ORIENTADOR: Antônio Luiz Guerra Gastaldini

A carbonatação é um fenômeno natural às estruturas de concreto, ocorrendo pela reação entre o CO_2 , concentrado no ambiente, e o Ca(OH)_2 , presente na matriz cimentícia. A reação de carbonatação provoca a redução do pH do concreto, causando a destruição da camada passivadora, que envolve a armadura de aço, deixando esta vulnerável ao processo de corrosão. Nesta pesquisa, foi investigado o desempenho, frente à carbonatação, de concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em substituição ao cimento Portland, bem como uma mistura de referência, sem adições minerais. Todas as misturas foram moldadas com três relações a/agl (0,35; 0,50 e 0,65) e com dois períodos de cura úmida (três e sete dias). Os corpos-de-prova de concreto foram submetidos à um pré-condicionamento, conforme procedimentos sugeridos pela norma RILEM TC 116-PCD, visando o equilíbrio de umidade ($75\% \pm 2\%$) em um ambiente aéreo com temperatura constante ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) e distribuição uniforme de umidade. Posteriormente os corpos-de-prova foram encaminhados para uma câmara de carbonatação, com umidade ($75\% \pm 2\%$), temperatura ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) e concentração de CO_2 (3%) devidamente reguladas. Os corpos-de-prova foram ensaiados após 4, 8, 12 e 16 semanas de exposição ao CO_2 , por meio de aspersão de fenolftaleína, sendo obtidas as profundidades de carbonatação e, com isso, os coeficientes de carbonatação. Os resultados demonstraram que a incorporação de cinzas de lodo de estação de tratamento de água ao concreto acarreta no aumento da carbonatação nos mesmos, para todas as misturas investigadas. Comparações com resultados de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio e Termogravimetria permitiram atribuir este efeito às alterações microestruturais e a diminuição da reserva alcalina das misturas com adição de cinzas de lodo. Através de uma análise em igualdade de resistência, constatou-se que os concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água são viáveis, do ponto de vista da vida útil frente à carbonatação, apenas para níveis de resistência mecânica mais altos.

Palavras-chave: Concreto. Lodo de estação de tratamento de água. Adições minerais. Carbonatação.

ABSTRACT

ACCELERATED CARBONATION IN CONCRETE WITH ADDITION OF WATER TREATMENT PLANT SLUDGE ASHES

AUTHOR: Diego da Luz Adorna

ADVISOR: Antonio Luiz Guerra Gastaldini

Carbonation is a natural phenomenon for concrete structures and occurs due to the reaction between CO₂, which is concentrated in the environment, and Ca(OH)₂, which is present in the cementitious matrix. Carbonation reaction reduces the pH of the concrete and causes the destruction of the passivation layer, which surrounds the steel armor, leaving it vulnerable to the process of corrosion. In this study, was investigated the performance against the carbonation of concrete with the addition of water treatment plant sludge ashes, in concentrations of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% replacing Portland cement, as well as a reference blend without mineral admixtures. All mixtures were molded with three w/b ratios (0.35; 0.50 and 0.65) and with two periods of wet cure (three and seven days). Concrete specimens underwent preconditioning according to RILEM TC 116-PCD, targeting the moisture balance (75% ± 2%) in an aerial environment with constant temperature (23° C ± 2° C) and uniform moisture distribution. Afterwards, specimens were forwarded to a carbonation chamber, with humidity (75 ± 2%), temperature (23°C ± 2° C) and CO₂ concentration (3%) duly regulated. Specimens were tested after 4, 8, 12 and 16 weeks of CO₂ exposure through phenolphthalein spraying, the depths of carbonation is obtained and, therefore, the carbonation coefficients. Results revealed that the incorporation of water treatment plant sludge ashes into concrete leads to increases in its carbonation, in all mixtures investigated. Comparisons with the results for Porosimetry by Mercury Intrusion and Thermogravimetry enable attribute this effect to the microstructural change and decrease of alkalinity of the mixture with addition of sludge ash. Through an analysis of equal resistance, it was found that concrete with addition of sludge ash water treatment are feasible, from the point of view of carbonation's lifespan, only to higher strength levels.

Key words: Concrete. Water treatment plant sludge. Mineral additions. Carbonation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cadeia de processos de uma ETA com tratamento convencional	28
Figura 2 – Esquema de classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10.004	30
Figura 3 – Comparação de volume dos produtos de oxidação do ferro	38
Figura 4 – Etapas do processo de corrosão	40
Figura 5 – Representação de uma pilha de corrosão	41
Figura 6 – Avanço do processo de carbonatação	47
Figura 7 – Fatores que influem na carbonatação	53
Figura 8 – Influência da umidade relativa na carbonatação	55
Figura 9 – Influencia da temperatura na carbonatação	56
Figura 10 – Coeficiente de carbonatação x relação a/agl	57
Figura 11 – Comparação entre dois períodos de cura	59
Figura 12 – Influência da cura em concretos com adição de escória de alto-forno	60
Figura 13 – Coeficiente de carbonatação x teor de cinza volante	63
Figura 14 – Distribuição granulométrica a laser do cimento Portland	71
Figura 15 – Difratoograma de raios-X do cimento Portland	73
Figura 16 – Difratoograma de raios-X da CLETA	73
Figura 17 – Curva granulométrica do agregado miúdo e graúdo	75
Figura 18 – Etapas e prazos do pré-condicionamento	79
Figura 19 – Determinação do coeficiente de carbonatação	85
Figura 20 – Profundidade de carbonatação VS período de exposição, para a mistura 30L	85
Figura 21 – Variação da profundidade de carbonatação, para a mistura 30L	86
Figura 22 – Profundidade de carbonatação VS relação a/agl das amostras com período de exposição de 16 semanas	87
Figura 23 – Coeficiente de carbonatação VS relação a/agl das amostras com período de exposição de 16 semanas	88
Figura 24 – Variação da profundidade de carbonatação, quando a relação a/agl passa de 0,65 para 0,50	89
Figura 25 – Variação da profundidade de carbonatação, quando a relação a/agl passa de 0,50 para 0,35	90
Figura 26 – Profundidades de carbonatação VS teor de CLETA, para o período de exposição de 16 semanas	92
Figura 27 – Coeficiente de carbonatação VS teor de CLETA	92
Figura 28 – Variação das profundidades de carbonatação em relação aos valores obtidos após 4 semanas de exposição, para concretos com relação a/agl de 0,50	94
Figura 29 – Variação das profundidades de carbonatação em relação aos valores obtidos após 4 semanas de exposição, para concretos com relação a/agl de 0,65	95
Figura 30 – Profundidades de carbonatação em função do período de cura, para as amostras com 16 semanas de exposição	97
Figura 31 – Coeficientes de carbonatação em função do período de cura	97
Figura 32 – Variação a) da área dos poros e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA	99
Figura 33 – Variação a) da área de poroso e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA	100

Figura 34 – Variação a) do diâmetro crítico dos poros e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA	100
Figura 35 – Variação a) do diâmetro crítico dos poros e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA	100
Figura 36 – Volume dos poros para diferentes faixas de distribuição de tamanho	102
Figura 37 – Variação a) do teor de CH e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA	104
Figura 38 – Variação a) do teor de CH e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA	104
Figura 39 – Relação entre a variação do teor de CH e das profundidades de carbonatação	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental	36
Tabela 2 – Fatores que influem na corrosão das armaduras das estruturas de concreto	38
Tabela 3 – Proporção de cimento Portland e CLETA em cada mistura testada	70
Tabela 4 – Características mecânicas do cimento	72
Tabela 5 – Características físicas do cimento e da CLETA	72
Tabela 6 – Composição química do cimento e da CLETA	72
Tabela 7 – Características físicas dos agregados	74
Tabela 8 – Consumo de materiais por m ³ de concreto	76
Tabela 9 – Características referentes à moldagem dos corpos-de-prova	77
Tabela 10 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira	77
Tabela 11 – Profundidades e coeficientes de carbonatação	84
Tabela 12 – Coeficientes C, D e r ² , obtidos a partir das profundidades de carbonatação com 4 semanas de exposição	107
Tabela 13 – Coeficientes C, D e r ² , obtidos a partir dos coeficientes de carbonatação com 12 semanas de exposição	107
Tabela 14 – Coeficientes C, D e r ² , obtidos a partir dos coeficientes de carbonatação	108
Tabela 15 – Profundidades e coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência (28 dias)	109
Tabela 16 – Profundidades e coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência (91 dias)	110
Tabela 17 – Tempo necessário para cada mistura atingir uma profundidade de carbonatação de 25 mm	112

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	42
Equação 2	42
Equação 3	42
Equação 4	42
Equação 5	45
Equação 6	46
Equação 7	46
Equação 8	46
Equação 9	46
Equação 10	47
Equação 11	47
Equação 12	51
Equação 13	61
Equação 14	61
Equação 15	67
Equação 16	80
Equação 17	80
Equação 18	80
Equação 19	80
Equação 20	81
Equação 21	81
Equação 22	81
Equação 23	81
Equação 24	81
Equação 25	106
Equação 26	106
Equação 27	108

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl – Relação água/aglomerante em massa
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI – Alta Resistência Inicial
C/S – Relação cálcio/silica
CLETA – Cinzas de Lodo de Estação de Tratamento de Água
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN – Companhia Riograndense de Abastecimento
CT – Centro de Tecnologia
CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico
CP – Cimento Portland
CPV – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DTA – Análise Térmica Diferencial (Differential Thermal Analysis)
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
GEPECON – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR – Norma Brasileira
PIM – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PVC – Policloreto de vinila
RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Echerces sur lês Matériau et lês Construtions
RS – Rio Grande do Sul
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
TG - Termogravimetria
UFMS – Universidade Federal de Santa Maria
UR – Umidade relativa
w/b – water/binder
XRD – Análise de Difração de Raios-X (X -Ray Diffraction)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – Sulfato de alumínio
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
 C_2S – Silicato bicálcico
 C_3A – Aluminato tricálcico
 C_3S – Silicato tricálcico
 $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ – Silicato de cálcio hidratado
 C_4AF – Ferroaluminato tetracálcico
 Ca^{2+} – Íons cálcio
 CaCO_3 – Carbonato de cálcio
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio
CaO – Óxido de cálcio
CH – Hidróxido de cálcio
 Cl^- – Íons cloreto
 CO_2 – Dióxido de carbono
CT – Centro de Tecnologia
 f_{cj} – Resistência média do concreto
 f_{ck} – Resistência característica do concreto
 Fe^{++} – Cátions de Ferro
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro
H/S – Relação água/sílica
 H_2CO_3 – Ácido carbônico
 H_2S – Gás sulfídrico
 k_c – Coeficiente de carbonatação
KOH – Hidróxido de potássio
 K_2O – Óxido de potássio
MgO – Óxido de magnésio
NaOH – Hidróxido de sódio
 Na_2O – Óxido de sódio
 NH_4^+ – Cátion amônio
 NO_3^- – Nitritos
OH – Hidroxila
 OH^- – Íons hidróxido
 P_2O_5 – Pentóxido de fósforo
pH – Potencial de Hidrogênio
RS – Rio Grande do Sul
 S^- – Íons sulfeto
sd – Desvio-padrão da dosagem
 SiO_2 – Dióxido de silício
 SO_2 – Dióxido de enxofre
 SO_3 – Óxido de enxofre
 TiO_2 – Dióxido de titânio
x – Relação água/aglomerante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	DEFINIÇÃO TEMÁTICA	21
1.1.1	Apresentação do tema	21
1.1.2	Justificativa	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2	ADIÇÕES MINERAIS	25
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	27
2.3	DISPOSIÇÃO DO LODO DE ETA	30
3	ASPECTOS DE DURABILIDADE E CORROSÃO DAS ARMADURAS	35
3.1	ASPECTOS DE DURABILIDADE	35
3.2	CORROSÃO DAS ARMADURAS	37
3.3	MECANISMOS DE CORROSÃO	41
4	CARBONATAÇÃO	43
4.1	CONCEITUAÇÃO	43
4.2	FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS	45
4.2.1	Mecanismos de transporte de CO₂ para o interior do concreto	45
4.2.2	Mecanismos de carbonatação	46
4.3	INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA MICROESTRUTURA	48
4.3.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio	50
4.3.2	Termogravimetria	51
4.4	FATORES QUE INFLUEM NA CARBONATAÇÃO	52
4.4.1	Condições de exposição	53
4.4.1.1	<i>Concentração de CO₂</i>	53
4.4.1.2	<i>Umidade relativa do ambiente e saturação dos poros</i>	54
4.4.1.3	<i>Temperatura ambiente</i>	55
4.4.2	Características do concreto	56
4.4.2.1	<i>Relação água/aglomerante</i>	56
4.4.2.2	<i>Condições de cura</i>	58
4.4.2.3	<i>Dosagem do cimento e adições minerais</i>	61
4.4.2.4	<i>Teor de hidróxido de cálcio remanescente</i>	64
4.4.2.5	<i>Resistência à compressão</i>	65
4.5	CARBONATAÇÃO ACELERADA	66
4.5.1	Medida da profundidade de carbonatação	66
4.5.2	Determinação do coeficiente de carbonatação	67
4.5.3	Relação entre os ensaios acelerados e naturais	67
5	MATERIAIS E MÉTODOS	69
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	69
5.2	MATERIAIS	69
5.2.1	Aglomerantes	70
5.2.2	Agregados	74
5.2.3	Água	75
5.2.4	Aditivos	75
5.2.5	Gás carbônico	76

5.3	DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	76
5.4	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA	77
5.5	CARBONATAÇÃO ACELERADA	78
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	83
6.2	PROFUNDIDADES E COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO	83
6.2.1	Influência da relação a/agl	86
6.2.2	Influência do teor de adição mineral.....	89
6.2.3	Influência do período de cura.....	97
6.3	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS	98
6.3.1	Carbonatação VS Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	98
6.3.2	Carbonatação VS Termogravimetria	103
6.3.3	Análise da carbonatação em igualdade de resistência	106
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
8	ESTUDOS FUTUROS	119
	REFERÊNCIAS	121
	ANEXOS.....	133
	Anexo A – Resultados dos ensaios de Porosimetria por Intrusão de mercúrio	134
	Anexo B – Volume dos poros para diferentes faixas de distribuição de tamanho ...	135
	Anexo C – Teor de CH, obtido pelo ensaio de Termogravimetria	136
	Anexo D – Resistência à compressão	137
	Anexo E – Coeficientes A, B e r^2 , obtidos a partir dos valores de resistência à compressão aos 28 dias	138
	Anexo F – Coeficientes A, B e r^2 , obtidos a partir da resistência à compressão aos 91 dias	139

1 INTRODUÇÃO

A construção civil e o desenvolvimento socioeconômico de um país estão vinculados. Uma economia estável permite maiores investimentos em moradias, indústrias e infraestrutura. Do mesmo modo, o setor da construção civil gera um alto número de vagas de emprego, bem como afeta, direta e indiretamente, outros setores da economia.

Diversos materiais fazem parte do cotidiano da construção civil, sendo o concreto o material mais utilizado em escala global. O concreto é o produto resultante da mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo conter adições minerais e aditivos.

A grande utilização do concreto se deve, primeiramente, a facilidade de se obter a matéria-prima, que pode ser encontrada em praticamente todos os lugares do mundo. Além disso, o material apresenta características que justificam o seu emprego construção civil, como, por exemplo, versatilidade, durabilidade e desempenho, proporcionando vida útil às construções (ISAIA, 2011).

A produção em larga escala do concreto resulta, portanto, no consumo de uma grande quantidade de materiais. De acordo com dados provenientes do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), a produção de cimento Portland no Brasil, no ano de 2014, superou os 71,2 milhões de toneladas (SNIC, 2015). Os resultados preliminares indicam que, em 2015, o consumo de cimento Portland foi de 64,9 milhões de toneladas no Brasil (SNIC, 2016).

Os impactos ambientais causados pela utilização do concreto estão além do consumo de recursos naturais. A indústria de cimento, por exemplo, consome grandes quantidades de energia, bem como é responsável pela emissão de gases poluentes.

De acordo com Benhelal et al (2013) e Uwasu, Hara e Yabar (2014) o processo de fabricação do cimento é uma das principais fontes de emissão de CO₂, sendo este originado da queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis e das reações químicas de decomposição do CaCO₃, formando CaO e CO₂. A emissão de CO₂ é em torno de 800 kg para cada tonelada produzida de clínquer (MARQUES; CHASTRE; NUNES, 2013). No Brasil, em 2010, a produção de cimento foi responsável por 26,9% da emissão de gases de efeito estufa pelo setor de processos industriais (BRASIL, 2013).

Visando a redução dos impactos ambientais gerados pela produção do concreto, diversas alternativas foram implementadas ao longo das últimas décadas, como modernização da indústria de cimento, utilização de combustíveis alternativos e incorporação de adições minerais ao concreto.

Como destaca Isaia (2011) a produção em alta escala do concreto permite que pequenos ganhos unitários durante o processo produtivo resultem em uma economia significativa no consumo de matéria-prima, gastos de energia e emissões de gases poluentes.

As adições minerais são, geralmente, resíduos provenientes de outros processos industriais que, ao invés de serem descartados no meio ambiente, podendo causar algum tipo de poluição, são incorporados ao concreto. A utilização de adições minerais resulta, também, na redução do consumo de energia e diminui a emissão de CO₂ no meio ambiente, já que reduz a quantidade de clínquer a ser produzido (DAL MOLIN, 2011). De La Varga et al (2014) enfatizam a contribuição destes efeitos para a melhoria da sustentabilidade na indústria do concreto, destacando, além disso, as melhorias das propriedades que afetam a durabilidade do material.

A incorporação de adições minerais ao concreto altera as propriedades do mesmo, como tempo de início e fim de pega, comportamento diante a lixiviação e umidade, resistência à compressão e durabilidade. A qualidade final do concreto é o fator mais importante a ser considerado quando uma adição mineral é incorporada ao mesmo (USÓN et al, 2013).

Geralmente, o uso de adições minerais resulta em concretos com melhores características técnicas, devido às alterações na estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição entre matriz e agregado que causam a redução da porosidade capilar do concreto, dificultando a penetração de agentes agressivos, e na diminuição do calor de hidratação, diminuindo a incidência de fissuras de origem térmica (DAL MOLIN, 2011). A hidratação e a microestrutura são, de acordo com Mohammed, Dawson e Thom (2013), as características que mais influenciam no transporte de contaminantes e na durabilidade do concreto.

Existem diversos resíduos cujo uso como adições minerais é difundido na indústria de cimento, destacando-se a sílica ativa, a cinza volante e a escória granulada de alto-forno. Recentemente, vários outros resíduos começaram a ser estudados visando o mesmo objetivo, como as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

(HUSSEIN et al, 2014) e as cinzas de folhas de bananeira (KANNING et al, 2014). As cinzas de lodo de estação de tratamento de água (ETA) são uma opção de material a ser incorporado ao concreto.

Lodo de ETA é o nome dado ao resíduo gerado nas operações de tratamento da água, sendo constituído pelo material que se acumula nos decantadores e pela água de lavagem dos filtros (REALI, 1999).

Esse resíduo pode apresentar diferentes características, de acordo com a composição da água bruta, produtos químicos utilizados no tratamento, reações químicas ocorridas no processo, entre outras. Esses fatores podem gerar lodos potencialmente tóxicos para seres humanos, plantas e organismos aquáticos (REALI, 1999).

Por muito tempo, o descarte deste material se deu quase que exclusivamente pelo lançamento em cursos d'água, causando danos ambientais aos mesmos. A resolução n° 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005), posteriormente complementada pela resolução n° 430 (CONAMA, 2011), prescreve os padrões e condições de lançamento de efluentes em cursos d'água. Devido à grande quantidade de sólidos sedimentáveis presente no lodo de ETA, o mesmo não pode ser lançado em cursos d'água sem receber o tratamento apropriado.

Visando diminuir os impactos ambientais causados pela disposição do lodo de ETA, alternativas de descarte começaram a ser estudadas. Uma delas foi a utilização deste resíduo na produção de materiais voltados à construção civil. Estudos analisaram a viabilidade da incorporação do lodo de ETA na produção de materiais cerâmicos (TEIXEIRA et al, 2011; MARTÍNEZ-GARCÍA et al, 2012), na substituição do agregado miúdo (HOPPEN, 2005) e do cimento Portland (GASTALDINI et al, 2015) em concretos.

Como citado anteriormente, a incorporação de adições minerais ao concreto resulta em alterações na microestrutura e nas propriedades do material. Conhecer, portanto, qual o comportamento do material obtido é importante para que os critérios de segurança, desempenho e durabilidade do projeto sejam atendidos.

A durabilidade de uma estrutura de concreto armado pode ser definida, de maneira simplificada, como a capacidade que esta possui em manter, ao longo da vida útil estimada para o projeto, as suas características físicas e funcionais, sob as condições de exposições ambientais para a qual foi projetada (BOLINA et al, 2013). Köliö et al (2014) afirmam que as estruturas devem ser suficientemente duráveis,

evitando reparos desnecessários, ou seja, que não fazem parte do seu plano de manutenção, promovendo, assim, o desenvolvimento sustentável, juntamente com um custo eficiente de gerenciamento da propriedade.

Os problemas de durabilidade, de acordo com Tang et al (2015) surgem, geralmente, quando a deterioração dos materiais começa e embora não ofereçam um risco imediato à segurança, vão, de maneira progressiva, causando danos à estrutura.

Uma das principais causas de deterioração do concreto é a carbonatação, que consiste na reação entre o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, com os produtos de hidratação do cimento, tendo como produto o carbonato de cálcio (CaCO_3). A carbonatação causa uma redução da alcalinidade da matriz de cimento, causando a despassivação da armadura e abrindo caminho para que o processo de corrosão se inicie (TORGAL et al, 2012).

A carbonatação, de acordo com Torgal et al (2012), é um processo complexo, tendo sua extensão e cinética afetadas pelas características físicas da massa de concreto, como porosidade e permeabilidade, pelas condições de cura e de exposição, como a concentração de CO_2 no ambiente, umidade relativa e temperatura.

O presente trabalho faz parte de uma pesquisa mais ampla, desenvolvida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON). Hengen (2014) estudou as características do lodo de ETA, bem como a resistência à compressão de concretos com adição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA). Para as mesmas misturas de concreto, Amaral (2014) estudou a resistividade elétrica e a absorção capilar, enquanto Antolini (2015) analisou a retração e a penetração de cloretos. Stein (2016) estudou a hidratação e a microestrutura de pastas de cimento com teores de 5%, 10%, 15% e 20% de CLETA.

Este trabalho busca a complementação da pesquisa, investigando o comportamento frente à carbonatação dos concretos com adição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CLETA em substituição parcial ao cimento Portland, bem como o desempenho de uma mistura de referência, sem adição de CLETA.

1.1 DEFINIÇÃO TEMÁTICA

1.1.1 Apresentação do tema

O presente trabalho propõe a análise da carbonatação em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) em substituição parcial ao cimento Portland.

A profundidade e o coeficiente de carbonatação foram obtidos por meio de ensaios acelerados e, posteriormente, analisados a partir da relação a/agl , do teor de CLETA incorporado e do período de cura. A carbonatação foi, em seguida, comparada com os resultados dos ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio e Termogravimetria, obtidos por Stein (2016), e analisada em igualdade de resistência mecânica, a partir dos resultados obtidos por Hengen (2014).

1.1.2 Justificativa

Os impactos ambientais estão vinculados ao desenvolvimento econômico de um país. À medida que o país cresce economicamente, os impactos ambientais referentes à indústria, à agropecuária e à construção civil aumentam. No setor da construção civil, a utilização em grande escala de concreto resulta no aumento do consumo de recursos naturais, no gasto de grandes quantidades de energia e na emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO_2). Além de trazer impactos negativos para o meio ambiente, o aumento da concentração de CO_2 no ambiente traz prejuízos para as estruturas de concreto armado. A carbonatação, fenômeno resultante da reação entre o CO_2 presente no ambiente e os produtos de hidratação do cimento, afeta a matriz de concreto, causando a despassivação da armadura e deixando esta vulnerável à corrosão.

Paralelamente ao desenvolvimento econômico, ocorre o desenvolvimento social. Serviços, como o saneamento básico, tornam-se mais acessíveis à população. O maior acesso ao abastecimento de água pela população resulta na necessidade de aumentar a quantidade de água tratada e, em consequência, acarreta na geração de maiores quantidades de resíduos pelas estações de tratamento. Este resíduo, denominado lodo de ETA, precisa ser descartado apropriadamente, visando a diminuição dos impactos ambientais.

A incorporação deste material ao concreto impede que este seja descartado no ambiente e, por consequência, diminuiu os prejuízos ao mesmo. Paralelamente, a incorporação deste material em substituição ao cimento Portland reduz a queima de clínquer nas indústrias de cimento, diminuindo os gastos de energia e emissão de gases poluentes no ambiente.

A utilização das cinzas do lodo de ETA no concreto, bem como qualquer outra adição mineral, promove alterações na microestrutura e nas propriedades do material. Conhecer estas alterações é importante para analisar a viabilidade da incorporação deste material ao concreto, garantido durabilidade ao mesmo e, desta maneira, promovendo a sustentabilidade. Este trabalho se propõe, portanto, a analisar os efeitos que a incorporação de cinzas de lodo de ETA tem sobre a carbonatação do concreto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa visa analisar o comportamento de concretos de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV – ARI), com e sem adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA), frente ao fenômeno da carbonatação. Para tal, concretos com e sem adição de CLETA foram moldados e submetidos à um ensaio de carbonatação acelerada.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando o atendimento do objetivo final, esta pesquisa se propôs à:

- a) determinar a profundidade de carbonatação em concretos com substituição de cimento Portland por CLETA, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, além de uma mistura de referência, sem adição de cinzas;
- b) medir as profundidades carbonatadas e calcular os coeficientes de carbonatação para os referidos concretos;
- c) analisar a influência de três relações água/aglomerante (0,35; 0,50 e 0,65) no desenvolvimento da carbonatação dos concretos moldados;

- d) analisar a influência do teor de CLETA incorporado no desenvolvimento da carbonatação dos concretos moldados;
- e) analisar a influência de dois períodos de cura (3 e 7 dias) no desenvolvimento da carbonatação dos concretos moldados;
- f) analisar a influência da microestrutura sobre a carbonatação, por meio dos resultados do ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio, realizado por Stein (2016), em pastas de cimento com substituição de cimento Portland por CLETA, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, além de uma mistura de referência, sem adição de cinzas;
- g) analisar a influência do teor de CH sobre a carbonatação, através dos resultados do ensaio de Termogravimetria, realizado por Stein (2016), em pasta de cimento com substituição de cimento Portland por CLETA, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, além de uma mistura de referência, sem adição de cinzas;
- h) relacionar as profundidades e o coeficiente de carbonatação com a resistência à compressão (HENGGEN, 2014) de concretos com e sem adição de CLETA, nas mesmas proporções desta pesquisa.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho estrutura-se da seguinte maneira.

No capítulo 1, “Introdução”, foi discutida a incorporação de adições minerais ao concreto e qual a sua importância para amenizar os impactos ambientais da produção do mesmo, bem como suas influências na durabilidade das estruturas. Serão apresentados, também, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

No capítulo 2, “Adições minerais”, uma revisão bibliográfica acerca dos principais aspectos das adições minerais foi realizada, com ênfase no lodo de ETA, destacando suas principais características e os estudos que estão sendo realizados sobre sua aplicação como material de construção civil.

No capítulo 3, “Aspectos de durabilidade e corrosão das armaduras”, foi destacada a importância da durabilidade das estruturas de concreto armado e explicado como acontece o processo de corrosão do aço.

No capítulo 4, “Carbonatação”, o fenômeno de carbonatação foi discutido, destacando-se os mecanismos do processo, bem como os principais fatores que influenciam o mesmo.

No capítulo 5, “Materiais e métodos”, a metodologia aplicada nesta pesquisa foi apresentada, bem como as características dos materiais utilizados.

No capítulo 6, “Análise dos resultados”, os resultados obtidos através dos ensaios realizados foram debatidos e analisados, visando atender os objetivos traçados nesta pesquisa.

Por fim, no capítulo 7, “Considerações finais”, foram apresentados os resultados obtidos na pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

2 ADIÇÕES MINERAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Mehta e Monteiro (2014) definem adições minerais como materiais silicosos adicionados ao concreto, em relação a massa de material cimentante total, em proporções que variam desde 6 a 70%. Podem ser naturais, utilizadas em seu estado bruto ou submetidas à ativação térmica, ou podem ser subprodutos industriais.

As adições minerais podem ser classificadas em materiais pozolânicos, materiais cimentantes e fíler. Os materiais pozolânicos, como a cinza de casca de arroz e a cinza volante, são produtos silicosos ou silico-aluminosos que não possuem característica aglomerante, porém, após serem finamente moídos e entrarem em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando produtos com propriedades aglomerantes (NEVILLE; BROOKS, 2013). Os materiais cimentantes, como a escória granulada de alto-forno, são aqueles que formam produtos com características aglomerantes sem a necessidade de reagir com o hidróxido de cálcio, embora a quantidade destes, bem como auto-hidratação lenta, impeça que estes sejam utilizados para fins estruturais (DAL MOLIN, 2011). O fíler é um material finamente moído que melhora a hidratação do cimento Portland através da formação de pontos de nucleação (NEVILLE; BROOKS, 2013) e proporciona um melhor empacotamento granulométrico da microestrutura do concreto (DAL MOLIN, 2011).

As adições minerais, quando incorporadas ao concreto, promovem alterações químicas e físicas no mesmo. O efeito químico decorre da reação entre a adição mineral e o Ca(OH)_2 , formado durante as reações de hidratação do cimento Portland, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado adicional (DAL MOLIN, 2011). Denominada de reação pozolânica, a reação entre a pozolana e o Ca(OH)_2 se dá de maneira lenta, resultando em taxas de liberação de calor e desenvolvimento de resistência igualmente lentas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os produtos da reação pozolânica preenchem os espaços capilares, proporcionando melhoras físicas na estrutura do concreto, através do refinamento dos poros

(MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, as partículas da própria adição mineral, em função de sua finura, preenchem os vazios da estrutura de concreto, efeito denominado de microfiller (DAL MOLIN, 2011).

As alterações químicas e físicas promovidas na microestrutura do concreto resultam em benefícios para o material, destacando-se, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), a melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência final, aumento da impermeabilidade, fortalecimento da zona de transição e aumento da durabilidade em relação ao ataque por sulfatos e à expansão por reação álcali-agregado.

Zeng et al (2012) investigaram as características da estrutura de poros durante o processo de hidratação de cimentos com adição de grandes volumes de cinza volante, através dos ensaios de gravimetria, porosimetria por intrusão de mercúrio e adsorção/dessorção de nitrogênio. Os autores destacam o papel duplo exercido pela cinza volante como adição mineral ao cimento: fornecer mais pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação do cimento e formação de produtos que colmatam a estrutura de poros já existente. Ambos os mecanismos foram observados nas pastas de cimento com adição de cinza volante, especialmente na mistura com relação a/agl de 0,50. Na mistura com relação a/agl de 0,30, a formação de produtos que colmatam a rede de poros se revelou menos importante, devido ao fato de uma estrutura muito densa já ser atingida devido à baixa relação a/agl.

Além dos benefícios técnicos, a utilização de adições minerais no concreto proporciona vantagens econômicas e ambientais. Mehta e Monteiro (2014) destacam que o descarte em aterros e córregos de subprodutos industriais, provenientes de usinas elétricas e alto-fornos metalúrgicos, impacta em malefícios para o meio ambiente, além de ser um evidente desperdício de material. A utilização destes subprodutos como agregados para concreto ou como base de estradas é um desperdício do potencial pozolânico e cimentante destes materiais. Além disso, a incorporação de adições minerais ao concreto resulta na redução de matéria-prima extraída para a indústria da construção (DAL MOLIN, 2011), bem como uma considerável economia de energia e de custo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A redução do consumo de energia se dá pela diminuição das distâncias de transporte da matéria-prima e, também, pela diminuição de material a ser calcinado no processo de produção do cimento (DAL MOLIN, 2011). A redução da poluição também é uma vantagem trazida pela utilização de adições minerais, destacando-se a diminuição da emissão do gás CO₂ durante o processo de produção do cimento.

Isaia e Gastaldini (2004) estudaram, a partir do ponto de vista ambiental e econômico, concretos com altos teores de adições minerais. Os autores observaram, para uma mistura de concreto com adição de 70% de escória e 20% de cinza volante, uma redução de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂ e um aumento de 34% no índice de durabilidade em relação ao concreto de referência (sem adições minerais).

Ao longo dos anos, a incorporação de diferentes materiais ao concreto vem sendo estudada, visando alcançar as vantagens citadas anteriormente. Um destes materiais é a cinza do lodo de estação de tratamento de água.

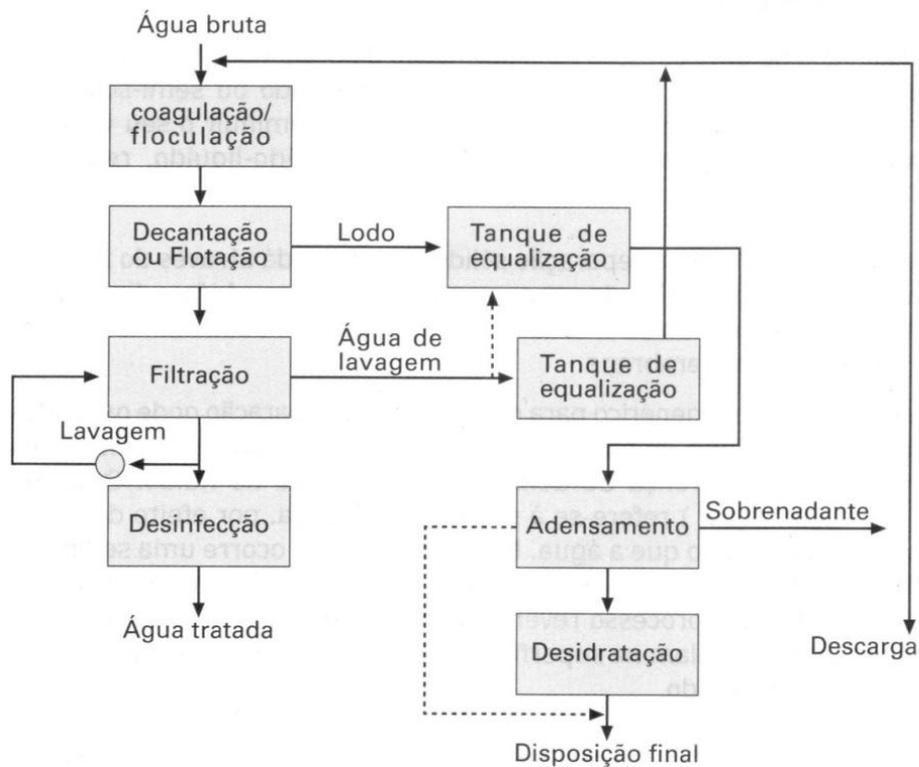
2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento da água para o abastecimento público é composto de diversas operações e processos unitários, os quais visam à adequação da água de diferentes mananciais aos padrões de qualidade definidos pelos órgãos de saúde e agências reguladoras (CEBALLOS; DANIEL; BASTOS, 2009). O conjunto de unidades que realizam a adequação da qualidade da água é denominado Estação de Tratamento de Água (ETA), como definido pela NBR 12.216 (ABNT, 1992).

As etapas do processo de tratamento, bem como os produtos químicos a serem utilizados, dependem das condições da água bruta, ou seja, da água captada no meio ambiente.

A figura 1 representa a cadeia de processos de uma ETA com tratamento completo ou convencional, ou seja, uma estação constituída pelos processos de: coagulação/floculação, decantação, filtração e desinfecção (CORDEIRO, 1999).

Figura 1 – Cadeia de processos de uma ETA com tratamento convencional



Fonte: RICHTER (2001).

Como demonstrado na figura acima, o lodo de ETA é formado pelo produto resultante da coagulação da água bruta, que é aquela captada no manancial e encaminhada para tratamento, e pela água resultante da lavagem dos filtros (RICHTER, 2001).

A coagulação consiste na aplicação de produtos químicos, chamados coagulantes, com o objetivo de causar a precipitação de compostos em solução e a desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas. Os coagulantes mais comuns, de acordo com Richter (2009) são os sais de alumínio ou de ferro, sendo o sulfato de alumínio - $Al_2(SO_4)_3$ – o coagulante mais utilizado.

A quantidade do lodo gerado depende da sua origem e da técnica utilizada para sua remoção. No caso de uma ETA de ciclo completo, o volume médio diário de resíduos produzidos, provenientes dos decantadores, varia de 0,1 a 3,0% do volume médio de água tratada diariamente (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

O lodo gerado apresenta-se sob forma fluída, com umidade acima de 95%, necessitando, portando, sofrer uma desidratação, visando a redução do volume, facilitando o transporte, disposição final e reduzindo os riscos de impacto ambiental (CORDEIRO, 1999).

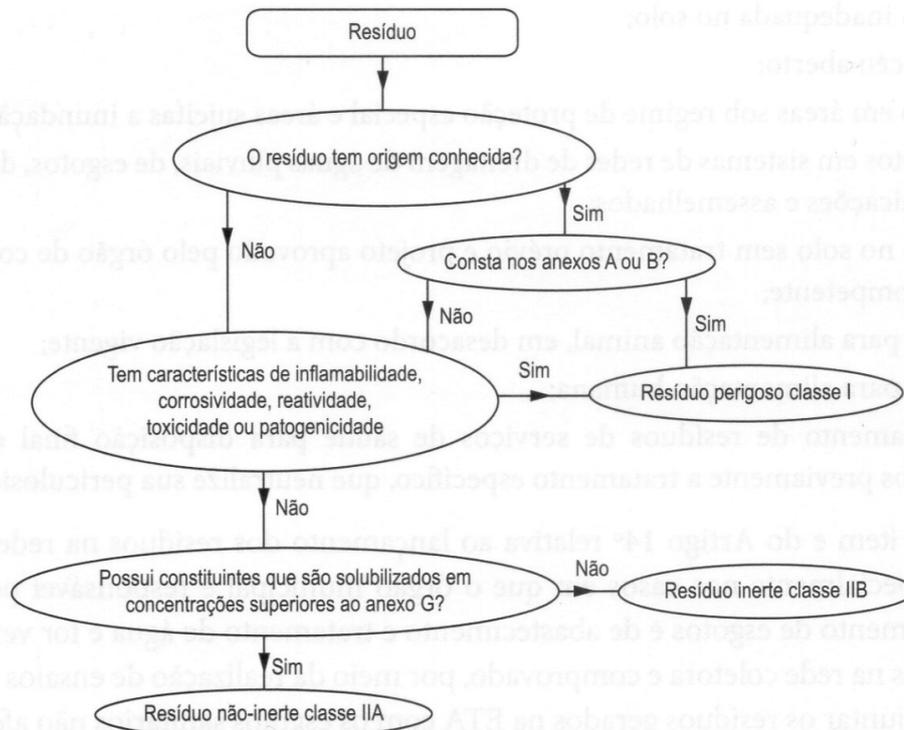
Além da cadeia de processos da ETA e dos produtos químicos utilizados, as características do lodo são influenciadas pela composição da água bruta (RICHTER, 2001). Ahmad, T., Ahmad, K., e Alam (2016) afirmam que os tipos e quantidades de óxidos presentes no lodo variam de acordo com a qualidade da água bruta, da natureza do coagulante utilizado, da tecnologia de tratamento e da qualidade final da água. Os autores destacam que, de um modo geral, os lodos são constituídos em maior parte por SiO_2 , seguido de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , sendo encontrados também, em menor quantidade, óxidos como o CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e de TiO_2 .

A caracterização do lodo segue parâmetros físicos, químicos e biológicos, ditados por normas que visam avaliar os potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública de qualquer resíduo sólido, não radioativo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Tais normas são enumeradas a seguir:

- a) NBR 10.004 (ABNT, 2004): Resíduos sólidos – Classificação;
- b) NBR 10.005 (ABNT, 2004): Procedimento para obtenção de lixiviado de resíduos sólidos;
- c) NBR 10.006 (ABNT, 2004): Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduo sólido;
- d) NBR 10.007 (ABNT, 2004): Amostragem de resíduos sólidos.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo de ETA pode ser classificado como um resíduo sólido, classe IIA – não inerte, ou seja, um resíduo não perigoso, que apresenta propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A classificação dos resíduos sólidos segue o esquema exposto na figura 2.

Figura 2 – Esquema de classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10.004



Fonte: ABNT 2004 (apud DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Cordeiro (1999) destaca, ainda, que a toxicidade do lodo de ETA dependerá dos seguintes fatores:

- a) características da água bruta;
- b) produtos químicos utilizados no tratamento;
- c) possíveis contaminantes presentes nesses produtos;
- d) reações químicas ocorridas durante o processo;
- e) forma de remoção e tempo de retenção dos resíduos nos decantadores;
- f) características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo receptor.

2.3 DISPOSIÇÃO DO LODO DE ETA

Como todo resíduo, o lodo de ETA deve ser descartado de maneira apropriada, visando impedir ou, pelo menos, minimizar os impactos infligidos ao meio ambiente.

Para se proceder com a disposição do lodo de ETA deve-se, primeiramente, realizar a remoção de água do mesmo, por meio de filtração ou separação gravitacional, visando a redução do volume e atingindo-se um estado sólido ou semi-sólido (RICHTER, 2001).

A disposição do lodo de ETA em cursos d'água foi, durante muito tempo, a principal alternativa de descarte deste resíduo. Achon, Soares e Megda (2005) e Menezes (2006) estudaram os impactos causados pelo lançamento *in natura* do lodo de ETA em rios, destacando a elevada quantidade de sólidos, a alta turbidez, as altas concentrações de metais e a alta DQO como fatores que causam a degradação do corpo receptor, prejudicando a qualidade da água e dos sedimentos do mesmo.

De acordo com dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), no ano de 2008, de todos os municípios brasileiros que apresentavam geração de lodo, 64,7% descarregavam o mesmo em rios (IBGE, 2010).

A aplicação do lodo de ETA no solo degradado é uma opção que vem sendo utilizada como alternativa de disposição. Menezes (2006) destaca que essa aplicação não é vantajosa, devido ao fato de que o lodo não fornece matéria orgânica e nutrientes em quantidades significativas para prover o crescimento das plantas. Hoppen (2005) alerta, ainda, que as altas concentrações de alumínio podem fixar o fósforo no solo, prejudicando o crescimento das plantas.

Bittencourt et al (2012) estudaram a aplicação de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto (ETE) em solo degradado e suas influências na produtividade do milho e nas características de fertilidade do solo. A aplicação do lodo de ETA no solo não demonstrou influência no desenvolvimento vegetal do milho, tampouco alterou as características do solo, sob o ponto de vista das variáveis analisadas. Ao ser aplicado em conjunto com o lodo de ETE, o lodo de ETA favoreceu a dinâmica do nitrogênio no solo.

Outra opção de descarte do lodo de ETA é a sua disposição em aterros sanitários. Esta técnica consiste na colocação do lodo, de maneira controlada e regulamentada sobre o terreno, sendo uma alternativa de elevado custo, tornando-a, assim a última opção a ser considerada (RICHTER, 2001). Menezes (2006) destaca que, quando a quantidade de lodo disposta for muito alta, pode acarretar na redução da vida útil do aterro.

O lodo de ETA pode, também, ser utilizado na construção civil, sendo utilizado na fabricação de produtos cerâmicos ou incorporado à matriz de concreto.

Teixeira et al (2011) estudaram o efeito da incorporação de lodo de ETA sobre as propriedades de tijolos cerâmicos. Os autores observaram que, para tijolos cerâmicos com temperaturas de queima de até 1000°C, poderiam ser utilizados até 10% de adição de lodo de ETA. Para temperaturas superiores, poderiam ser utilizados teores de até 20% de substituição. Além da temperatura de queima, o teor de incorporação depende das características do lodo e das propriedades da matéria-prima utilizada como matriz.

Martínez-García et al (2012) destacam que, a medida que o teor de lodo de ETA incorporado à matriz cerâmica aumenta, a sucção e absorção de água do material cerâmico cresce. Ocorre, também, um aumento da porosidade, resultando em uma redução da resistência à compressão.

Kizinievic et al (2013) afirmam que as alterações mineralógicas, químicas e microestruturas proporcionadas pela incorporação de lodo de estação de tratamento de água em materiais cerâmicos, fazem desta uma medida ecológica, econômica e sustentável.

A aplicação de lodo em matriz de concreto foi estudada por Hoppen (2005) onde se incorporou lodo *in natura* em teores de 3, 5, 7 e 10%, em substituição ao agregado miúdo. O autor concluiu que traços com até 5% de incorporação de lodo poderiam ser aplicados para a fabricação de artefatos, blocos, peças de concreto e até a construção de pavimentos rígidos. Concretos com até 10% de lodo, tiveram seu uso restringido para aplicações onde a trabalhabilidade não seja uma característica fundamental, como contrapisos, blocos e placas de vedação, etc.

Sales, Souza e Almeida (2011) desenvolveram um composto à base de lodo de ETA e serragem, com o objetivo de produzir um material leve para ser utilizado no concreto. Esse composto foi utilizado em substituição ao agregado graúdo, resultando em concretos com propriedades mecânicas adequadas para a construção de elementos sem função estrutural. O concreto produzido com este composto apresentou, também, propriedades térmicas e físicas que possibilitam a produção de blocos e elementos de enchimento de lajes que reduzam o peso das edificações e aumentem o conforto térmico.

Gastaldini et al (2015) estudaram a incorporação de cinzas de lodo de ETA em substituição ao cimento Portland, com teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e

30%. Os autores observaram que, para a mesma relação a/agl, a resistência à compressão apresentou aumentos que chegaram até 30%, em relação ao concreto de referência. Sendo assim, para se atingir um mesmo nível de resistência, concretos com adição de cinzas de lodo de ETA apresentaram uma redução no consumo de cimento, em relação ao concreto de referência, que variou, de acordo com os autores, de 37 a 200 kg de cimento por m³ de concreto.

Wolff, Schwabe e Conceição (2015) destacam que a utilização do lodo de ETA na indústria cerâmica é uma prática ambiental saudável, pois evita que o resíduo seja descartado no ambiente, além de resultar na diminuição dos gastos com energia e consumo de recursos naturais.

3 ASPECTOS DE DURABILIDADE E CORROSÃO DAS ARMADURAS

3.1 ASPECTOS DE DURABILIDADE

Por muito tempo, a resistência mecânica foi o principal ou até mesmo o único parâmetro utilizado para projeto de estruturas de concreto. Com o avanço dos estudos na área de materiais, o conceito de durabilidade, e sua importância, começaram a entrar em foco.

A durabilidade é definida, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), como a capacidade que a estrutura possui de resistir às influências ambientais previstas e definidas, no início dos trabalhos de elaboração do projeto, pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante.

Neville e Brooks (2013) destacam a importância da durabilidade do concreto, enfatizando a necessidade do mesmo ser capaz de suportar, ao longo da vida útil da estrutura, as condições para as quais ele foi projetado. Do ponto de vista sócio-econômico, Mehta e Monteiro (2014) destacam o custo substancial que reparos e substituições por falhas de materiais representam no orçamento total da construção, sendo estimado em 40% em países industrialmente desenvolvidos. A durabilidade dos materiais se relaciona, também, com a ecologia, devido a conservação dos recursos naturais em função da utilização de materiais mais duradouros (MEHTA; MONETIRO, 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) exige que as estruturas de concretos sejam projetadas de maneira que conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme estipulado na elaboração do mesmo.

A vida útil da estrutura, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), consiste no período de tempo durante o qual a mesma manterá suas características, sem intervenções significativas, desde que respeitados os requisitos de uso e manutenção durante a etapa de projeto, bem como a execução de reparos ocasionais, em decorrência de danos acidentais.

O fim da vida útil é atingido quando as propriedades de um material, submetido a determinadas condições de uso, se deterioram, fazendo com que a continuidade da sua utilização seja insegura e antieconômica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Medeiros, Andrade e Helene (2011) enfatizam que a vida útil da estrutura deve ser abordada de uma maneira holística, sistêmica e abrangente, tendo o envolvimento de equipes multidisciplinares, englobando todas as etapas do processo construtivo.

A durabilidade não é uma propriedade dependente apenas da estrutura, da armadura e do concreto, mas sim da interação destas com o ambiente e as condições de uso, operação e manutenção (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Estruturas de concreto localizadas em áreas urbana apresentam, geralmente, corrosão do aço devido à carbonatação, em função do alto teor de CO₂ emitido pelos veículos e fábricas industriais (ANN et al, 2010). Em ambientes marinhos, a corrosão das estruturas de concreto se inicia após um determinado teor de cloretos ser atingido na superfície da barra de aço (MEIRA et al, 2014).

No que condiz ao ambiente em que a estrutura está incluída, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) avalia, de maneira simplificada, a agressividade ambiental de acordo com as condições de exposição, como apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Rougeau e Guiraud (2014) destacam que, definidos os objetivos de durabilidade, as características do concreto, como composição e dosagem, podem ser escolhidas de maneira precisa, em função da agressividade do meio, aperfeiçoando, assim, suas propriedades e adaptando a estrutura para o uso desejado.

Marques e Costa (2010) afirmam que a durabilidade das estruturas de concreto armado está associada ao tempo e aos diversos agentes ambientais, sendo estes os responsáveis pela deterioração das estruturas. Bolina et al (2013) estudaram a vida útil das estruturas de concreto frente aos mecanismos químicos de deterioração, e destacam que os agentes agressores, como ácidos, sulfatos e álcalis, atuam de forma dupla, pois além de deteriorarem o concreto, através da redução do pH e aumento do número de trincas, abrem caminho para a deterioração do aço.

Zhou et al (2015) destacam que a corrosão causa degradação nas propriedades mecânicas das estruturas de concreto armado por meio da fissuração e destacamento do concreto, devido aos produtos de corrosão apresentarem maior volume que o metal de origem, da perda das propriedades da armadura, devido a perda de massa e de seção, e da perda de aderência concreto/armadura.

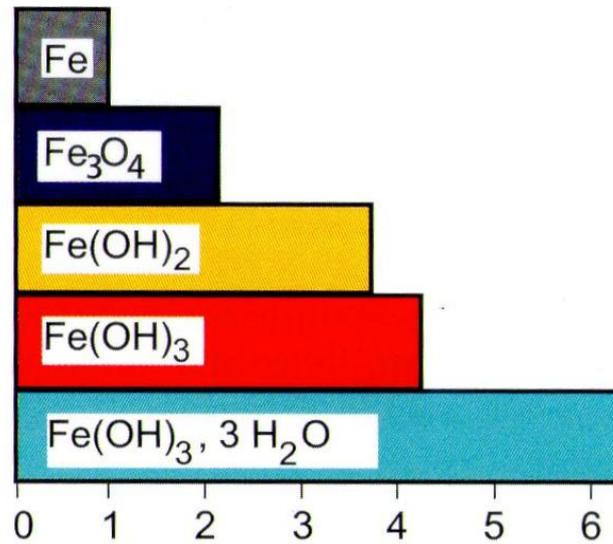
Medeiros, Andrade e Helene (2011) destacam como fundamentais o conhecimento da durabilidade e dos métodos de previsão da vida útil da estrutura, sendo possível obter uma previsão do comportamento do concreto em longo prazo, prevenir patologias precoces nas estruturas, além de contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das mesmas.

3.2 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão pode ser definida como a deterioração sofrida por um material devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ou não ser associada a esforços mecânicos. (RIBEIRO; CUNHA, 2014). Duarte et al (2014) citam os íons cloreto e o dióxido de carbono como agentes agressivos ao concreto, destacando que o primeiro induz corrosão do aço localizada por pittings no aço, enquanto o segundo induz uma despassivação uniforme das barras.

Em estruturas de concreto, a corrosão das armaduras resulta na perda de seção das barras de aço, ao mesmo tempo em que ocorre a formação de produtos expansivos ao redor da armadura. Baroghel-Bouny, Capra e Laurens (2014) destacam que tais produtos (óxidos e hidróxidos de ferro) podem apresentar volumes até seis vezes superiores ao do aço, como representado na figura 3. Dessa forma, a formação dos produtos de corrosão gera tensões e pressões internas, causando rachaduras e fragmentação da camada de cobrimento do concreto, além da perda de ligação entre este e o aço (ALGHAMDI; AHMAD, 2014).

Figura 3 – Comparação de volume dos produtos de oxidação do ferro



Fonte: BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS (2014)

Ahmad, S., (2003) destaca que a corrosão das armaduras das estruturas de concreto é afetada por fatores externos e internos, como exposto na tabela 2.

Tabela 2 – Fatores que influem na corrosão das armaduras das estruturas de concreto

Fatores externos	Fatores internos
Disponibilidade de oxigênio e umidade nos poros do concreto	Composição do cimento
Umidade relativa e temperatura do ambiente	Impurezas nos agregados, na água de mistura e/ou cura
Carbonatação e penetração de gases poluentes	Incorporação de adições minerais
Penetração de agentes agressivos, como os íons cloreto	Relação a/agl
Ataque de bactérias	Teor de cimento
	Tamanho e granulometria dos agregados
	Práticas construtivas
	Cobrimento da armadura
	Composição química e estrutural da armadura de aço

Fonte: Adaptado de Ahmad, S. (2003).

No interior do concreto, a natureza altamente alcalina do hidróxido de cálcio, com pH em torno de 13, é responsável pela formação de uma fina película na superfície da armadura, conhecida como *camada passivadora*. A existência desta película protege a armadura frente ao processo de corrosão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para que ocorra corrosão, é preciso, primeiramente, que ocorra a *despassivação*, ou seja, a destruição da camada protetora que envolve as armaduras. A despassivação é causada pela ocorrência de, pelo menos, uma das condições a seguir: presença de uma quantidade suficiente de cloretos ou redução da alcalinidade do concreto, causada, principalmente, pela carbonatação do mesmo (CASCUDO, 2005).

Com o avanço da despassivação da armadura, a estabilidade do sistema barra metálica/matriz cimentícia decresce progressivamente. Esta etapa do processo de corrosão é denominada de período preliminar ou de iniciação (TUUTTI, 1982).

Figueiredo e Meira (2011) destacam que a etapa de iniciação depende das características de agressividade do meio no qual a estrutura está inserida, bem como das características dos materiais, como tipo de cimento, porosidade superficial do concreto, tipo de aço utilizado, entre outras.

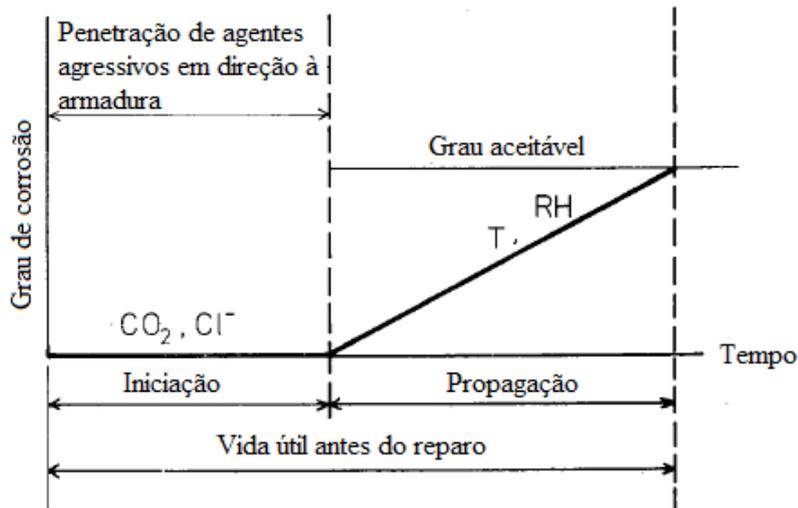
Deus et al (2014) estudaram, através da espectroscopia de impedância eletroquímica, os efeitos da temperatura no comportamento eletroquímico das barras de aço do concreto. Os autores observaram uma relação exponencial entre a resistividade elétrica com a temperatura. Foi observado, também, que aumentos de temperatura resultavam em diminuições de pH, alterando o mecanismo de corrosão e acelerando a destruição a camada passivadora.

A etapa de iniciação é fundamental para a preservação das armaduras, já que é nela que a corrosão se inicia. A espessura de cobertura do concreto, assim como suas características de transporte (permeabilidade e difusividade) e as características do meio (temperatura e umidade) são essenciais no que se refere à proteção contra a entrada de agentes agressivos (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

A segunda etapa do processo de corrosão, chamada de período de propagação, consiste no desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas de acordo com a variação dos fatores que controlam a cinética das reações (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

As duas etapas, *iniciação* e *propagação*, são apresentadas na figura 4.

Figura 4 – Etapas do processo de corrosão



Fonte: TUUTTI (1982)

De acordo com Ribeiro e Cunha (2014) as armaduras estão submetidas as seguintes formas de corrosão eletroquímica:

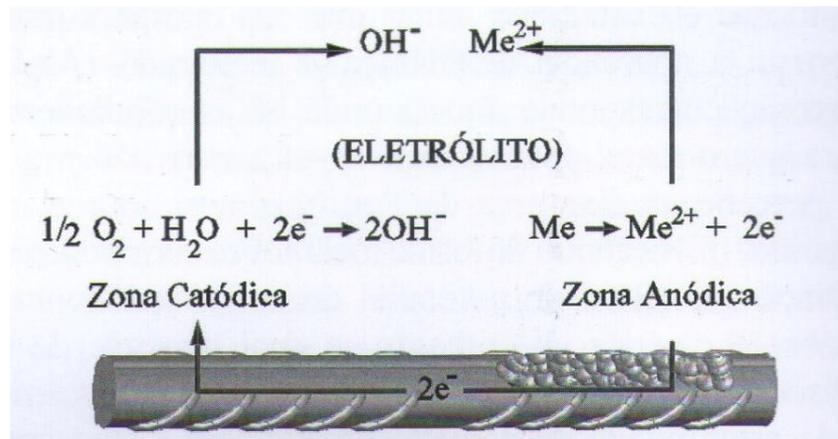
- a) corrosão uniforme: corrosão ao longo de toda a região da armadura exposta ao meio corrosivo;
- b) corrosão puntiforme ou por pite: o desgaste ocorre de maneira localizada, formando pequenas cavidades;
- c) corrosão intragranular: a corrosão se processa entre os grãos dos cristais do metal, podendo causar a perda de estabilidade dos vergalhões quando estes estiverem sujeitos a tensões;
- d) corrosão transgranular: a corrosão acontece entre os grãos da rede cristalina, podendo causar a fratura da estrutura, quando esta estiver submetida à esforços mecânicos;
- e) fragilização pelo hidrogênio: a corrosão se origina pela difusão do hidrogênio atômico pelos vergalhões da armadura, causando a fragilização dos mesmos.

3.3 MECANISMOS DE CORROSÃO

A corrosão das armaduras se constitui em um fenômeno de natureza eletroquímica, ou seja, ocorre a formação de pilhas eletroquímicas no interior do concreto. Tais pilhas se caracterizam pela presença de uma região anódica, onde ocorre a reação de oxidação, e uma região catódica, onde ocorre a reação de redução do oxigênio (CASCUDO, 2005). Além disso, devem existir, de acordo com Figueiredo e Meira (2011), uma diferença de potencial entre ânodo e cátodo, uma ligação metálica entre ambos, no caso, a própria armadura, e a existência de uma ligação externa, que se caracteriza pela condução iônica através do eletrólito.

Na figura 5 são representadas uma pilha de corrosão e as reações, de maneira simplificada, que regem este fenômeno.

Figura 5 – Representação de uma pilha de corrosão



Fonte: FIGUEIREDO; MEIRA, 2011

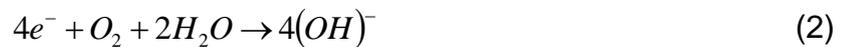
Na zona anódica acontece a reação de oxidação, onde são produzidos íons ferro e elétrons. Na zona catódica acontece a reação de redução do oxigênio, que consome os elétrons produzidos na reação de oxidação, tendo como produto a hidroxila (CASCUDO, 2005).

Os mecanismos da corrosão eletroquímica encontram detalhados abaixo, de acordo com Neville e Brooks (2013):

- a) Primeiramente, ocorre uma *reação anódica*, onde o ânodo libera íons ferrosos positivamente carregados (Fe^{++}) que passam para a solução (eletrólito), como representado na equação 1:



- b) Posteriormente, os elétrons livres, carregados negativamente, se combinam com a água e com o oxigênio, formando moléculas de hidroxila (OH). Essa é a chamada *reação catódica*, representada pela equação 2:



- c) A hidroxila combina-se com o íon ferroso, formando hidróxido ferroso, como exposto na equação 3:



- d) Logo após, por oxidação, o hidróxido ferroso é convertido em hidróxido férrico, também conhecido como *ferrugem*, como exposto na equação 4:



Nota-se, através da análise das reações, a importância da presença do eletrólito e do oxigênio. Quanto maior a quantidade de eletrólito, maior a facilidade de passagem da corrente iônica e, portanto, mais rapidamente se dará o processo de corrosão. No caso do oxigênio, a carência do gás provoca uma diminuição das reações de redução, controlando a velocidade de oxidação do metal (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

4 CARBONATAÇÃO

4.1 CONCEITUAÇÃO

O concreto é um material poroso. Os poros se encontram presentes na pasta de cimento, possuindo diversos tamanhos e podendo ou não estar preenchidos com soluções. A distribuição dos poros está atrelada a fatores como a dosagem do concreto, cura, quantidade e tipo de adições e aditivos químicos (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

A penetração de agentes agressivos nas estruturas de concreto armado está vinculada à qualidade da camada de cobrimento, expressa pela sua porosidade e pelo tipo de aglomerante utilizado, sendo esta um parâmetro importante para a previsão da vida útil das mesmas (NEPOMUCENO, 2005).

Um desses agentes agressivos é o dióxido de carbono (CO_2). O dióxido de carbono presente no ambiente penetra, sob forma gasosa, a estrutura de concreto, através da rede de poros ou pelas fissuras. No interior dos poros, sob a presença de água, ocorrem reações químicas entre o dióxido de carbono e os produtos de hidratação do cimento, em especial, com o hidróxido de cálcio (CH), resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Este processo é chamado de carbonatação (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

A carbonatação é controlada, portanto, pela difusão do gás e pelos mecanismos da reação química, sendo seu progresso determinado pelas características químicas da pasta de cimento e pela permeabilidade do material (BERNAL et al, 2015).

Figueiredo (2005) e Cascudo e Carasek (2011) destacam que outros constituintes presentes na atmosfera podem causar a carbonatação, como o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S), porém, o dióxido de carbono (CO_2) é o que apresenta maior incidência nas reações de neutralização, fato que justifica o nome do processo.

A reação de neutralização, ocasionada pela ação do dióxido de carbono, resulta em uma transformação dos íons alcalinos, como os cátions de sódio, potássio e cálcio, em sais de carbonatos dos respectivos elementos (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Neville e Brooks (2013) explicam que a reação de neutralização causa uma diminuição do pH da fase líquida alcalina intersticial. A diminuição do pH, para algo

em torno de 9, resulta na despassivação da armadura, propiciando, dessa maneira, que o processo de corrosão possa iniciar.

Este efeito foi observado por Vagheti (2005) que, ao analisar o pH de diversas amostras de concretos com adições minerais submetidas a períodos de carbonatação de 4, 8, 12, 16 e 20 semanas, constatou que, para uma mesma mistura, o pH diminuía a medida que o tempo de exposição ao CO₂ aumentava.

Ao mesmo tempo em que reduz o valor do pH, a carbonatação libera os cloretos quimicamente ligados na solução dos poros. Esse efeito foi observado por Wan et al (2013) que analisaram a carbonatação acelerada (teor de CO₂ de 20% e umidade relativa de 70%) em pastas e argamassas de cimento Portland, com relações a/agl de 0,50 e 0,70 e com diferentes quantidades de cloreto adicionados à mistura (0; 0,5% e 1,0%). Os autores observaram que a quantidade de cloreto dissolvido aumentou em até 12 vezes no concreto submetido à carbonatação acelerada em relação ao concreto mantido em atmosfera natural. Já a quantidade de cloretos quimicamente ligados apresentou uma redução de até 54% em função da carbonatação. Paralelamente, os autores observaram uma diminuição no valor do pH da solução dos poros de cerca de 13,2 para 8,0.

Duong, Sahamitmongkol e Tangtermsirikul (2013) estudaram os efeitos da lixiviação sobre a resistência à carbonatação e a corrosão das armaduras. Os autores observaram que a lixiviação precoce prejudica a resistência à carbonatação, bem como ajuda a promover a corrosão das armaduras. A lixiviação é o nome dado ao fenômeno de extração progressiva dos íons cálcio, através da dissolução do CH e descalcificação do C-S-H, causada pela percolação de substâncias agressivas pelo concreto (ESCADEILLAS; HORNAIN, 2014). Assim, a redução da quantidade destes compostos, que são consumidos durante as reações de carbonatação, pode resultar no aumento da velocidade da mesma.

Hussain, Ishida e Wasim (2011) estudaram a relação entre a profundidade crítica de carbonatação e a corrosão das armaduras de aço. Os autores destacam que a corrosão induzida pela carbonatação do concreto não ocorre até que a profundidade de carbonatação atinja um nível crítico de desenvolvimento, o qual os autores afirmam ser de 80% da espessura de cobertura do concreto. Além disso, a reação de carbonatação gera um aumento de resistividade elétrica da solução dos poros, e uma conseqüente diminuição da condutividade elétrica dos mesmos, resultando na redução da taxa de corrosão, ou seja, a taxa de corrosão induzida pela carbonatação do concreto tem tendência de diminuir ao longo do tempo.

É importante salientar que a carbonatação em si não gera corrosão, apenas destrói a proteção química da armadura, abrindo caminho para que os mecanismos de corrosão tenham início.

4.2 FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS

4.2.1 Mecanismos de transporte de CO₂ para o interior do concreto

A degradação do concreto tem início com a penetração de agentes agressivos na matriz de cimento do material. O transporte destas substâncias é governado por diversos mecanismos físico-químicos, os quais dependem, de acordo com Silva (2011), do fluxo e concentração da substância, condições ambientais, velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura e dimensões dos poros e surgimento de fissuras, do grau de saturação do sistema de poros e da temperatura.

Os principais mecanismos de transporte de substância para o interior do concreto são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração. Os mecanismos podem, ainda, atuar simultaneamente, dificultando o estudo e a definição de um modelo (SILVA, 2011).

O processo de carbonatação se inicia com a penetração, através da matriz de cimento, do CO₂ presente no ambiente. Tal processo é regido pelo mecanismo de difusão.

A difusão é um mecanismo de transporte que se baseia na diferença de concentrações entre dois meios, sendo, no caso da carbonatação, a diferença de concentração do CO₂ entre o ambiente externo e o interior do concreto (NEPOMUCENO, 2005).

O processo de difusão pode ser expresso pela primeira lei de Fick, representada pela equação 5 (SILVA, 2011), onde F é o fluxo de massa (g/m²s), D é o coeficiente de difusão (m²/s), c é a concentração (g/m³) e x é a distância (m).

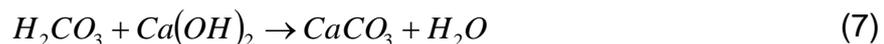
$$F = -D \frac{dc}{dx} \quad (5)$$

O coeficiente de difusão varia de acordo com as características microestruturais do material, assim como das substâncias presentes na solução aquosa dos poros (NEPOMUCENO, 2005).

Leemann et al (2015) estudaram a difusão do CO_2 em concretos com adição de: a) calcário em pó, b) mistura de calcário em pó com cinza volante de baixo teor de cálcio, c) escória granulada de alto-forno e d) dois tipos de cimento Portland comum. Todos os concretos com adição mineral apresentaram aumento na difusão do CO_2 em relação ao concreto de referência (para um mesmo nível de resistência), com exceção do concreto com adição de escória, que apresentou difusão bastante baixa em relação aos demais.

4.2.2 Mecanismos de carbonatação

A carbonatação é um fenômeno lento que ocorre da superfície para o interior da estrutura de concreto. É um processo que se inicia quando, na presença de umidade, o CO_2 forma ácido carbônico (H_2CO_3) que, posteriormente, reage com o $Ca(OH)_2$, resultando em $CaCO_3$, como exposto, resumidamente, nas equações 6 e 7 (NEVILLE; BROOKS, 2013).



Os mecanismos de carbonatação podem ser representados pelas três etapas a seguir, de acordo com Papadakis, Vayenas e Fardis (1991):

- a) Na fase aquosa dos poros, ocorre a dissolução do hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação do cimento. Esse processo é representado através da equação 8.



- b) Por difusão, o gás carbônico penetra no concreto e se desloca através da fase aquosa do poro da matriz, se dissolvendo na solução aquosa. As equações 9 e 10 demonstram esse processo.





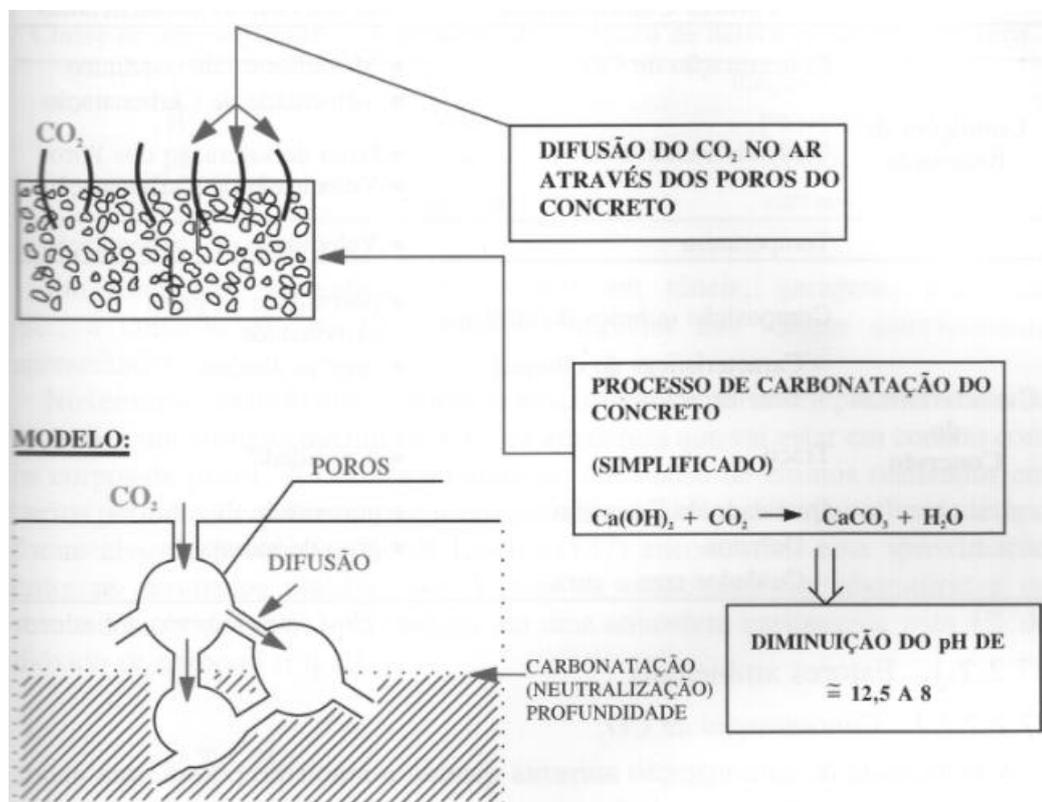
c) Por fim, temos a reação entre o gás carbônico dissolvido e o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ dissolvido, assim como com outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento, formando carbonatos. A equação 11 representa essa reação.



As reações apresentadas acima são referentes à carbonatação do hidróxido de cálcio, mas, de acordo com Cascudo e Carasek (2011), os íons OH^- e Ca^{2+} também podem ser obtidos, embora em menor quantidade, pela dissolução do C-S-H e das fases aluminato.

O processo de carbonatação pode ser representado de forma esquematizada através da figura 6.

Figura 6 – Avanço do processo de carbonatação



À medida que o hidróxido de cálcio do interior dos poros é consumido, o pH diminui. Desse modo, temos a formação de três zonas distintas (CASCUDO; CARASEK, 2011):

- a) Zona completamente carbonatada: possui valor de pH inferior à 9,0;
- b) Zona parcialmente carbonatada: apresenta valor de pH na faixa de 9,0 a 12;
- c) Zona não carbonatada: com pH superior à 12.

4.3 INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA MICROESTRUTURA

A porosidade e a estrutura dos poros, de acordo com Stroeven, Hu e Koleva (2010), estão entre as características mais significativas da microestrutura do material, afetando a sua permeabilidade e durabilidade. Os autores enfatizam que, a adequada caracterização da estrutura de poros é crucial para a modelagem da permeabilidade e para a garantia do desempenho e durabilidade do material. Mohammed, Dawson e Thom (2013) enfatizam que a permeabilidade e as propriedades de transporte de água, vapor e contaminantes dependem da capilaridade e da interconectividade dos poros do concreto.

A carbonatação submete o concreto a alterações microestruturais, alterando as propriedades do material, como permeabilidade, difusividade de gases e a capilaridade (ARANDIGOYEN et al, 2006). O dióxido de carbono reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual apresenta volume superior ao do hidróxido de cálcio, preenchendo os poros e, portanto, diminuindo a porosidade da pasta. Esse fato justifica, de acordo com Cascudo e Carasek (2011), a diminuição que ocorre na velocidade de carbonatação ao longo do tempo.

Cui et al (2015) perceberam este efeito ao submeter amostras de concreto de cimento Portland à teores de 2%, 10%, 20%, 50% e 100% de dióxido de carbono. Para uma mesma idade de ensaio, os concretos expostos a baixas concentrações de CO_2 (de 2 a 20%) apresentaram uma taxa de crescimento da profundidade de carbonatação superior aos concretos expostos a altas concentrações de CO_2 (maiores que 20%). A análise através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrou que, para altas concentrações de CO_2 , o concreto foi exposto a uma carbonatação significativa, que alterou a microestrutura da camada mais externa,

tornando-a mais densa, com poros menores e menos conectados, dificultando a difusão do CO_2 (CUI et al, 2015).

Yagüe et al (2005) destacam o efeito positivo da carbonatação em estruturas de concreto massa, já que a redução da proporção de hidróxido de cálcio, e sua substituição por carbonato de cálcio, resulta em preenchimento dos poros e aumento da compacidade do concreto.

Morandea, Thiéry e Dangla (2014) observaram, ao investigar os efeitos da carbonatação sobre o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que a carbonatação resultava em uma redução da porosidade. Ao reagir com o CO_2 , o C-S-H sofria uma descalcificação, resultando em um C-S-H com menor volume molar e relação C/S mais baixa. Essa perda de volume, porém, era compensada pela reação do CH com o CO_2 e a consequente formação do carbonato de cálcio.

Cascudo e Carasek (2011) afirmam que, no que se refere ao processo de carbonatação do C-S-H, um aumento do volume de poros mais finos pode ser observado, mesmo que a porosidade total da mistura sofra redução.

Pham e Prince (2014) estudaram os efeitos da carbonatação na microestrutura de pastas e argamassas de dois tipos de cimento: CEM I e CEM II. As amostras foram submetidas à carbonatação acelerada (20°C , 65% de umidade relativa e 20% de teor de CO_2) e, posteriormente, a distribuição do tamanho de poros foi analisada através dos ensaios de adsorção de nitrogênio e adsorção de água. O ensaio de adsorção de nitrogênio demonstrou que a carbonatação causa uma diminuição do volume de microporos ($< 2 \mu\text{m}$), em função da carbonatação do C-S-H e formação de calcita. O ensaio demonstrou, também, que as alterações de volume dos mesoporos ($> 2 \mu\text{m}$) é dependente do tipo de cimento utilizado: as pastas e argamassas de CEM II apresentam um aumento no volume destes poros, já as pastas e argamassas de CEM I apresentaram uma redução de volume dos mesmos. O ensaio de adsorção de água não permitiu analisar os efeitos da carbonatação dos mesoporos. Os autores destacam que ambos os ensaios podem ser utilizados em conjunto para avaliar o efeito da carbonatação. O ensaio de adsorção de água permite, devido ao pequeno tamanho das moléculas de água, avaliar de forma mais efetiva os microporos. Já o ensaio de adsorção de nitrogênio, que possui moléculas maiores que as da água, permite uma análise mais eficaz dos mesoporos.

A carbonatação promove variações de massa no concreto. Devido ao fato de haver uma efetiva incorporação de CO_2 na estrutura interna do concreto, ocorre um acréscimo de massa quando o Ca(OH)_2 é convertido em CaCO_3 (CASCUDO; CARASEK, 2011). Apesar disso, a carbonatação pode induzir retração no concreto. De acordo com Cascudo e Carasek (2011), a retração acontece em função da perda de moléculas de água na reação de carbonatação, da dissolução do Ca(OH)_2 em regiões sob tensão e precipitação do CaCO_3 em zonas não sujeitas à tensão, causando uma diminuição volumétrica da massa de concreto.

Metalssi et al (2012) estudaram os efeitos da carbonatação sobre a microestrutura e retração por secagem em argamassas com adição de éter de celulose. Os autores notaram que a carbonatação resultou em uma diminuição da macroporosidade e um aumento significativo das resistências. Por outro lado, as amostras carbonatadas apresentaram uma retração cerca de duas vezes maiores que amostras não-carbonatadas, resultando, assim, em um aumento da fissuração.

A liberação de água durante a reação de carbonatação beneficia as reações de hidratação da capa de concreto e, portanto, promove o aumento da dureza superficial do material. Esse efeito resulta em um aumento da resistividade elétrica, reduzindo a mobilidade iônica e dificultando a difusão de gases para o interior do concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011).

A carbonatação resulta, portanto, em uma redução da porosidade e até mesmo em aumento de resistência mecânica, porém, a reação de neutralização e a consequente despasseivação da armadura é o efeito mais importante a ser considerado em estruturas de concreto armado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

As alterações que a carbonatação induz na microestrutura do material podem ser analisadas por diversos ensaios, como a porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e a termogravimetria (TG).

4.3.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio se baseia na relação entre o volume de mercúrio forçado a penetrar nos poros de uma amostra e a pressão necessária para isso. Como o mercúrio possui, em relação à maioria dos materiais, um ângulo de contato θ maior que 90° , ou seja, não molha a superfície do sólido, faz-se necessária a aplicação de uma pressão P para forçar a entrada do mercúrio

nos poros de uma amostra. Para cada valor de pressão, registra-se o volume que penetrou no material e, dessa maneira, pode-se analisar a distribuição e o tamanho dos poros (DAL MOLIN, 2007).

Partindo do pressuposto de que os poros são cilíndricos e que apresentam a mesma acessibilidade ao mercúrio, pode-se converter a pressão aplicada no valor de diâmetro do poro através da aplicação do modelo de Washburn, apresentado através da equação 12 (ZHOU, YE, BREUGEL; 2010), onde D é o equivalente ao diâmetro do poro, P é a pressão aplicada, γ é a tensão superficial do mercúrio e θ é o ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido.

$$D = \frac{-4\gamma \cos\theta}{P} \quad (12)$$

Stroeven, Hu e Koleva (2010) alertam que o sistema de poros do cimento hidratado não está em conformidade com os requisitos do modelo, ou seja, os poros não são exatamente cilíndricos, tampouco possui a mesma acessibilidade ao mercúrio.

De acordo com Dal Molin (2007) é possível determinar, através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, as seguintes características da rede de poros do material: distribuição, volume total e tamanho médio dos poros, superfície específica, densidade e estrutura de sólidos não-compressíveis.

A amostra precisa ser devidamente seca antes da realização do ensaio. O procedimento de secagem durante a preparação da amostra exerce um efeito significativo sobre os vazios de poros, tendo-se que ter o devido cuidado para que a microestrutura da mesma não seja alterada durante a remoção da água (DAL MOLIN, 2007).

4.3.2 Termogravimetria

As análises térmicas são técnicas que permitem a determinação de propriedades físicas e químicas, em função da temperatura ou tempo, de amostras submetidas a um programa de temperatura controlada (DAL MOLIN, 2007). São obtidas curvas de análise térmica, onde os picos, discontinuidades, mudanças de

declividade, etc, são considerados como eventos térmicos da amostra (PAULON; KIRCCHHEIM, 2011).

A Termogravimetria (TG) é um ensaio de análise térmica, onde se avalia a perda de massa sofrida pela amostra após uma variação controlada de temperatura (CASCUDO; CARASEK, 2011).

De acordo com Dal Molin (2007), a TG permite a obtenção de diversas informações sobre a amostra analisada, como a faixa de estabilidade térmica dos materiais, as condições em que ocorrem a oxidação de metais e degradação dos polímeros ou determinar a cinética de reação de um composto.

O ensaio de análise térmica diferencial permite a medição da diferença de temperatura entre uma amostra e um material de referência, quando ambos são submetidos à um processo de aquecimento (DAL MOLIN, 2007).

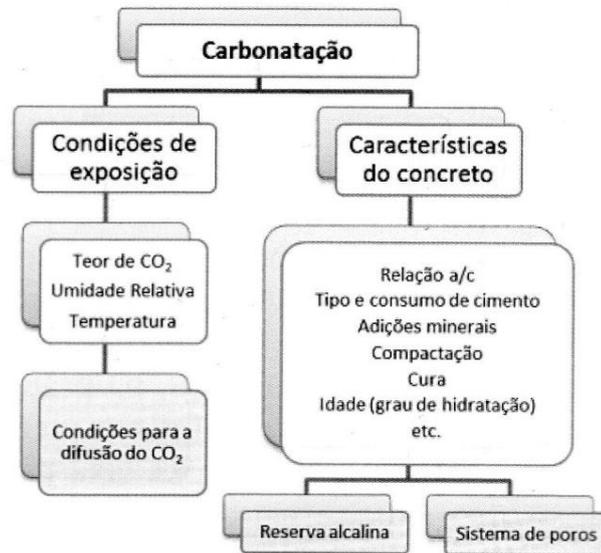
4.4 FATORES QUE INFLUEM NA CARBONATAÇÃO

Diversos fatores influem no fenômeno de carbonatação, alterando a velocidade com que a frente carbonatada penetra na matriz de cimento e a profundidade que a mesma atingirá. Tais fatores encontram-se listados abaixo:

- a) relação água/aglomerante;
- b) condições de cura;
- c) dosagem do cimento e adições minerais;
- d) concentração de CO₂ no ambiente;
- e) saturação dos poros;
- f) resistência à compressão;
- g) teor de CH remanescente;
- h) temperatura.

Esses fatores podem ser tanto devido às condições de exposição, como devido às características do concreto. Eles podem influenciar de maneira física na matriz de concreto, através de alterações no sistema de poros, ou quimicamente, através de mudanças na reserva alcalina. As condições ambientais também podem influenciar a velocidade de difusão de CO₂. A figura 7 apresenta, resumidamente, a maneira como cada fator influi na carbonatação do concreto.

Figura 7 – Fatores que influem na carbonatação



Fonte: CASCUDO E CARASEK (2011).

4.4.1 Condições de exposição

4.4.1.1 Concentração de CO₂

Como explicado anteriormente, a penetração do CO₂ no concreto ocorre devido à difusão do gás através da rede de poros da pasta de cimento. Como a difusão é um mecanismo que se origina pela diferença de concentração entre dois meios, a velocidade de penetração do CO₂ no concreto aumenta quando o ambiente apresentar um maior teor deste gás (FIGUEIREDO, 2005).

Ambientes que apresentam maiores concentrações de CO₂ produzirão maiores gradientes de carbonatação e, em consequência, maiores taxas de carbonatação (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Como a concentração de CO₂ é mais intensa nos centros urbanos (em torno de 0,3%) do que em ambientes rurais (em torno de 0,03%), a carbonatação torna-se um fenômeno típico (embora não exclusivo) de grandes cidades (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Dentro de um mesmo meio urbano, a carbonatação pode ocorrer em diferentes níveis de acordo com a localização da estrutura como, por exemplo, em

estacionamentos, túneis ou em edificações próximas a vias com alto fluxo de veículos, locais que apresentam grandes concentrações de CO₂.

O tempo de exposição ao CO₂ também influencia a profundidade de carbonatação. Ao estudar a carbonatação em concretos com adição de lodo de estação de tratamento de água, Yagüe et. al (2005) mantiveram amostras expostas durante os períodos de 30 e 60 dias em um ambiente com 20% de dióxido de carbono no ar. As amostras expostas durante 60 dias apresentaram maiores profundidades de carbonatação.

Por outro lado, Cui et al (2015), ao estudarem os efeitos da concentração de dióxido de carbono (2, 10, 20, 50 e 100%) em amostras de concreto de cimento Portland, notaram que para altos teores de CO₂ (acima de 50%), aconteciam alterações na microestrutura da pasta de cimento que causavam um amortecimento no aumento da profundidade de carbonatação.

Nunes (2014) destaca que a falta de padronização e a inexistência de uma norma para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada prejudica a comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

4.4.1.2 Umidade relativa do ambiente e saturação dos poros

A velocidade de difusão dos gases é governada pelo tipo de meio em que o processo ocorre: água ou ar. A velocidade de difusão do CO₂ na água é 10⁴ vezes mais baixa que no ar. Deste modo, quando os poros do concreto encontram-se secos, a difusão do CO₂ ocorre sem dificuldade. Já quando os poros apresentam-se saturados de água, a velocidade de difusão do CO₂ é muito baixa (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Na primeira situação, onde os poros do concreto estão secos, apesar da difusão do CO₂ ocorrer facilmente para o interior do material, não há a presença de água para reagir com o gás e dar início ao processo de carbonatação. Já quando os poros encontram-se saturados, a velocidade de difusão é tão baixa que a carbonatação demora muito tempo para se desenvolver (FIGUEIREDO, 2005).

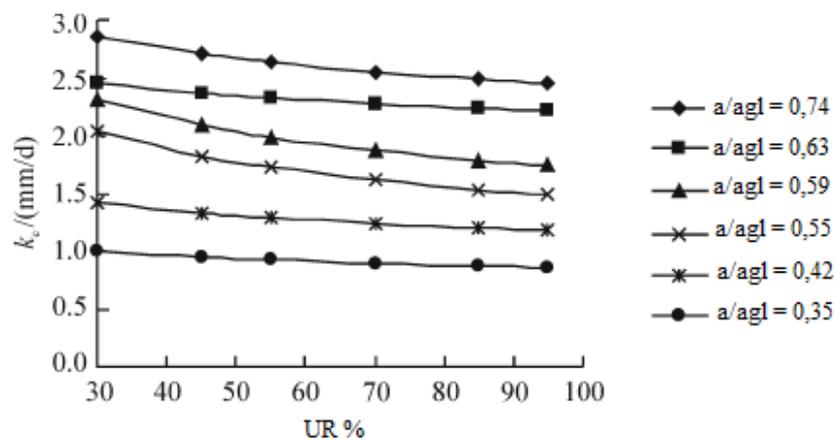
A carbonatação se desenvolve, portanto, quando os poros se encontrarem parcialmente saturados, havendo condições do CO₂ se difundir e água para reagir com o mesmo.

A quantidade de água no interior dos poros do concreto é influenciada pela umidade relativa do ambiente. Figueiredo (2005) destaca que, devido aos ciclos de umedecimento e secagem aos quais as estruturas estão sujeitas, a relação entre umidade relativa e profundidade de carbonatação é complexa.

Concretos que se encontram protegidos da chuva direta, mas que estão expostos ao ar úmido, apresentam frentes de carbonatação mais profundas do que concretos periodicamente molhados pela chuva (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A influência da umidade relativa sobre o fenômeno da carbonatação foi estudada por Li et al (2013), através da exposição de concretos de cimento Portland à diversas taxas de umidade, para um valor constante de temperatura. Os resultados são apresentados na figura 8.

Figura 8 – Influência da umidade relativa na carbonatação



Fonte: LI et al (2013)

Pela análise da figura, nota-se que o aumento da umidade relativa acarreta em uma diminuição da carbonatação. Li et al (2013) destaca que a influência da umidade relativa do ambiente na taxa de carbonatação não é tão aparente quanto a da temperatura.

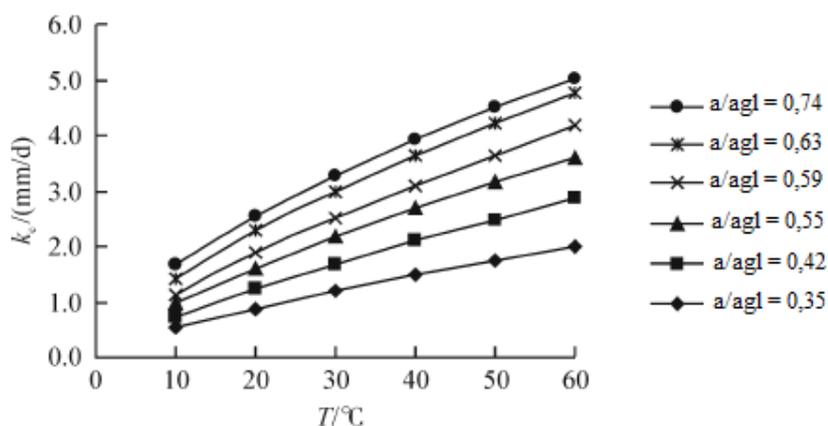
4.4.1.3 Temperatura ambiente

Cascudo e Carasek (2011) destacam a influencia da temperatura nas reações químicas, aumentando, de um modo geral, a velocidade com que as mesmas acontecem, à medida que a temperatura também aumenta.

“É fato que a mobilidade das espécies iônicas em solução é aumentada com o acréscimo de temperatura, o que favorece a ocorrência de reações químicas mais rapidamente” (CASCUDO; CARASEK, 2011, p. 857).

Li et al (2013) investigaram a influência da temperatura sobre a carbonatação de concretos de cimento Portland, para um valor constante de umidade relativa. Os resultados aparecem expostos na figura 9.

Figura 9 – Influencia da temperatura na carbonatação



Fonte: LI et al (2013)

O gráfico permite observar que o acréscimo de temperatura resulta em um aumento da taxa de carbonatação. Os resultados obtidos por Li et al (2013) estão de acordo com o que afirma Cascudo e Carasek (2011).

Por outro lado, Figueiredo (2005) afirma que a velocidade de difusão do CO_2 é pouco influenciada por variações de temperatura, em ensaios acelerados.

4.4.2 Características do concreto

4.4.2.1 Relação água/aglomerante

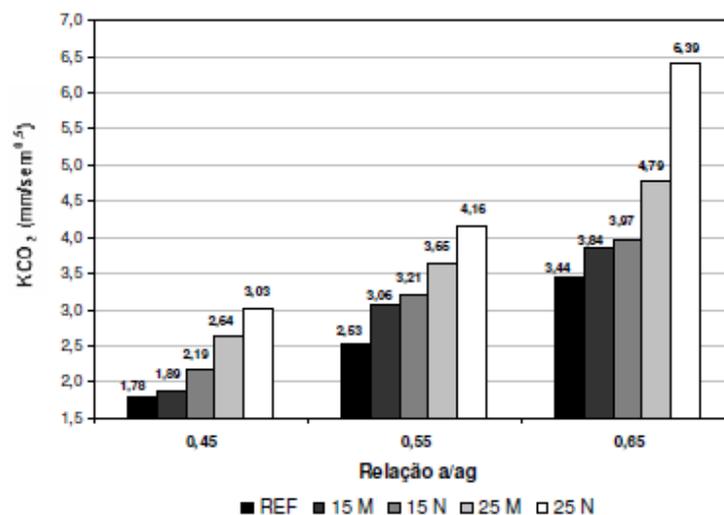
A relação a/agl tem influência direta sobre a porosidade da matriz da pasta do concreto. Quanto maior a relação a/agl , maior a porosidade e permeabilidade do concreto e, por consequência, maior a facilidade de difusão do CO_2 pelo interior do mesmo (FIGUEIREDO, 2005).

Valcuende e Parra (2010) analisaram a carbonatação natural em concretos auto-adensáveis e constataram que a profundidade de carbonatação aumentava junto com a relação a/agl. Os autores observaram, para relação a/agl de 0,65, uma redução na concentração de poros com diâmetro entre 0,045 e 0,15 μm e um aumento em volume de poros de tamanho entre 0,15 e 0,6 μm , em relação as outras relações a/agl (0,45 e 0,55). O aumento da relação a/agl resultou, portanto, em um menor volume de poros capilares pequenos e maior volume de poros capilares grandes, facilitando a difusão de CO_2 e, em consequência, aumentando a profundidade de carbonatação.

Hoppe (2008) estudou a carbonatação em concretos com adição de cinzas de casca de arroz. Para o concreto de referência (sem adição de cinzas) o autor obteve acréscimos de 42% no coeficiente de carbonatação quando variou a relação a/agl de 0,45 para 0,55 e acréscimos de 93% quando variou a mesma de 0,45 para 0,65. Em concretos com 15% de cinza de casca de arroz moída, o autor obteve acréscimos de 62% e 103% respectivamente, para as relações a/agl de 0,55 e 0,65, quando comparadas com a relação a/agl de 0,45.

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos por Hoppe (2008), onde nota-se o aumento do coeficiente de carbonatação à medida que a relação a/agl é aumentada.

Figura 10– Coeficiente de carbonatação x relação a/agl



Fonte: HOPPE (2008).

Li et. al (2013) ensaiaram amostras de concreto de cimento Portland comum, com diferentes relações a/agl e expostas a diferentes condições climáticas. Observou-se que, independente das condições de temperatura e umidade relativa do ar, quanto maior era a relação a/agl da amostra, maior a profundidade de carbonatação da mesma.

Ao estudar a profundidade de carbonatação em concretos com cinza volante, Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) atribuíram à densificação da estrutura dos poros o fato de menores relações a/agl resultarem em coeficientes de carbonatação mais baixos.

Kulakowski, Pereira e Dal Molin (2009) estudaram a carbonatação em concretos com adição de diversos teores de sílica ativa e relação a/agl de 0,30; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,80. Os autores notaram que para relações a/agl menores (até 0,45) a carbonatação era pouco influenciada pelas características químicas do concreto (pH e consumo de CH) sendo determinada pela porosidade da matriz de cimento. Para relações a/agl maiores, as características químicas passaram a ter um efeito significativo e prejudicial na profundidade de carbonatação.

4.4.2.2 Condições de cura

A cura é o processo de controle da temperatura e do movimento de água, tanto de dentro para fora quanto de fora para dentro, com o objetivo de promover uma hidratação adequada para o cimento. Têm influência direta sobre a resistência mecânica e sobre a durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

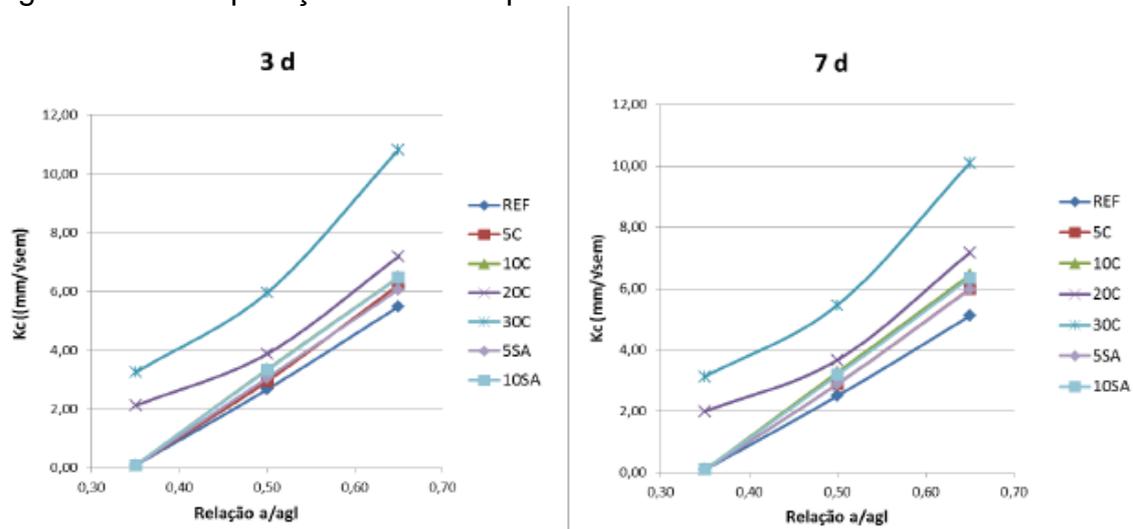
De acordo com Cascudo e Carasek (2011) um procedimento adequado de cura nas primeiras idades (entre 30 minutos e 6 horas) minimiza o efeito da retração plástica, devido à evaporação da água de amassamento, evitando o surgimento de fissuras decorrentes desse fenômeno. A cura proporciona, também, a diminuição da porosidade da pasta de cimento na superfície do concreto, devido do aumento do grau de hidratação.

Um bom procedimento de cura resulta em uma pasta de cimento consolidada, aumentando a qualidade do concreto, especialmente na região da armadura, e formando uma capa superficial relativamente compacta (CASCUDO; CARASEK, 2011).

A redução da porosidade e da permeabilidade, em decorrência da boa cura, dificulta a difusão do CO_2 no interior da matriz de concreto e, em consequência, reduz a profundidade de carbonatação.

Nunes (2014) ao estudar a carbonatação acelerada em concretos com adição de cinza de casca de arroz observou que o aumento do período de cura de três para sete dias resultou, para todas as misturas investigadas, em uma diminuição do coeficiente de carbonatação, como exposto na figura 11.

Figura 11 – Comparação entre dois períodos de cura



Fonte: Adaptado de NUNES (2014).

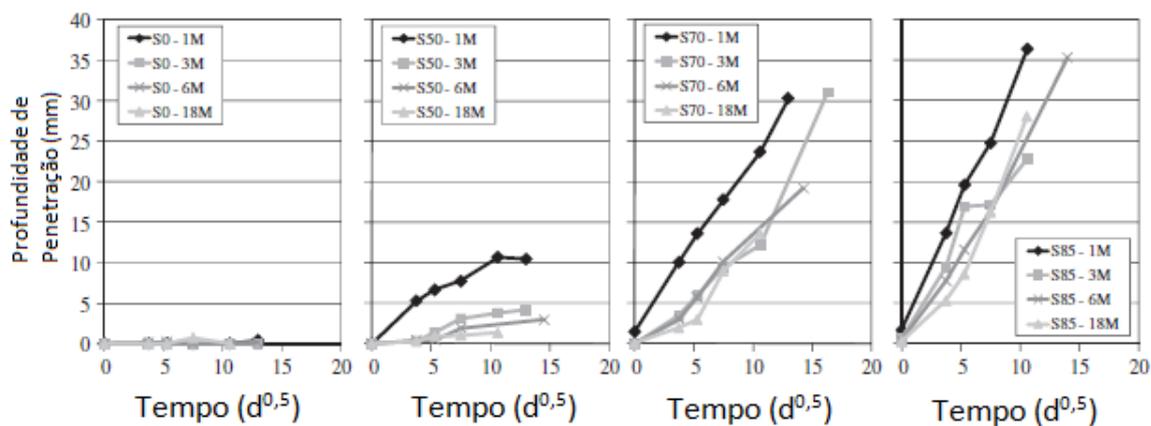
Atis (2003) constatou, ao estudar a carbonatação acelerada em concreto com adição de cinza volante, que quanto maior o período de cura, menor será a profundidade de carbonatação. Além disso, o autor observou que amostras curadas em ambientes com umidade relativa de 65%, apresentaram maiores profundidades de carbonatação que amostras curadas com umidade relativa de 100%.

Rabehi, Mezghiche e Guettala (2013) estudaram a correlação entre a absorção inicial da camada de cobrimento do concreto com a profundidade de carbonatação. Para isso, foram moldadas amostras de concretos com dois tipos diferentes de cimento Portland (CEM I 42,5 e CEM II/B 42,5) com períodos de cura de 3, 7 e 28 dias. À medida que o período de cura aumentava, a absorção inicial da camada de cobrimento e a profundidade de carbonatação diminuía. Isto acontece

porque a cura influencia as reações de hidratação do concreto, promovendo a colmatação dos poros capilares.

A carbonatação em concretos com adição de escória de alto-forno foi estudada por Gruyaert, Van de Heede e De Belie (2013), que avaliaram os efeitos de diferentes períodos de cura (1, 3, 6 e 18 meses) sobre a profundidade de carbonatação de concretos com teores de 0, 50%, 70% e 85% de substituição de cimento por escória. Os resultados obtidos pelos autores encontram-se na figura 12.

Figura 12 – Influência da cura em concretos com adição de escória de alto-forno



Fonte: GRUYAERT, VAN DE HEEDE E DEBELIE (2013).

Nota-se que para todos os teores de substituição estudados, houve uma diminuição da profundidade de carbonatação à medida que se aumentou o período de cura. Os autores destacam que houve uma grande diminuição na profundidade de carbonatação quando o período de cura foi aumentado de 1 para 3 meses, mas que a diminuição da mesma foi menos significativa para períodos de cura maiores.

Borges et al (2010) investigaram o efeito da temperatura de cura (20°C e 60°C) sobre a carbonatação de pastas de cimento com adição de altos teores de escória de alto-forno. Foi observado que as amostras curadas com temperatura de 60°C apresentaram uma maior hidratação da escória de alto-forno, resultando na colmatação dos poros da pasta e diminuição da difusão de CO₂, diminuindo, assim, os níveis de carbonatação.

4.4.2.3 Dosagem do cimento e adições minerais

O cimento Portland é constituído, principalmente, pelo clínquer. O clínquer é o material obtido pela calcinação, a aproximadamente 1450°C, de uma mistura de calcário, argila e, eventualmente, corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou férrica, que tem a função de garantir certas proporções de determinados compostos químicos na mistura final (BATTAGIN, 2011).

Após a formação do clínquer, o material é resfriado e recebe uma determinada quantidade de sulfato de cálcio (gipsita), sendo moído até a obtenção de um pó fino, denominado de cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os principais compostos presentes no cimento Portland são: o silicato tricálcico (C_3S), o silicato bicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

O silicato C_3S , também denominado de alita, é o composto responsável pelo endurecimento e ganho de resistência mecânica nas primeiras idades (até 28 dias). O silicato C_2S , também denominado de belita, é responsável pelo ganho de resistência mecânica nas idades mais avançadas (acima de 28 dias) já que apresenta uma taxa de hidratação mais lenta (BATTAGIN, 2011).

As equações 13 e 14 representam, de acordo com Neville e Brooks (2013), a hidratação destes compostos:



Observa-se que os dois produtos formados pela reação de hidratação dos silicatos C_3S e C_2S são o silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_3$) e o hidróxido de cálcio (CH_2). O silicato de cálcio hidratado se caracteriza por apresentar relações C/S (cálcio/sílica) e H/S (água/sílica) diferentes, variando de acordo com a temperatura e pH. A relação C/S pode variar de 0,6 a 2,0 (CHANG; FANG, 2015). Como visto anteriormente, estes compostos reagem com o CO_2 , sendo consumidos na reação de carbonatação. Sendo assim, a quantidade dos compostos C_3S e C_2S no cimento influenciará o processo de carbonatação.

Além disso, o concreto pode apresentar adições minerais. A incorporação de adições minerais ao concreto produz efeitos químicos e físicos na estrutura do mesmo (DAL MOLIN, 2011).

Quimicamente, as adições minerais influem nas características do concreto através da sua reação com o Ca(OH)_2 , formado durante as reações de hidratação do cimento Portland, e a consequente formação de silicato de cálcio hidratado adicional (DAL MOLIN, 2011).

Como efeitos físicos da incorporação de adições minerais no concreto, Dal Molin (2011) destaca o efeito microfíler, o refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação e alterações na microestrutura da zona de transição. As minúsculas partículas das adições minerais preenchem os vazios da matriz de cimento, podendo funcionar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, formando um grande número de pequenos cristais, diminuindo a porosidade e permeabilidade da pasta.

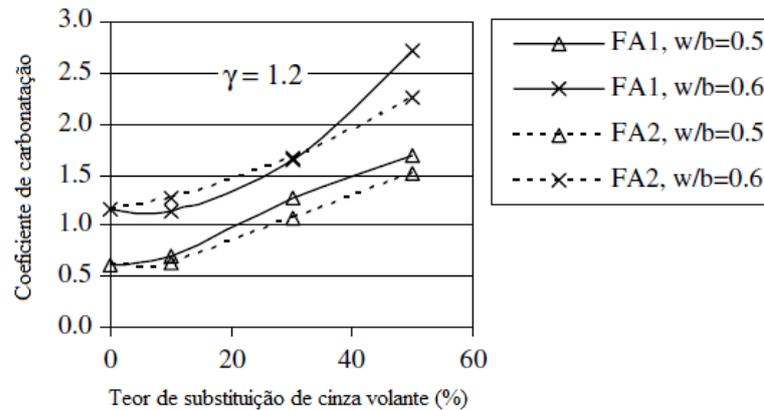
Figueiredo e Meira (2011) destacam que o consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica reduz a reserva alcalina. Assim, com a diminuição do hidróxido de cálcio, menos tempo levará para que o mesmo seja consumido e, em consequência, maior será a velocidade de carbonatação.

Já o refinamento de poros resulta em uma diminuição da porosidade e permeabilidade, dificultando a difusão do CO_2 no interior da matriz de cimento. Assim sendo, para se conhecer os efeitos que a incorporação de uma adição mineral ao concreto terá sobre o fenômeno da carbonatação, é necessário saber qual dos dois efeitos será preponderante: a diminuição da reserva alcalina ou o refinamento de poros (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Em seu estudo, Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) constataram que o coeficiente de carbonatação aumenta de acordo com o aumento do teor de cinzas volantes em substituição ao cimento. Esse efeito foi atribuído à baixa reserva alcalina, causada pelo consumo do Ca(OH)_2 na reação pozolânica.

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos por Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) ao comparar o coeficiente de carbonatação em concretos com adição de cinzas volantes com dois teores diferentes de CaO , para quatro teores de substituição.

Figura 13 – Coeficiente de carbonatação x teor de cinza volante



Fonte: KHUNTHONGKEAW, TANGTERMSIRIKUL E LEELAWAT (2006).

Os autores chamam atenção para o fato de que, para pequenas quantidades de cinzas volantes e em condições de cura adequada, a reação pozolânica e o enchimento dos poros podem compensar o efeito da baixa reserva alcalina.

Yagüe et. al (2005) estudaram a durabilidade de concretos com adição de lodo de estação de tratamento de águas residuais. Foram moldadas amostras com proporções de 0; 2,5%; 5% e 10% de lodo, sendo mantidas em um ambiente com 20% de dióxido de carbono no ar. As amostras contendo 10% de lodo apresentaram maiores profundidades de carbonatação.

Gruyaert, Van den Heede e De Belie (2013) investigaram a carbonatação em concretos com teores de 50%, 70% e 85% de substituição de cimento por escória de alto-forno, observando que a profundidade de carbonatação aumentava com o aumento do teor de substituição. Os autores atribuíram este aumento na carbonatação às menores quantidades de CH presentes no concreto com a adição de escória.

Frías e Goñi (2013) estudaram a carbonatação acelerada em misturas ternárias de concreto com adição de 10,5% lodo ativado de papel e 10,5% de cinza volante. Os resultados obtidos demonstram que, para um período de exposição de 30 dias a uma concentração de 100% de CO₂, as misturas ternárias apresentaram uma profundidade de carbonatação 2,2 vezes maiores que o concreto de cimento Portland comum.

Leemann et al (2015) estudaram a relação entre a resistência à carbonatação e proporção da mistura em concretos com adição de: a) calcário em pó, b) mistura de calcário em pó com cinza volante de baixo teor de cálcio, c) escória granulada de alto-forno e d) dois tipos de cimento Portland comum. Os autores notaram que, ao aumentar a quantidade de clínquer substituído por adições minerais, a carbonatação aumentava, sendo o concreto com adição de escória o que apresentou os maiores valores.

Kulakowski, Pereira e Dal Molin (2009) estudaram a carbonatação em concretos com adição de sílica ativa. Foram moldados traços de concreto com adição de 5, 10, 15 e 20% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland, além de um traço de referência, sem adição de sílica ativa. Foi observado pelos autores que, para teores de substituições iguais ou inferiores a 10%, mesmo havendo aumento na profundidade de carbonatação, a resistência à corrosão aumentava. Esse efeito é explicado pelo fato de que a adição de sílica ativa, em teores iguais ou inferiores a 10%, gera um refinamento dos poros, tornando-os mais finos, diminuindo a difusão de oxigênio e aumentando a resistividade elétrica, dificultando que as reações de corrosão se iniciem. O refinamento dos poros, neste caso, compensou o consumo de Ca(OH)_2 causado pela reação pozolânica.

4.4.2.4 Teor de hidróxido de cálcio remanescente

Como visto anteriormente, o CH é o principal composto a reagir com CO_2 , durante o processo de carbonatação, dando origem ao carbonato de cálcio. O teor de CH presente na matriz de cimento depende das características do mesmo, presença e tipologia das adições minerais e dosagem do concreto.

Quanto menor a quantidade de CH presente na pasta de cimento, mais rápido o mesmo será consumido pela reação de neutralização, e maior será a velocidade de carbonatação. Este fato foi observado por Hoppe (2008) ao investigar a carbonatação em concretos com adição de cinzas de casca de arroz sem moagem. O autor percebeu que, devido as reações pozolânicas, a quantidade de CH remanescente diminuía com o aumento do teor de cinzas ao concreto, apresentando, como consequência, o aumento dos coeficientes de carbonatação do mesmo.

Borges et al (2010) estudaram a carbonatação do CH e do C-S-H em pastas de cimento contendo altos teores de escória granulada de alto-forno. Os autores notaram que quanto menor a quantidade de CH presente na pasta, antes desta ser submetida à carbonatação, maior era a quantidade de C-S-H carbonatado.

Morandea, Thiéry e Dangla (2014) investigaram os mecanismos de carbonatação do CH e do C-S-H através da combinação de resultados de ensaios destrutivos (pulverização por fenolftaleína, análise termogravimétrica e porosimetria por intrusão de mercúrio) e ensaios não destrutivos (atenuação de raios gama). Os ensaios foram realizados em amostras de pasta de cimento, com relações a/agl de 0,45 e 0,60 e em amostras de argamassa com relação a/agl de 0,50. As amostras foram submetidas a condições aceleradas, com teor de CO₂ de 10%, temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%. Os autores observaram que, para ambos os compostos, a taxa inicial de carbonatação é bastante semelhante, porém, com o tempo, o teor de CH diminui e torna-se menos acessível, desacelerando a carbonatação deste composto.

Hyvert et al (2010) estudaram a dependência entre taxa de carbonatação do C-S-H e pressão do CO₂ (taxas de 0,03%, 10%, 25% e 50% de Patm). Primeiramente, os autores observaram, através do ensaio de intrusão de mercúrio que a porosidade da zona carbonatada diminuía a medida que a pressão de CO₂ aumentava. Através de ensaios de DTA/TG, foi possível observar que esta diminuição da porosidade estava ligada ao aumento da taxa de carbonatação do C-S-H, vinculada ao aumento da pressão do CO₂.

4.4.2.5 Resistência à compressão

O parâmetro mais utilizado por engenheiros e arquitetos na designação de um concreto é a sua resistência à compressão. A resistência à compressão depende diretamente da relação a/agl da mistura e, por consequência, se relaciona de maneira inversa com a carbonatação: quanto maior a resistência à compressão, menor a profundidade de carbonatação.

Esse comportamento foi observado por Rabehi, Mezghiche e Guettala (2013) que estudaram a correlação entre a resistência mecânica e a profundidade de carbonatação. Os autores observaram que a resistência à compressão crescia a

medida que a relação a/agl diminuía e o período de cura aumentava. Comportamento inverso foi observado em relação à profundidade de carbonatação.

Nunes (2014), ao analisar a carbonatação em concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico, observou que, para um mesmo nível de resistência, os coeficientes de carbonatação aumentavam à medida que o teor de adição mineral aumentava. Deste modo, concluiu-se que, ao se analisar a durabilidade da estrutura de concreto, a resistência mecânica não pode ser o único parâmetro a ser observado.

Ao estudar a influência de adições minerais nas características de concretos de alto-desempenho, Shi, Xu e Zhou (2009) correlacionaram a resistência à compressão, a permeabilidade de gases e a carbonatação de concretos com adição de cinza volante e escória granulada de alto-forno. Os autores notaram que a profundidade de carbonatação se correlaciona melhor com a permeabilidade de gases do que com a resistência à compressão do concreto, devido à primeira estar ligada mais aos parâmetros de diâmetro limite e tortuosidade dos poros do que a segunda, que se relaciona mais com a quantidade de poros.

Kirchheim et al (2015) observaram este comportamento ao estudarem a correlação entre a resistência à compressão, a carbonatação e a absorção de água em concretos com cimento branco. A absorção de água, de acordo com os autores, é um melhor parâmetro para se correlacionar com a carbonatação do que a resistência à compressão, devido ao fato da primeira se relacionar a rede de poros, enquanto que a segunda se correlaciona, como já citado anteriormente, com a quantidade de poros.

4.5 CARBONATAÇÃO ACELERADA

4.5.1 Medida da profundidade de carbonatação

Ensaio de acelerados consiste na reprodução, através do uso de câmaras de carbonatação, de um ambiente favorável à ocorrência das reações de carbonatação no concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011). Os autores destacam a importância da realização de um pré-condicionamento antes da exposição dos corpos-de-prova à ação do CO_2 . Este pré-condicionamento, constituído de uma

etapa de pré-secagem e outra de distribuição de umidade, visa a padronização das amostras e da cinética das reações.

Ferreira e Helene (2014) avaliaram a reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada no Brasil, através de um programa interlaboratorial. Foi observada uma grande variabilidade de resultados, atribuída aos diferentes tipos de equipamentos utilizados, assim como a possíveis diferenças na execução do pré-condicionamento.

O procedimento TC 116-PCD da RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur lês Matériaux et les Constructions) é o mais conhecido e aplicado em pesquisas (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Para a mensuração da carbonatação, o método mais conhecido é a aplicação de um indicador de pH, como a fenolftaleína, que se mantém incolor nas regiões em que o pH é inferior à 9,8 e assume uma coloração vermelho-carmim nas regiões em que o pH é superior a este valor (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Figueiredo (2005) e Cascudo e Carasek (2011) destacam ainda outros ensaios para a determinação da profundidade de carbonatação, como a termogravimetria, a difração de raios X, a análise petrográfica, a espectroscopia de infravermelho e, a densimetria por radiação gama, estes ensaios, porém, possuem menor acessibilidade, além de serem mais caros que o indicador de pH.

4.5.2 Determinação do coeficiente de carbonatação

A velocidade de carbonatação é estimada, de acordo com Cascudo e Carasek (2011), através da equação 15, onde e_{CO_2} é a profundidade de penetração do CO_2 (mm), k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação e t é o tempo (anos).

$$e_{CO_2} = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (15)$$

4.5.3 Relação entre ensaios acelerados e naturais

Os ensaios de carbonatação natural consistem na exposição dos corpos-de-prova ao ambiente natural. Da mesma maneira que os ensaios acelerados, a velocidade de carbonatação é afetada pelas condições de exposição e características dos materiais. Os ensaios de carbonatação natural, em relação aos

ensaios acelerados, geram resultados mais próximos da realidade e permitem a avaliação da resistência à carbonatação em condições de campo (FERREIRA; FRÉZ; MEDEIROS, 2013)

Pauletti (2009) destaca que os ensaios naturais, na maioria das vezes, são realizados visando correlacionar os dados obtidos com os dos ensaios acelerados, com o objetivo de prever a profundidade de carbonatação na prática.

Tasca (2014) destaca a dificuldade em comparar os dados obtidos por ensaios acelerados com os dados obtidos por ensaios naturais, em função de o primeiro utilizar teores de CO₂, umidade e temperatura constantes, enquanto no segundo as estruturas de concreto estão expostas à condições ambientais diferentes, variáveis e cíclicas.

Bernal et al (2014) estudaram a carbonatação natural em concretos com escória alcali-ativada. Amostras de concreto foram expostas, durante 7 anos, à um ambiente urbano com umidade relativa entre 70 e 76%, temperaturas entre 19 e 38°C e concentração de CO₂, medida durante os 8 primeiros meses, entre 310 e 410 ppm. As profundidades de carbonatação natural foram, então, comparadas com as profundidades obtidas em um ensaio acelerado, com teor de CO₂ de 1%. Os autores observaram que as profundidades de carbonatação após 7 anos de exposição ambiental, eram muito menores do que os valores previstos pelo ensaio acelerado. Isto foi atribuído às diferenças termodinâmicas entre as condições acelerada e natural, que alteram os processos que controlam a carbonatação.

Possan (2004) estudou a carbonatação, por meio de ensaio acelerado e natural, de concretos com e sem adição de sílica ativa. As amostras apresentavam teores de 0 e 20% de sílica ativa, para relações a/agl de 0,30 e 0,80. Para o ensaio natural, as amostras foram mantidas em ambiente desprotegido durante 7 anos. Já para o ensaio acelerado, as amostras foram expostas à teores de 5% de CO₂ e umidade relativa de 70%, sendo ensaiados à 1, 4, 9 e 14 semanas. Para os concretos com relação a/agl de 0,80, determinou-se que, para as amostras sem adição de sílica ativa, 14 semanas de ensaio acelerado correspondem a 436 semanas (8,3 anos) de exposição natural. Já para as amostras com adição de 20% de sílica ativa, 14 semanas de ensaio acelerado correspondem a 497 semanas (9,5 anos) de exposição natural.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia utilizada nesta pesquisa objetiva a análise do comportamento de concretos com e sem adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) frente ao fenômeno da carbonatação. Para tal, foram moldados corpos-de-prova de concreto com diferentes teores de substituição e relações água/aglomerante, submetidos a dois períodos de cura.

Os corpos-de-prova de concreto, destinados ao ensaio de carbonatação acelerada, foram moldados de acordo com os seguintes parâmetros:

- a) substituição do cimento Portland por CLETA, nas proporções de 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%;
- b) relações água/aglomerante (a/agl) de 0,35; 0,50 e 0,65;
- c) períodos de cura úmida de três e sete dias;

As profundidades de carbonatação foram determinadas nas idades de 4, 8, 12 e 16 semanas de exposição, em câmara de carbonatação, dos corpos-de-prova ao CO₂.

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, Rio Grande do Sul (RS).

5.2 MATERIAIS

As misturas realizadas nesta pesquisa, com suas respectivas nomenclaturas, encontram-se listadas a seguir:

- a) mistura de referência (REF), cujo único aglomerante é o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI);
- b) mistura com adição de 5% de CLETA (5L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI);
- c) mistura com adição de 10% de CLETA (10L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI);
- d) mistura com adição de 15% de CLETA (15L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI);
- e) mistura com adição de 20% de CLETA (20L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI);

- f) mistura com adição de 25% de CLETA (25L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI);
- g) mistura com adição de 30% de CLETA (30L) em substituição ao cimento Portland (CP V – ARI).

As misturas testadas nesta pesquisa são apresentadas, de maneira simplificada, na tabela 3, em função do tipo e proporção de aglomerante utilizado.

Tabela 3 – Proporção de cimento Portland e CLETA em cada mistura testada

Nomenclatura das misturas	Proporção dos aglomerantes (%)	
	CP V - ARI	CLETA
REF	100	-
5L	95	5
10L	90	10
15L	85	15
20L	80	20
25L	75	25
30L	70	30

Fonte: Autor

Cada uma das misturas contou com três relações água/aglomerante (a/agl) distintas: 0,35; 0,50 e 0,65. Os corpos-de-prova de concreto foram submetidos a períodos de 3 e 7 dias de cura úmida.

As misturas realizadas nesta pesquisa possuem as mesmas proporções das realizadas por Hengen (2014).

5.2.1 Aglomerantes

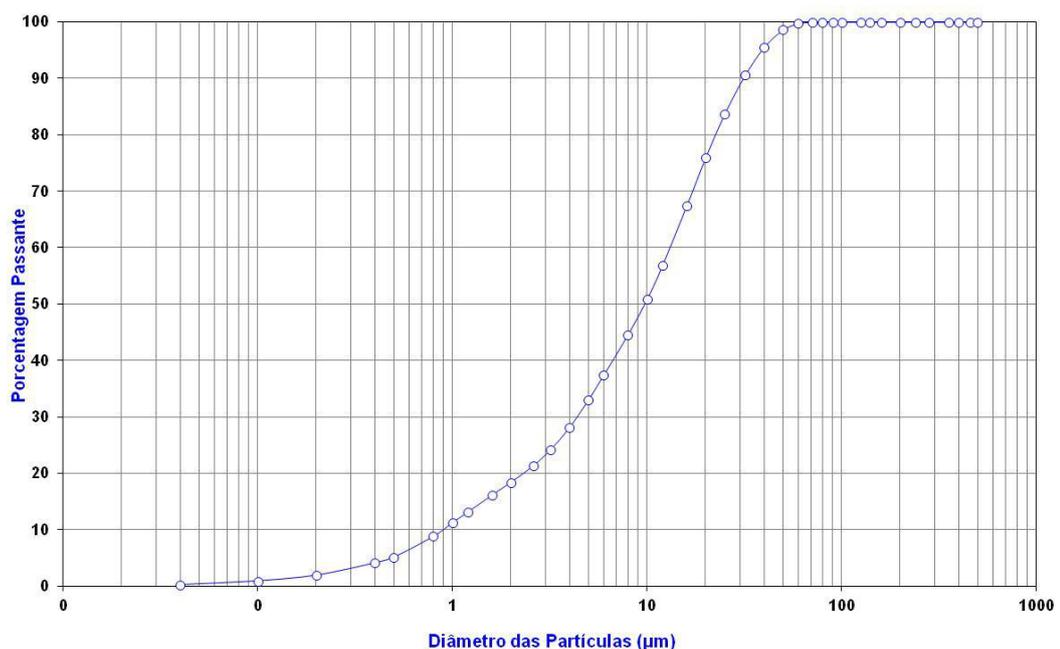
Foram utilizados, neste experimento, dos materiais como aglomerantes: o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI) e as cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA). O cimento foi fabricado em indústria nacional, em conformidade com a NBR 5733 (1991). O lodo era proveniente da cidade de Venâncio Aires, RS, sob responsabilidade da Companhia Riograndense de Abastecimento (CORSAN). A cinza lodo foi obtida pela calcinação à 600°C do lodo *in natura* durante o período de 1 hora e com posterior moagem durante o período de 2 horas, de acordo com o determinado por Hengen (2014).

As características físicas e químicas dos aglomerantes foram determinadas por ensaios, realizados de acordo com as seguintes normas:

- a) NBR 11579 (ABNT, 1991b): Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- b) análise química: NBR NM 10 (ABNT, 2004a), 11-1 (ABNT, 2004b), 12 (ABNT, 2004c), 13 (ABNT, 2004d), 14 (ABNT, 2004e), 15 (ABNT, 2004f), 16 (ABNT, 2004g), 17 (ABNT, 2004h), 18 (ABNT, 2004i), 19 (ABNT, 2004j), 21 (ABNT, 2004j);
- c) distribuição granulométrica a laser: Associação Brasileira de Cimento Portland, SP (ABCP/SP);
- d) NBR NM 23 (ABNT, 2001a): Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica;
- e) NBR NM 43 (ABNT, 2002): Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
- f) NBR NM 65 (ABNT, 2003d): Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- g) NBR NM 76 (ABNT, 1998): Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

A distribuição granulométrica a laser do cimento Portland está apresentada na figura 14.

Figura 14 – Distribuição granulométrica a laser do cimento Portland



Fonte: Autor.

As características mecânicas do cimento são apresentadas na tabela 4. Nas tabelas 5 e 6 são apresentadas, respectivamente, as características físicas e a composição química do cimento e do lodo de ETA.

Tabela 4 – Características mecânicas do cimento

Classificação NBR 5733	CP V - ARI
Resistência à compressão axial (NBR 7215)	(MPA)
1 dia	10,9
3 dias	24,6
7 dias	35,5
28 dias	43,9
Tempo de pega	
Início de pega (min.)	185
Fim de pega (min.)	300

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Características físicas do cimento e da CLETA

Características físicas	CP V - ARI	CLETA
Massa específica (g/cm ³)	3,13	2,56
Finura #0,075 mm	0,82	-
Superfície específica BET (m ² /g)	1,14	27,7

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Composição química do cimento e da CLETA

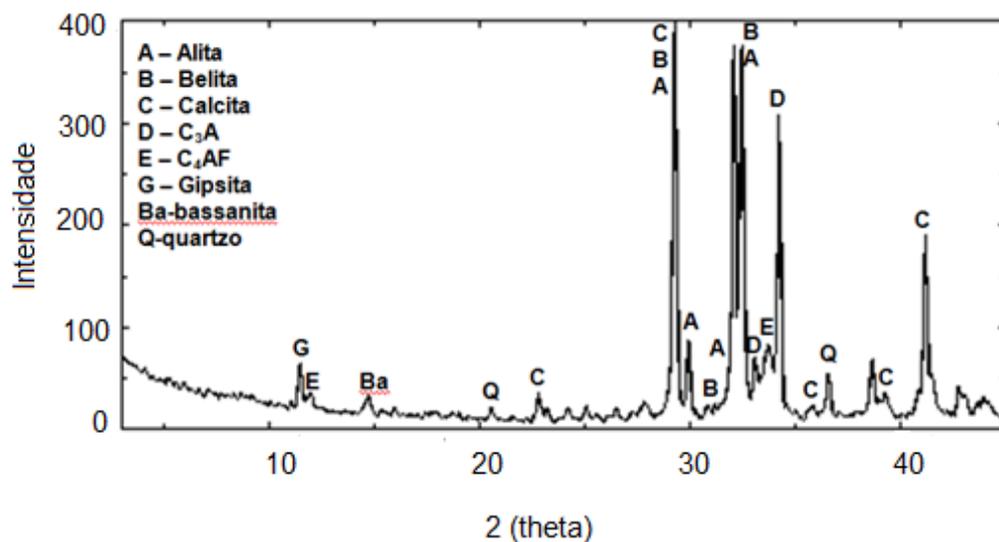
Composição química	% em massa dos materiais	
	CP V - ARI	LETA
SiO ₂	20,4	66,2
Al ₂ O ₃	4,37	17,7
Fe ₂ O ₃	2,64	8,76
CaO	62,9	0,57
MgO	2,7	0,96
SO ₃	2,2	-
Na ₂ O	0,13	0,32
K ₂ O	0,95	1,16
MnO	< 0,10	0,13
TiO ₂	0,29	0,86
P ₂ O ₅	< 0,10	0,33
Perda ao fogo	3,16	3,37

Fonte: Autor.

Hengen (2014) avaliou a atividade pozolânica, de acordo com a NBR 5752/2014, para argamassas com adição de 25% de CLETA. Foram ensaiadas CLETAS com diferentes temperaturas de calcinação (400°C, 500°C, 600°C e 700°C) durante 1 e 2 horas. Foi ensaiada, também, uma CLETA calcinada à 700°C durante meia hora. A CLETA calcinada à 600°C durante 1 hora apresentou o melhor resultado, levando-se em conta a questão econômica, com pozolanicidade equivalente a 120% da resistência à compressão relativa do cimento de referência.

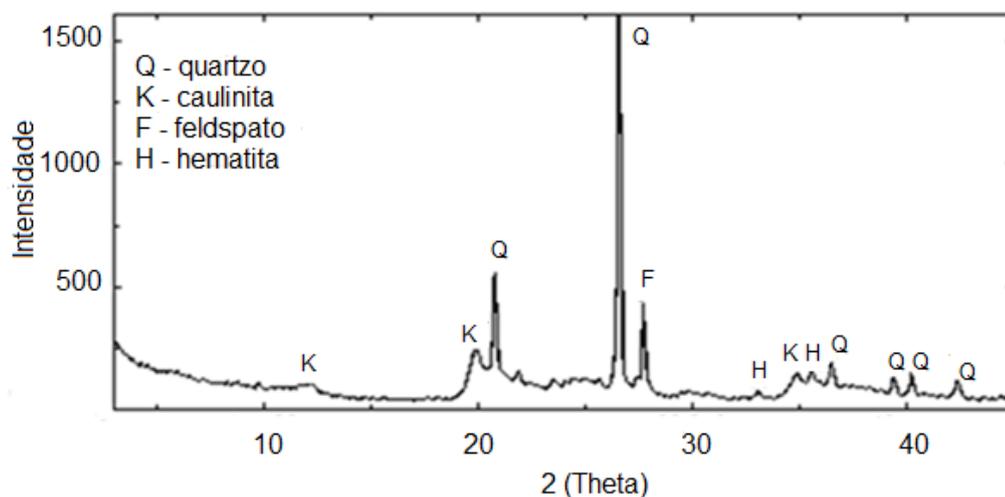
Nas figuras 15 e 16 são apresentados, respectivamente, os difratogramas de raios-X das amostras de cimento Portland e de cinzas de lodo de ETA.

Figura 15 – Difratograma de raios-X do cimento Portland



Fonte: HENGGEN (2014).

Figura 16 – Difratograma de raios-X da CLETA



Fonte: HENGGEN (2014).

5.2.2 Agregados

Foi utilizada, como agregado miúdo, uma areia natural quartzosa encontrada na região de Santa Maria, RS. O material foi lavado, visando a remoção de impurezas que poderiam prejudicar a qualidade do concreto. Após a lavagem, o material foi encaminhado para uma estufa, com temperatura entre 105°C e 110°C, com o objetivo de remover a umidade.

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada originária de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara – RS. O material foi lavado, com o objetivo de remoção de impurezas que poderiam afetar a qualidade do concreto, sendo, posteriormente, seco, visando a remoção da umidade.

Para a obtenção das características físicas dos agregados, as seguintes normas foram consultadas:

- a) NBR NM 26 (ABNT, 2001b): Agregados – Amostragem;
- b) NBR NM 52 (ABNT, 2003b): Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- c) NBR NM 53 (ABNT, 2003c): Agregado graúdo – Determinação de massa específica aparente e absorção de água;
- d) NBR NM 248 (ABNT, 2003e): Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro;
- e) NBR NM 45 (ABNT, 2006c): Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

São apresentadas, na tabela 7, as características físicas dos agregados.

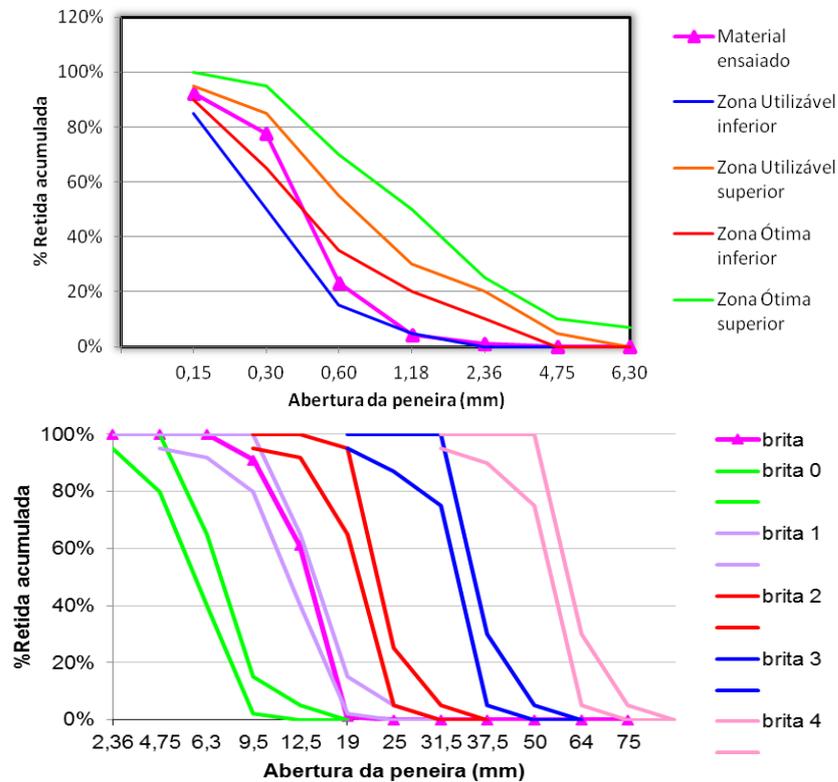
Tabela 7 – Características físicas dos agregados

Grandeza física	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	1,85	6,92
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	19,0
Massa específica (kg/dm ³)	2,65	2,48
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1,62	1,38
Absorção de água (%)	-	2,01
Índice de forma	-	2,23

Fonte: Autor.

A figura 17 representa as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente, sendo o primeiro uma areia média e o segundo uma brita 1.

Figura 17 – Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo



Fonte: HENGEN (2014).

5.2.3 Água

Na moldagem dos corpos de prova foi utilizada água proveniente dos poços artesianos, os quais abastecem todo o campus da UFSM. No ensaio de carbonatação acelerada, foi utilizada água destilada para a confecção da solução com fenolftaleína.

5.2.4 Aditivos

Com o objetivo de manter consistência constante em todas as misturas moldadas, com abatimento de 100 ± 10 mm, foi utilizado um aditivo químico plastificante de pega normal, com dosagem recomendada pelo fabricante de 0,2% a 1,0% da massa de aglomerante.

Quando o abatimento desejado não foi atingido com o uso do aditivo plastificante, se utilizou um aditivo superplastificante sintético com base de polímeros policarboxilatos, com dosagem recomendada pelo fabricante de 0,2% a 5,0% da massa total de aglomerante.

5.2.5 Gás carbônico

O gás carbônico foi fornecido pela empresa White Martins.

5.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem dos concretos seguiu os procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992), sendo utilizado um teor ótimo de argamassa de 51% em massa de materiais secos. A fim de manter este valor constante, fez-se necessária uma compensação no teor de agregados miúdos, já que a massa específica da CLETA ser menor que a do cimento.

Foram utilizadas três relações a/agl (0,35; 0,50 e 0,65) visando a obtenção de curvas que indicassem a influência dos diferentes aglomerantes no concreto.

A tabela 8 apresenta o consumo de materiais, por m³ de concreto, que foram utilizados na pesquisa.

Tabela 8 – Consumo de materiais por m³ de concreto

Mist.	Relação a/agl	Materiais em kg/m ³							
		Agl	CP	CLETA	Areia	Brita	Água	Plast.	Super.
REF	0,35	484	484	0	629	1069	169	1,46	-
	0,50	357	357	0	736	790	179	-	-
	0,65	283	283	0	800	624	184	-	-
5L	0,35	484	460	24	620	1069	169	1,94	-
	0,50	357	340	17	733	790	179	-	-
	0,65	283	269	14	795	624	184	-	-
10L	0,35	484	436	48	620	1069	169	4,84	1,45
	0,50	357	322	35	729	790	179	-	-
	0,65	283	254	29	794	624	184	-	-
15L	0,35	484	412	72	615	1069	169	4,84	1,93
	0,50	358	304	54	726	790	179	0,36	-
	0,65	283	240	43	792	624	184	-	-
20L	0,35	484	388	96	610	1069	169	4,84	2,17
	0,50	357	286	71	725	790	179	1,07	-
	0,65	283	226	57	792	624	184	-	-
25L	0,35	484	363	121	606	1069	169	4,84	2,41
	0,50	357	268	89	722	790	179	1,43	-
	0,65	283	212	71	789	624	184	-	-
30L	0,35	484	339	145	606	1069	169	4,84	3,13
	0,50	357	250	107	718	790	179	3,21	-
	0,65	283	198	85	787	624	184	0,71	-

Fonte: Autor.

5.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada, corpos-de-prova cilíndricos foram moldados, de acordo com as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram moldados corpos-de-prova para cada relação a/agl e períodos de cura das misturas realizadas nesta pesquisa. A tabela 9 apresenta as características referentes à moldagem dos corpos-de-prova.

Tabela 9 – Características referentes à moldagem dos corpos-de-prova

Ensaio	Idade de ensaio (dias)	Dimensão do CP (cm)	Vibração (camadas)
Carbonatação Acelerada	119, 147, 175 e 203	φ10x20	2

Fonte: Autor.

O adensamento foi realizado por vibração, em mesa vibratória, de duas camadas aproximadamente iguais por um período de 30 segundos cada.

A consistência, para todas as misturas ensaiadas, foi fixada em 100 ± 10 mm, valor este obtido através do ensaio de abatimento de tronco de cone, regido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A ordem de colocação dos materiais na betoneira, bem como os respectivos tempos de mistura, está exposta na tabela 10, de acordo com o proposto por Hoppe (2005).

Tabela 10 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira

Ordem de colocação dos materiais	Duração (min)
100% do agregado graúdo + 60% da água	1
100% do aglomerante + 100% de aditivo + 20% da água	1
100% do agregado miúdo + 20% da água	3

Fonte: adaptado de Hoppe (2005).

A temperatura do concreto fresco foi fixada em (19 ± 1) °C, sendo obtida através da equação 16, proposta por Mehta e Monteiro (2014), que leva em conta a temperatura dos agregados, do aglomerante e da água.

$$T = \frac{0,22(T_m M_m + T_c M_c) + T_a M_a}{0,22(M_m + M_c) + M_a} \quad (16)$$

Onde:

- T: temperatura da massa de concreto (°C);
- T_m: temperatura dos agregados (°C);
- T_c: temperatura do aglomerante (°C);
- T_a: temperatura da água (°C);
- M_m: massa de agregados (kg);
- M_c: massa de aglomerante (kg);
- M_a: massa de água (kg).

Um termômetro digital foi utilizado para a obtenção das temperaturas dos materiais e, com o uso da fórmula acima, a temperatura da água foi corrigida, visando manter o concreto fresco com a temperatura fixada anteriormente.

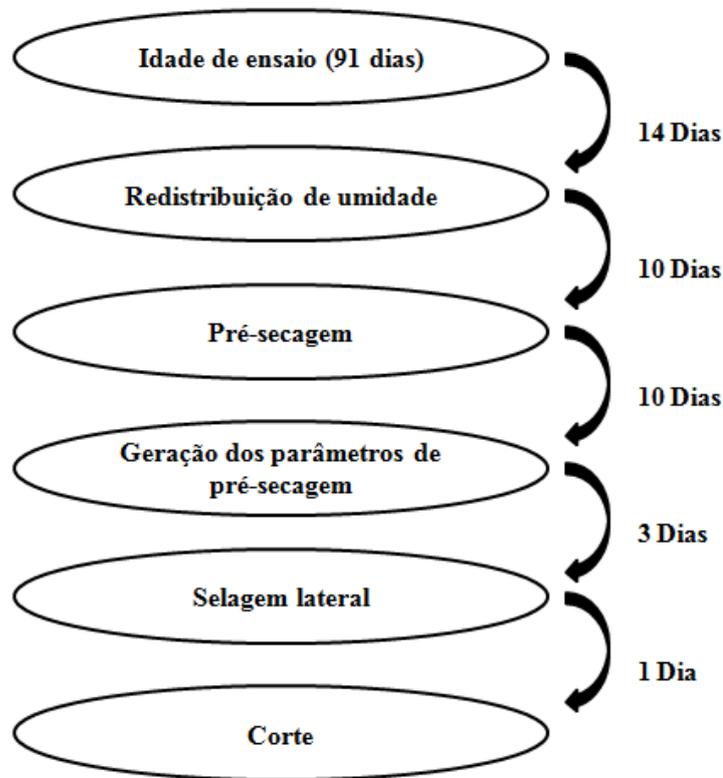
Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por um período de 24 horas após a moldagem. Posteriormente, os corpos-de-prova foram imersos em uma caixa d'água saturada com cal, sendo mantidos na mesma até o término do período de cura predeterminado (três e sete dias). Passado o período destinado à cura úmida, os corpos-de-prova foram encaminhados para uma sala climatizada (temperatura de 23°C ± 1 °C e U.R. de 75% ± 2%) sendo mantidos na mesma até o período de ensaio.

5.5 CARBONATAÇÃO ACELERADA

O ensaio de carbonatação acelerada visa a determinação das profundidades e coeficientes de carbonatação. Para tal, foram seguidas as orientações prescritas na norma RILEM TC 116-PCD (1999), a qual recomenda a realização de um pré-condicionamento dos corpos-de-prova, com o objetivo de dotá-los de uma concentração de umidade equilibrada (75% ± 2%) em um ambiente aéreo, com temperatura de (23°C ± 2°C) e com distribuição uniforme de umidade.

O pré-condicionamento dos corpos-de-prova é constituído de diversas etapas, com prazos obtidos de maneira retroativa a partir da idade de ensaio, de 91 dias, como sugerido por Frizzo (2001). As etapas e seus respectivos prazos estão representados na figura 18.

Figura 18 – Etapas e prazos do pré-condicionamento



Fonte: Autor.

Foram considerados, também, mais quatro dias destinados a possíveis imprevistos, sendo estes acrescentados, quando não necessários, à etapa de redistribuição de umidade.

Após o término do período de cura (três e sete dias) os corpos-de-prova foram encaminhados para ambiente climatizado, com temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $75 \pm 2\%$, onde permaneceram pelo período de 49 dias.

Passado este período, os corpos-de-prova foram, então, cortados em duas fatias cilíndricas, com dimensões aproximadas de 10x10 cm (diâmetro x altura), sendo devidamente identificados.

Um dia após o corte, as fatias tiveram as suas superfícies laterais, assim como uma de suas faces, seladas com três demãos de verniz poliuretânico sendo, então, encaminhadas novamente para ambiente climatizado. A selagem não foi realizada nos corpos-de-prova destinados à geração dos parâmetros de pré-secagem.

A geração dos parâmetros de pré-secagem teve início três dias após a realização da selagem e seguiu os procedimentos recomendados pela RILEM TC 116 – PCD (1999).

- a) inicialmente, uma das fatias foi pesada, obtendo-se o seu peso inicial (m_0);
- b) a fatia foi encaminhada para uma estufa (temperatura de 105°C), sendo pesada a intervalos de 24 horas, até que a mesma atingisse um peso constante ($\pm 0,5$ g) entre duas pesagens consecutivas. Foi obtido, dessa maneira, o peso seco da fatia (m_d);
- c) a outra fatia foi moída e peneirada nas peneiras # 6,3 mm e # 2,4 mm. Os grãos retidos na primeira foram moídos e peneirados novamente, enquanto que os grãos retidos na segunda foram selecionados. O material passante na peneira # 2,4 mm foi descartado;
- d) foram selecionados, aproximadamente, 500 g do material moído, sendo este devidamente pesado, obtendo-se o seu peso inicial;
- e) o material foi encaminhado para uma câmara climática da marca Caron, modelo 6034 (temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $75 \pm 2\%$). Este material foi pesado a intervalos de 24 horas, até que atingisse uma diferença de peso máxima de 0,1g, entre duas pesagens consecutivas. Dessa maneira, foi obtido o peso em equilíbrio de umidade relativa do ar de 75% (m_{e75});
- f) a amostra foi encaminhada para uma estufa (temperatura de 105°C) sendo pesada a intervalos de 24 horas, até que uma diferença de peso de 0,1g entre duas pesagens consecutivas fosse atingida. Assim, obteve-se o peso seco da amostra moída (m_{d75});
- g) os valores obtidos através dos itens **a** e **b** foram aplicados nas equações 17, 18 e 19, obtendo-se, desse modo, o conteúdo total de água evaporável (W_e) e a concentração de água evaporável (w_e);

$$W_e = \frac{W_e}{md} \quad (17)$$

$$W_e = m_0 - m_d \quad (18)$$

$$W_e = \frac{(m_0 - m_d)}{m_d} \quad (19)$$

h) os valores obtidos nos itens **c** e **d** foram aplicados nas equações 20, 21 e 22, obtendo-se, para a umidade relativa de 75%, o conteúdo de água evaporável (W_{e75}) e a concentração de umidade de equilíbrio (w_{e75});

$$w_{e75} = \frac{W_{e75}}{m_{d75}} \quad (20)$$

$$W_{e75} = m_{e75} - m_{d75} \quad (21)$$

$$w_{e75} = \frac{(m_{e75} - m_{d75})}{m_{d75}} \quad (22)$$

i) aplicando-se os valores encontrados nos itens **e** e **f** na equação 23, foi obtida a variação de peso (Δm) que corresponde à perda de umidade da fatia descrita no item **a**;

$$\Delta m = \left[\frac{(w_e - w_{e75})}{(1 + w_e)} \right] \cdot m_0 \quad (23)$$

j) em seguida, todas as fatias foram pesadas e, com o uso de uma regra de três, obteve-se o valor de Δm para cada uma. As fatias foram encaminhadas para uma estufa (temperatura de 50°C) e pesadas em intervalos sucessivos, até que apresentassem uma perda de peso corresponde ao seu respectivo Δm . Desse modo, todas as fatias atingiram o teor de umidade de 75%, com uma tolerância de 5% de variação para Δm , obtida pela equação 24.

$$\left[\frac{\Delta m_{obs} - \Delta m_{calc}}{\Delta m_{calc}} \right] < 0,05 \quad (24)$$

Atingida a perda de peso calculada, as amostras foram encaminhadas para uma estufa (temperatura de 50°C) com o objetivo de se realizar a redistribuição de umidade para que, assim, todas as fatias apresentassem um teor de umidade constante de 75%.

Para evitar que ocorressem perdas de umidade para o exterior, as amostras foram envolvidas por duas camadas de filme de PVC, inseridas dentro de dois sacos

plásticos e, por fim, seladas em embalagens iguais às de café, material que demonstrou ser o mais eficaz.

As amostras foram mantidas nessa situação até um dia antes do ensaio, sendo transferidas para a sala climatizada onde ficaram até o momento de serem encaminhadas para a câmara de carbonatação.

Foi utilizada uma câmara de carbonatação da marca Caron, modelo 6034. Os parâmetros de ensaio foram:

- a) Concentração de 3% de dióxido de carbono (CO₂);
- b) Temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- c) Teor de umidade de $75 \pm 2\%$.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado nas idades de 4, 8, 12 e 16 semanas, contando-se a partir da idade de entrada das amostras na mesma (91 dias após a moldagem).

Em cada idade, foram ensaiadas duas amostras de 10 x 10 cm (diâmetro x altura) para cada relação a/agl (0,35; 0,50 e 0,65) para dois períodos de cura (três e sete dias).

O ensaio consiste na retirada das amostras da câmara de carbonatação e no rompimento das mesmas, diametralmente. Como foram utilizadas duas amostras por idade, para um mesmo período de cura, obtiveram-se, após o rompimento, quatro superfícies carbonatadas.

Foi aspergida, na superfície carbonatada, uma solução de 1% de fenolftaleína, 29% de água destilada e 70% de álcool absoluto. A fenolftaleína, quando em contato com valores de pH acima de 9, sofre uma mudança na coloração, tornando-se vermelho carmim. Para pH inferior a 9, a mesma se mantém incolor.

Com o auxílio de uma câmera digital, foram tiradas fotos das amostras que, após digitalizadas e colocadas em escala, através do *software* AutoCAD, permitiram que o contorno da superfície carbonatada fosse realizado.

O contorno da superfície carbonatada foi dividido em linhas espaçadas de 1mm entre si. Com o uso de uma rotina chamada COTA, a altura de cada uma das divisões foi medida, sendo gerado, automaticamente, um arquivo em formato Excel, a partir do qual foram gerados os valores que permitiram a obtenção das profundidades médias de carbonatação, através da análise estatística.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, os resultados obtidos através dos ensaios realizados serão analisados e discutidos. Primeiramente, serão apresentadas as profundidades de carbonatação obtidas através do ensaio acelerado. A partir destes valores, serão determinados os coeficientes de carbonatação de cada mistura investigada.

A análise do comportamento frente à carbonatação dos concretos com adição de CLETA será realizada de acordo com os seguintes parâmetros:

- a) influência do teor de adição de CLETA;
- b) influência do período de cura;
- c) influência da relação água/aglomerante;

Os valores de profundidades e coeficientes de carbonatação serão relacionados com os resultados obtidos pelos ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio e Termogravimetria, realizados por Stein (2016), em pastas de cimento com adição de CLETA, nas mesmas condições desta pesquisa.

Por fim, os valores de profundidades e coeficientes de carbonatação serão analisados em igualdade de resistência, a partir dos valores de resistência à compressão, obtidos por Hengen (2014), para concretos com teores de CLETA de 0, 5%, 10%, 15% e 20%, moldados com os mesmos materiais e nas mesmas condições dos concretos moldados nesta pesquisa.

6.2 PROFUNDIDADES E COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO

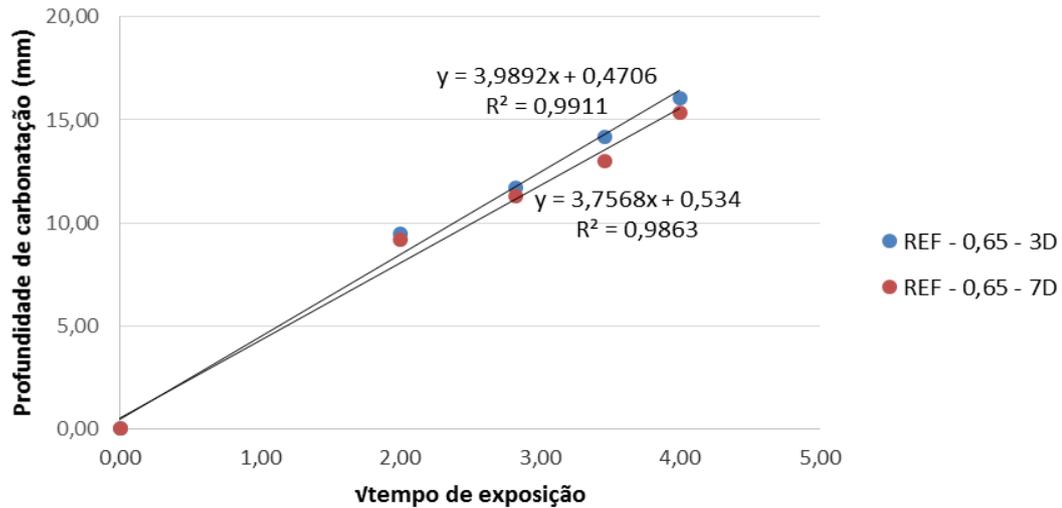
A tabela 11 apresenta, para todas as misturas investigadas, os valores das profundidades de carbonatação, obtidas através do ensaio acelerado, e dos coeficientes de carbonatação, obtidos pela inclinação da reta da regressão linear das profundidades de carbonatação em função do tempo, conforme figura 19.

Tabela 11 – Profundidades e coeficientes de carbonatação

Mistura	Cura (dias)	Rel. a/agl	Prof. de carbonatação (mm)				Kc (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)
			4 sem	8 sem	12 sem	16 sem	
REF	3	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	5,44	7,07	9,68	10,97	2,74
		0,65	9,46	11,68	14,19	16,06	3,99
	7	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	4,77	6,81	8,46	9,93	2,47
		0,65	9,18	11,30	13,00	15,37	3,76
5L	3	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	6,50	8,82	10,92	12,67	3,15
		0,65	9,77	12,82	15,84	17,89	4,48
	7	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	5,84	8,39	9,84	10,92	2,78
		0,65	9,43	11,93	13,84	16,24	3,99
10L	3	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	7,32	9,42	11,86	13,71	3,39
		0,65	10,44	13,72	16,41	18,91	4,70
	7	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10*
		0,50	6,56	8,71	10,32	12,23	3,01
		0,65	10,15	13,31	14,77	17,75	4,34
15L	3	0,35	1,01	1,23	6,12	7,99	1,89
		0,50	8,13	10,19	13,90	15,38	3,86
		0,65	10,85	14,07	17,73	19,60	4,94
	7	0,35	0,58	0,83	4,31	6,27	1,44
		0,50	7,99	9,98	12,46	13,58	3,42
		0,65	10,26	13,97	15,16	18,22	4,48
20L	3	0,35	3,23	4,40	6,69	8,53	2,05
		0,50	9,13	11,32	14,64	16,73	4,14
		0,65	11,33	15,04	18,91	20,81	5,26
	7	0,35	2,29	3,10	5,60	7,21	1,72
		0,50	8,32	10,51	14,04	15,27	3,86
		0,65	10,48	14,59	16,48	19,07	4,76
25L	3	0,35	4,96	6,29	7,20	9,12	2,18
		0,50	9,95	13,38	15,28	17,55	4,38
		0,65	12,56	17,74	20,21	22,31	5,68
	7	0,35	3,71	4,72	6,34	8,08	1,93
		0,50	8,49	12,50	14,54	16,44	4,16
		0,65	11,43	15,43	18,78	20,71	5,24
30L	3	0,35	6,81	8,32	9,80	10,68	2,69
		0,50	12,37	16,06	18,26	20,37	5,12
		0,65	15,05	22,10	26,80	30,49	7,69
	7	0,35	5,67	6,99	8,46	9,99	2,44
		0,50	11,23	15,30	16,71	19,40	4,83
		0,65	14,44	19,92	24,32	28,10	7,01

* $k_c \leq 0,10$ mm/ $\sqrt{\text{semana}}$

Figura 19 – Determinação do coeficiente de carbonatação.

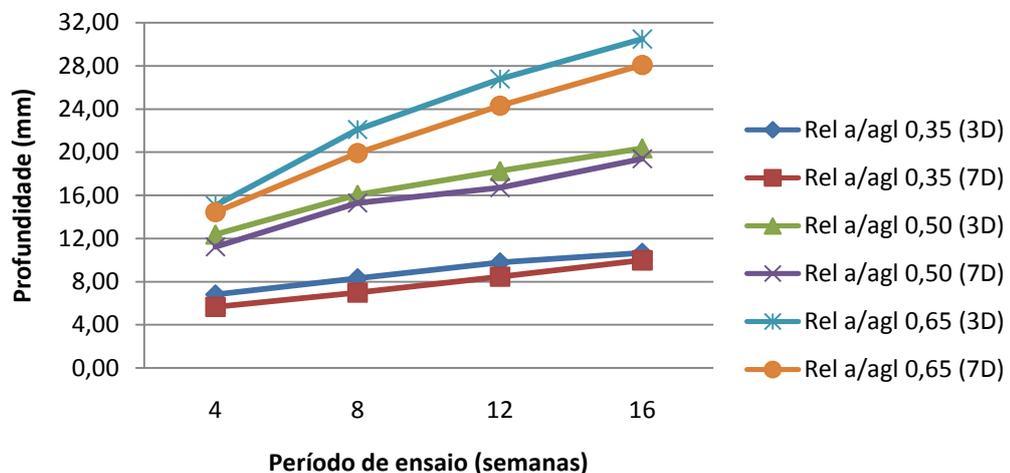


Fonte: Autor.

As misturas REF, 5L e 10L, com relação a/agl de 0,35, não apresentaram profundidades de carbonatação mensuráveis pela metodologia adotada nesta pesquisa. Em função disso, adotou-se o valor de 0,10 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ para o coeficiente de carbonatação destas amostras.

Nota-se que, para uma mesma mistura, a profundidade de carbonatação aumenta à medida que o tempo de exposição é acrescido. Isto pode ser observado na figura 20, que representa o aumento da profundidade de carbonatação da mistura 30L, em função do período de exposição.

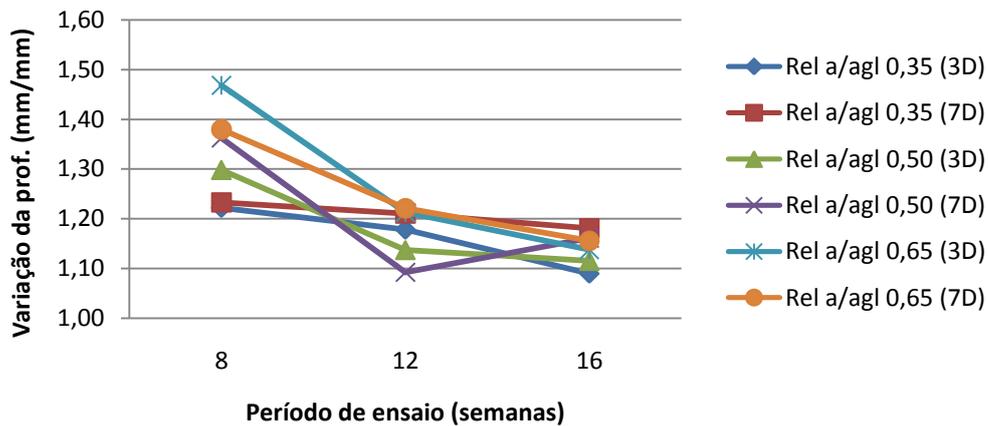
Figura 20 – Profundidade de carbonatação VS período de exposição, para a mistura 30L



Fonte: Autor.

Com o aumento do período de exposição, as misturas apresentaram uma diminuição na taxa de crescimento da profundidade de carbonatação, como pode ser observado na figura 21, para a mistura 30L.

Figura 21 – Variação da profundidade de carbonatação, para a mistura 30L



Fonte: Autor.

Esse efeito pode ser atribuído à formação de carbonato de cálcio, em função das reações de carbonatação, que resulta na colmatação dos poros, dificultando a difusão do CO_2 e diminuindo a velocidade de carbonatação.

6.2.1 Influência da relação a/agl

São representados, nas figuras 22 e 23, os valores das profundidades e coeficientes de carbonatação das misturas investigadas, em função das relações a/agl utilizadas.

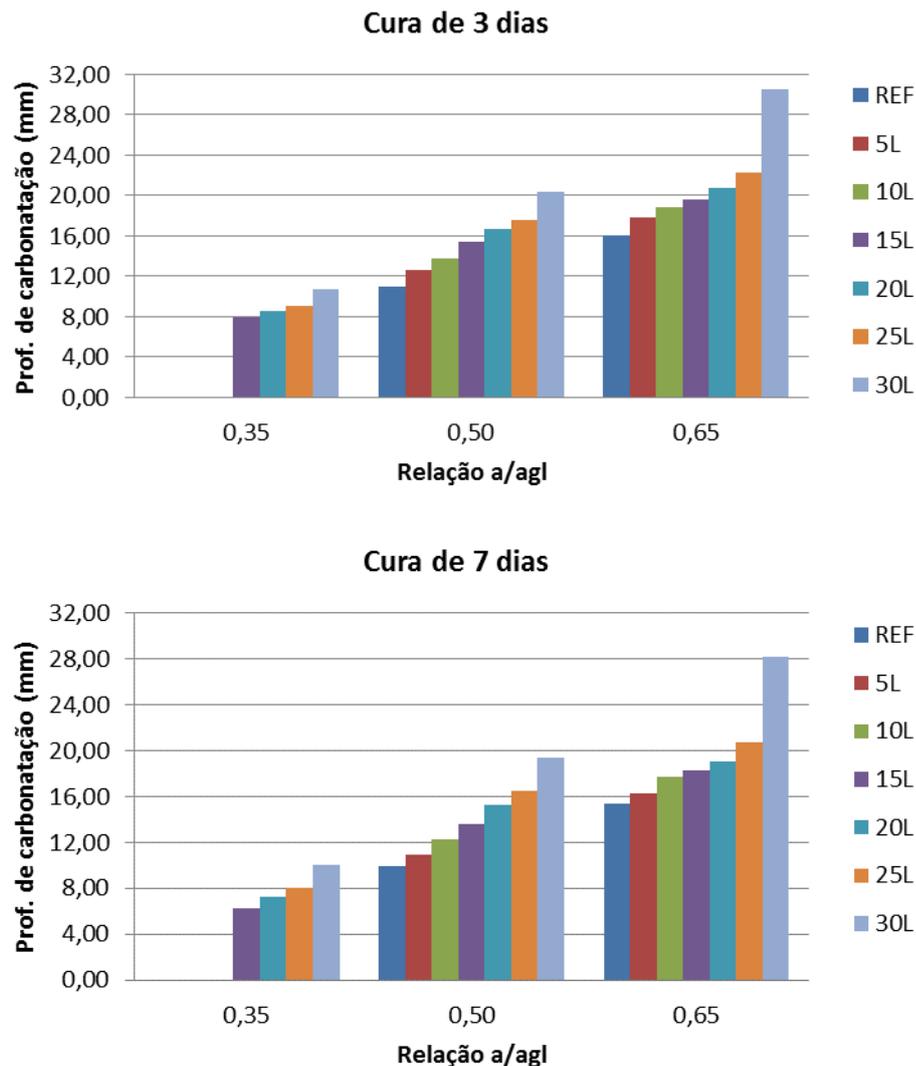
Pela análise das figuras, nota-se que a intensidade da carbonatação aumenta junto com a relação a/agl. Isto ocorre porque a relação a/agl tem influência direta na porosidade da matriz de cimento, ou seja, quanto maior a quantidade de água, maior será a quantidade de poros, conectividade e tortuosidade da rede porosa, facilitando a penetração e difusão do CO_2 , promovendo, dessa maneira, uma carbonatação mais acentuada.

As misturas REF, 5L e 10L, com relação a/agl de 0,35, não apresentaram carbonatação mensurável pelo método adotado nesta pesquisa, sendo adotado, para o coeficiente de carbonatação, o valor de $0,10 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. Estas misturas apresentaram reduções aproximadas nos seus respectivos coeficientes de

carbonatação, quando a relação a/agl passou de 0,65 para 0,50, sendo, em média, de 29,63% para as amostras com cura de 3 dias e de 31,76% para as amostras com cura de 7 dias.

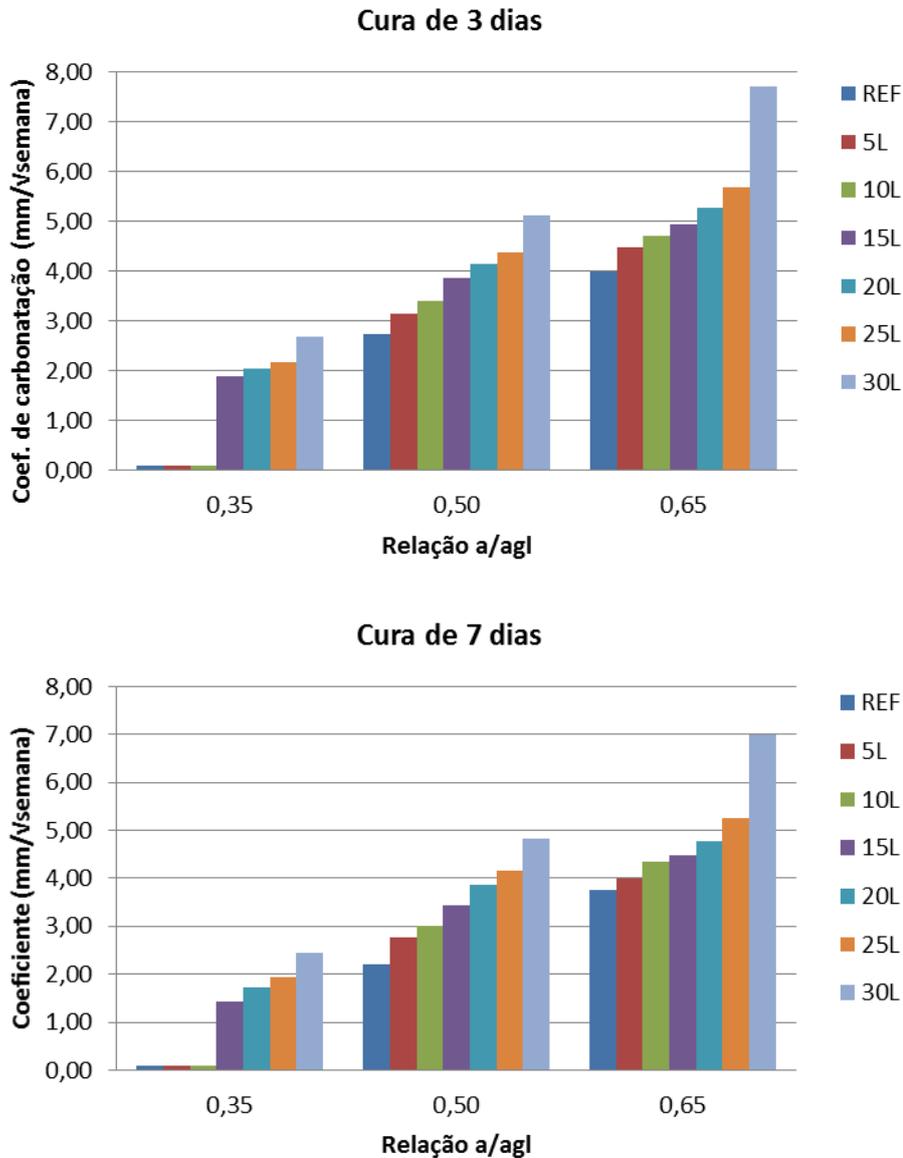
As misturas 15L, 20L e 25L também apresentaram comportamento parecido entre si, no que se refere à variação do coeficiente de carbonatação. Quando a relação a/agl passou de 0,50 para 0,35, as amostras apresentaram reduções médias de 22,01% para amostras submetidas à 3 dias de cura e 21,06% para amostras submetidas a 7 dias de cura. Quando a relação a/agl passou de 0,65 para 0,50, as amostras apresentaram, para os períodos de 3 e 7 dias de cura, reduções médias de 50,58% e 55,65%, respectivamente.

Figura 22 – Profundidade de carbonatação VS relação a/agl das amostras com período de exposição de 16 semanas



Fonte: Autor.

Figura 23 – Coeficiente de carbonatação VS relação a/agl das amostras com período de exposição de 16 semanas



Fonte: Autor.

A mistura 30L apresentou, quando a relação a/agl passou de 0,50 para 0,35, reduções de 47,46%, para amostras curadas por 3 dias, e 49,48% para amostras curadas por 7 dias. Quando a relação a/agl passou de 0,65 para 0,50, reduções de 33,42% e 31,10% foram observadas para as amostras curadas por, respectivamente, 3 e 7 dias.

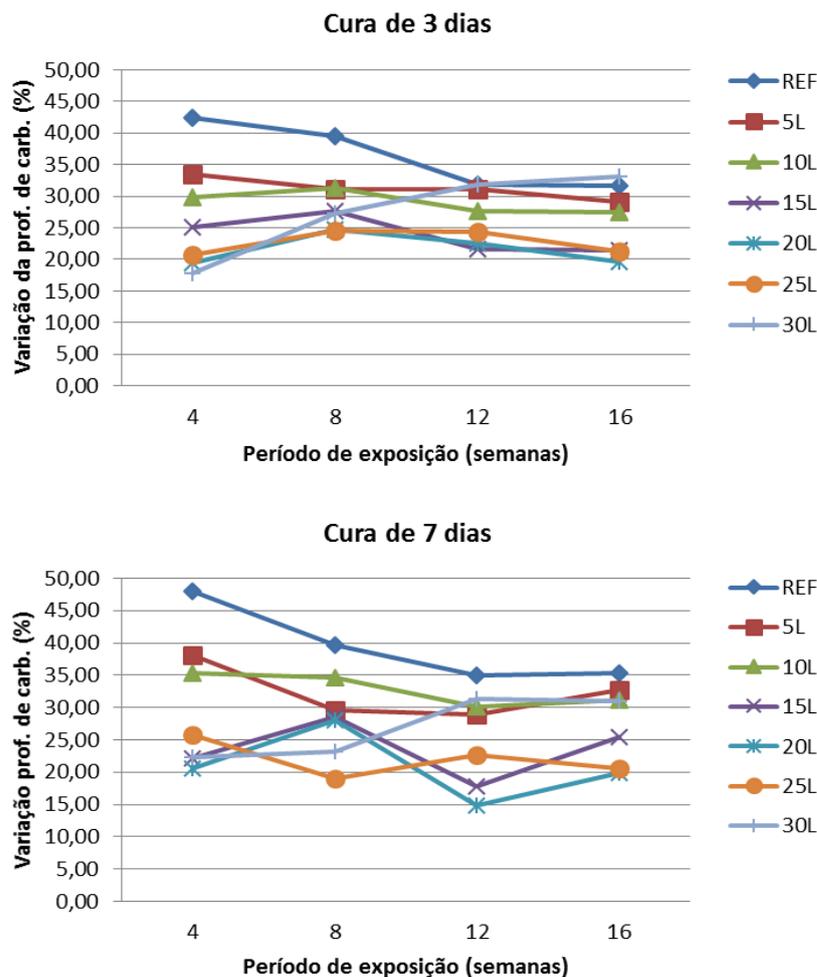
As misturas 15L, 20L, 25L e 30L, curadas durante 7 dias, apresentaram reduções do coeficiente de carbonatação menores do que as misturas curadas por 3 dias. Isso pode ser explicado pelo fato de a cura prolongada promover melhorias na microestrutura do concreto, dificultando a penetração do CO₂ e, em consequência,

diminuindo a velocidade de carbonatação. Dessa maneira, as misturas curadas por 7 dias apresentaram menor sensibilidade à carbonatação, quando a relação a/agl passou de 0,50 para 0,65, do que as misturas curadas por 3 dias.

Leemann et al (2015) determinaram o coeficiente de carbonatação em argamassas de cimento Portland com três relações a/agl (0,40; 0,48 e 0,55) expostas à ambientes com teores de 1% e 4% de CO₂. Quando a relação a/agl passou de 0,48 para 0,40, os autores observaram reduções de 33,38% e 49,23% para os concretos expostos, respectivamente, à teores de 1% e 4% de CO₂. Quando a relação a/agl passou de 0,55 para 0,48, foram observadas reduções de 38,25% nos concretos expostos a teores de 1% de CO₂ e 46,54% em concretos expostos à teores de 4% de CO₂.

A figura 24 representa, em porcentagem, a variação da profundidade de carbonatação quando a relação a/agl passa de 0,65 para 0,50.

Figura 24 – Variação da profundidade de carbonatação, quando a relação a/agl passa de 0,65 para 0,50



Fonte: Autor.

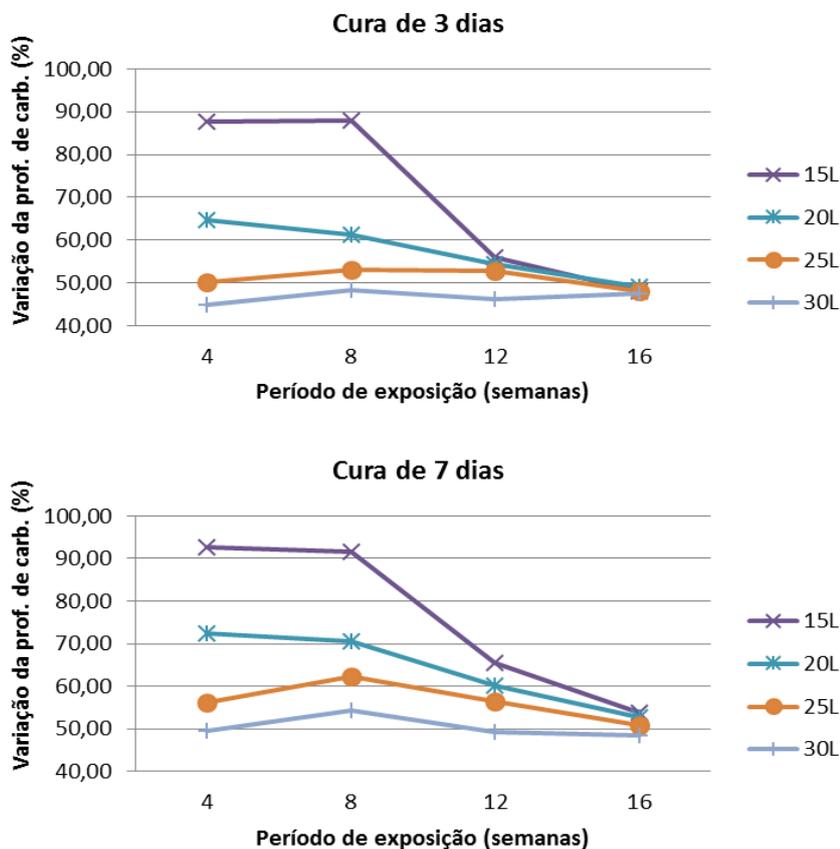
As misturas REF e 5L apresentaram as maiores reduções na profundidade de carbonatação, sendo estas de 42,49% e 48,04%, para a mistura REF e de 33,47% e 38,07%, para a mistura 5L, para períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente, e período de exposição de 4 semanas.

Com o aumento do período de exposição, as reduções da profundidade de carbonatação diminuíram. As misturas 15L, 20L e 25L, com cura de 7 dias, apresentaram variações que podem ser atribuídas à diferenças de tortuosidade da matriz de cimento com adição de cinzas de lodo de ETA.

A mistura 30L apresentou comportamento inverso, com a redução da profundidade de carbonatação aumentando junto com o período de exposição. Isto ocorre porque as profundidades de carbonatação das amostras com relação 0,65 foram elevadas, resultando em uma diferença significativa no que se refere às amostras com relação a/agl de 0,50.

A figura 25 representa a redução da profundidade de carbonatação das misturas 15L, 20L, 25L e 30L, quando a relação a/agl passou de 0,50 para 0,35.

Figura 25 – Variação da profundidade de carbonatação, quando a relação a/agl passa de 0,50 para 0,35



As reduções da profundidade de carbonatação, quando a relação a/agl passa de 0,50 para 0,35, tendem a diminuir à medida que o período de exposição aumenta. Após 16 semanas de exposição ao CO₂, a redução da profundidade de carbonatação é de, em média, 48,17% para as misturas 15L, 20L, 25L e 30L, com período de cura de 3 dias, e de 51,49% para as amostras curadas por 7 dias.

Khalil e Anwar (2015) estudaram a carbonatação em concretos com mistura ternária contendo cinza volante e sílica ativa. Os autores observaram que a profundidade de carbonatação aumenta junto com a relação a/agl. Para a mistura sem adições minerais, foram observados aumentos de 60% e 390% para relações a/agl de 0,50 e 0,60, no que se refere à relação a/agl de 0,40. Para a mistura com 25% de cinzas volantes e 5% de sílica ativa, foram observados aumentos de 108% e 285% para as relações a/agl de 0,50 e 0,60, em comparação com a relação a/agl de 0,40. Para a mistura com 25% de cinza volante e 10% de sílica ativa, foram observados aumentos de 129% e 251% nas relações a/agl de 0,50 e 0,60, em comparação à relação a/agl de 0,40.

Rabehi, Mezghiche e Guettala (2013) estudaram a carbonatação em concretos com dois tipos de cimento (CEM I 42,5 e CEM II/B 42,5) e com diferentes relações a/agl (0,67; 0,57; 0,50 e 0,45). Os autores observaram que a profundidade de carbonatação diminuiu junto com a relação a/agl. Quando a relação a/agl passou de 0,67 para 0,57, foram observadas reduções de 38,48% e 36,80%, para os concretos com CEM I 42,5 e CEM II/B 42,5, respectivamente, ambos com cura de 28 dias. Para as mesmas misturas, observaram-se reduções de 59,22% e 58,00%, quando a relação a/agl passou de 0,67 para 0,50, e de 75,81% e 76,60%, quando a relação a/agl passou de 0,67 para 0,45.

6.2.2 Influência do teor de adição mineral

Todas as misturas investigadas apresentaram aumento na intensidade da carbonatação à medida que o teor de CLETA incorporado ao concreto aumentou. Nas figuras 26 e 27 são apresentados os valores de profundidades e coeficientes de carbonatação, em função do teor de CLETA incorporado ao concreto.

Figura 26 – Profundidades de carbonatação VS teor de CLETA, para período de exposição de 16 semanas

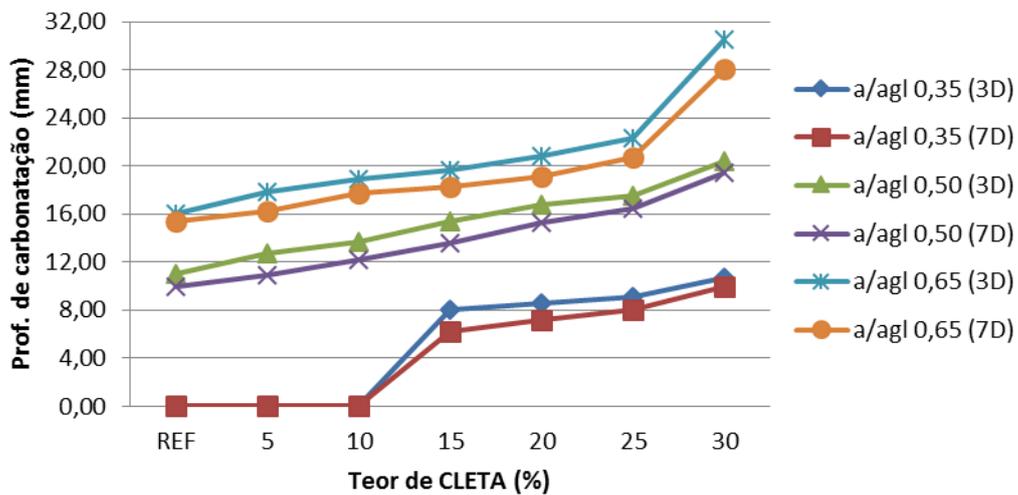
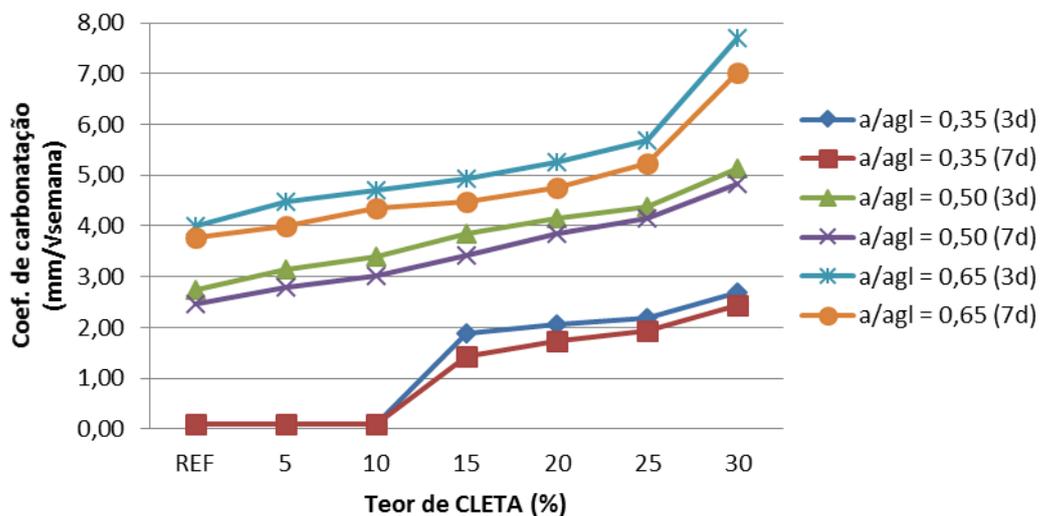


Figura 27 – Coeficiente de carbonatação VS teor de CLETA



Fonte: Autor.

A mistura 5L apresentou os menores acréscimos nas profundidades e coeficiente de carbonatação em relação à mistura REF. Para os concretos com relação a/agl de 0,50, foram observados acréscimos no coeficiente de carbonatação de 14,96% e 12,55%, para períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente. Para os concretos com relação a/agl de 0,65, foram observados acréscimos de 12,28% e 6,12%, para períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente.

A mistura 30L apresentou os maiores valores de profundidades e coeficientes de carbonatação. Em relação a mistura REF, os coeficientes de carbonatação apresentaram acréscimos de 86,86% e 95,55%, para concretos com relação a/agl de 0,50 e períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente. Para os concretos com relação a/agl de 0,65, os acréscimos no coeficiente de carbonatação foram de 92,73% e 86,44%, para períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente.

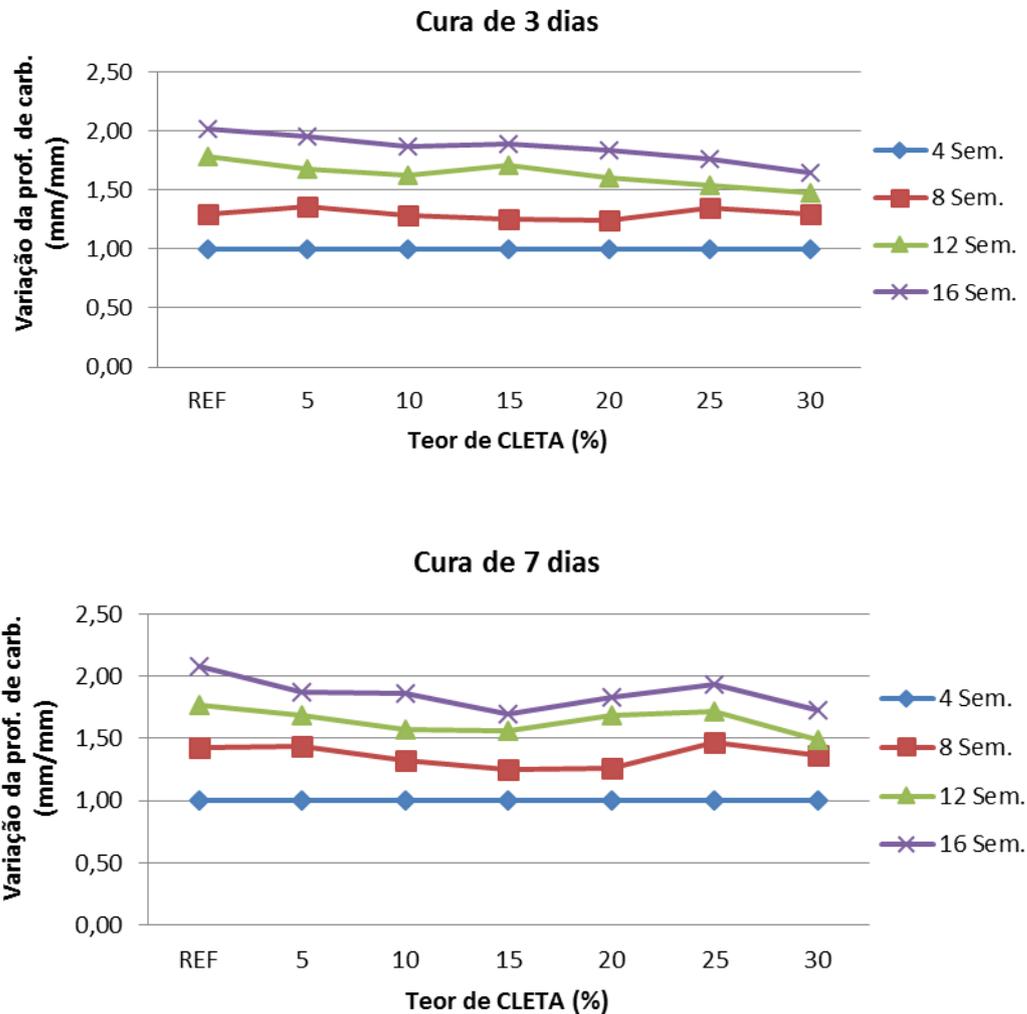
Apesar da incorporação de adições minerais à matriz de cimento promover benefícios à microestrutura do concreto, dificultando a difusão do CO_2 , o coeficiente de carbonatação aumenta junto com o teor de adição. Esse fato é atribuído à diminuição da reserva alcalina, em função das reações pozolânicas, e da consequente diminuição do pH da solução dos poros, que favorecem o desenvolvimento da carbonatação.

Nunes (2014) investigou a carbonatação em concretos com adição de cinzas de casca de arroz. O autor observou que, para todas as misturas, o coeficiente de carbonatação aumentava junto com o teor de adição. O menor aumento do coeficiente de carbonatação foi obtido para a mistura 5C, com relação a/agl de 0,50 e período de cura de 3 dias, sendo este de 10% em relação ao concreto de referência.

Na figura 28 são apresentadas, para cada teor de CLETA investigado, a variação das profundidades de carbonatação dos concretos com relação a/agl de 0,50, calculada em relação aos valores obtidos após 4 semanas de exposição.

Todas as misturas apresentaram uma redução na taxa de crescimento da profundidade de carbonatação, à medida que o tempo de exposição aumentou. Além disso, nota-se que, à medida que o teor de CLETA aumenta, a variação da profundidade de carbonatação ao longo do tempo é menor. Este efeito pode ser atribuído ao refinamento dos poros, causado pela incorporação da adição mineral, resultando em uma diminuição da porosidade, conectividade e tortuosidade da rede de poros, dificultando a difusão do CO_2 e reduzindo a taxa de desenvolvimento da carbonatação.

Figura 28 – Variação das profundidades de carbonatação em relação aos valores obtidos após 4 semanas de exposição, para concretos com relação a/agl de 0,50

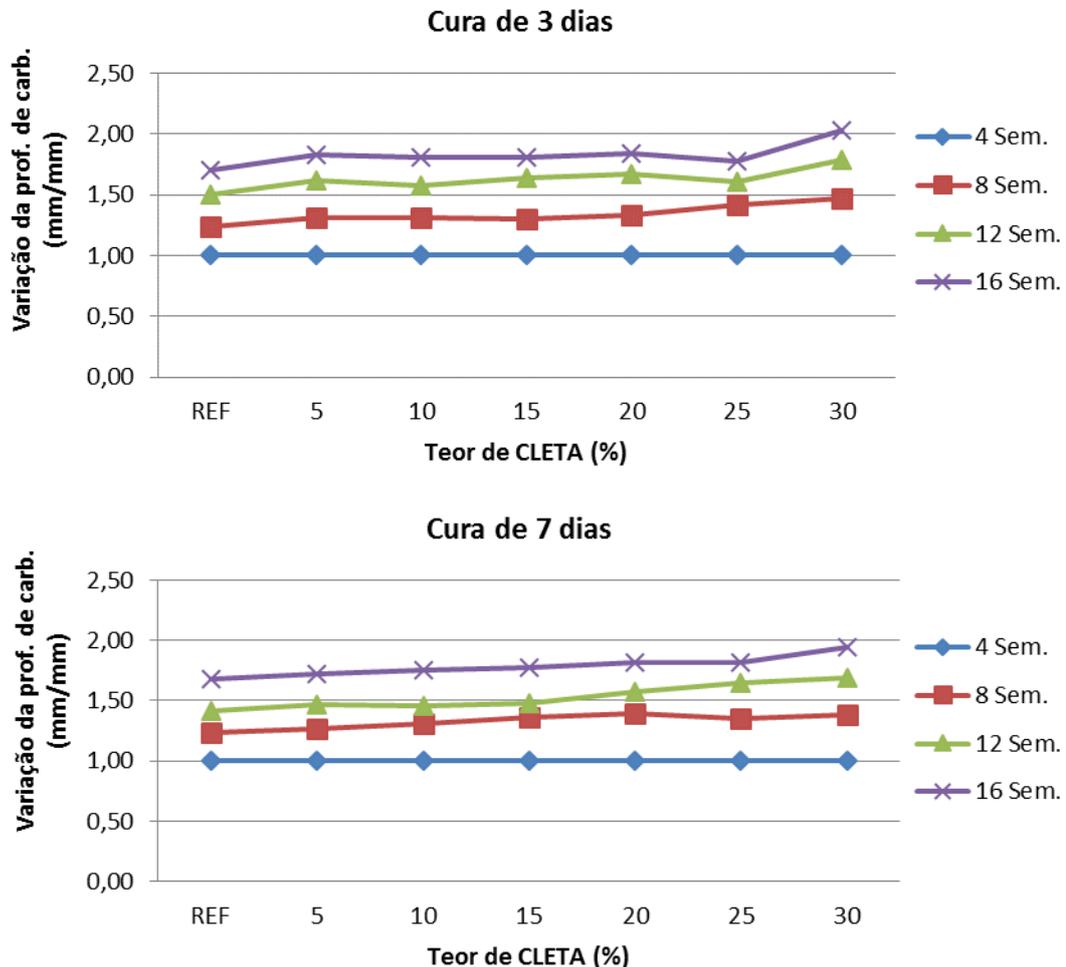


Fonte: Autor.

A figura 29 representa as variações das profundidades de carbonatação, em relação ao período de exposição de 4 semanas, dos concretos com relação a/agl de 0,65.

Todas as misturas com relação a/agl de 0,65 apresentaram aumento na taxa de crescimento das profundidades de carbonatação à medida que o teor de CLETA incorporado aumentou. Este comportamento, inverso ao observado nas misturas com relação a/agl de 0,50, pode ser justificado pelo efeito menos significativo do refinamento dos poros à curto prazo, em função das misturas apresentarem uma porosidade elevado, devido à relação a/agl de 0,65.

Figura 29 – Variação das profundidades de carbonatação em relação aos valores obtidos após 4 semanas de exposição, para concretos com relação a/agl de 0,65



Fonte: Autor.

Khalil e Anwar (2015), ao estudar a incorporação de cinza volante e sílica ativa ao concreto, constataram que a taxa de aumento da profundidade da carbonatação aumenta quando o teor total de cimento é reduzido, embora essa redução não seja linear. Os autores observaram, em misturas com relação a/agl de 0,40, que a profundidade de carbonatação aumentou em 300% e 310% quando o teor total de cimento passou de 410kg/m³ para, respectivamente, 330 e 280kg/m³. Para as misturas com relação a/agl de 0,50 e 0,60, os autores observaram aumentos de 419% e 214% quando o teor total de cimento passou de 410kg/m³ para 330kg/m³ e de 488% e 194% quando o teor total de cimento passou de 410kg/m³ para 280kg/m³.

Zhang et al (2013) estudaram a carbonatação em concretos de alto desempenho com adição de escória. Para isso, foram moldados concretos com adição de 15, 30, 45 e 60% de escória, com relações a/agl de 0, 30 e 0,35, assim como concretos sem adições minerais, com relações a/agl de 0,25; 0,30 e 0,35. As misturas foram ensaiadas aos 14, 28 e 56 dias. As misturas sem adições minerais não apresentaram carbonatação. Dentre as misturas com relação a/agl de 0,30, as amostras com adição de 15% de escória foram as que apresentaram as menores profundidades de carbonatação, sendo estas de 1,3mm; 2,2mm e 2,8mm, para as idades de 14, 28 e 56 dias, respectivamente. Já entre as misturas com relação a/agl de 0,35, as amostras com 30% de escória foram as que apresentaram as menores profundidades de carbonatação, sendo estas de 1,4mm; 1,6mm e 2,5mm, para as idades de 14, 28 e 56 dias, respectivamente.

Metalssi et al (2012) estudaram a carbonatação em argamassas com adição de 0,27 e 0,50 de éter de celulose. Quando o teor de adição passou de 0,27% para 0,5%, não houve nenhuma alteração sobre o tempo de carbonatação completa (116h). Observou-se, porém, que as profundidades de carbonatação da segunda mistura foram menores até o período de 56h. Os autores atribuíram isto ao atraso da hidratação, causado pelo aumento do teor de adição, que resultou em menor quantidade de CH disponível nas primeiras horas de ensaio.

Rabehi, Mezghiche e Guettala (2013) estudaram a carbonatação em concretos com dois tipos de cimento (CEM I 42,5 e CEM II/B 42,5) e com diferentes consumos (300 kg/m³, 350 kg/m³, 400 kg/m³ e 450 kg/m³). Os autores observaram que, após 180 dias de exposição à um ambiente com concentrações de 50% de CO₂, umidade relativa de 66% e temperatura de 20 ± 2°C, as amostras de CEM I 42,5 apresentaram menores profundidades de carbonatação em relação às amostras de CEM II/B 42,5, sendo observada uma redução de 13,20% nos concretos com 300 kg/m³ e 28 dias de cura. No que se refere ao consumo de cimento, a profundidade de carbonatação diminuiu, para todas as misturas, à medida que este aumentou. Para concretos do tipo CEM I 42,5 com 28 dias de cura, observou-se uma redução de 75,81% na profundidade de carbonatação quando o consumo de cimento passou de 300 kg/m³ para 450 kg/m³. Para concretos do tipo

CEM II/B 42,5 com cura de 28 dias, a redução observada foi de 76,60%, quando o consumo de cimento passou de 300 kg/m³ para 450 kg/m³.

6.2.3 Influência do período de cura

Nas figuras 30 e 31 são representados os valores de profundidade e coeficiente de carbonatação das misturas investigadas, em função do seu período de cura.

Figura 30 – Profundidades de carbonatação em função do período de cura, para as amostras com 16 semanas de exposição

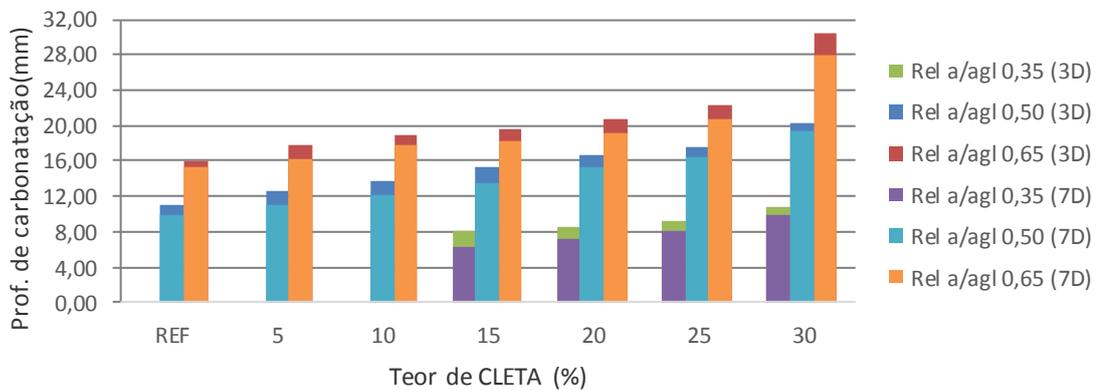
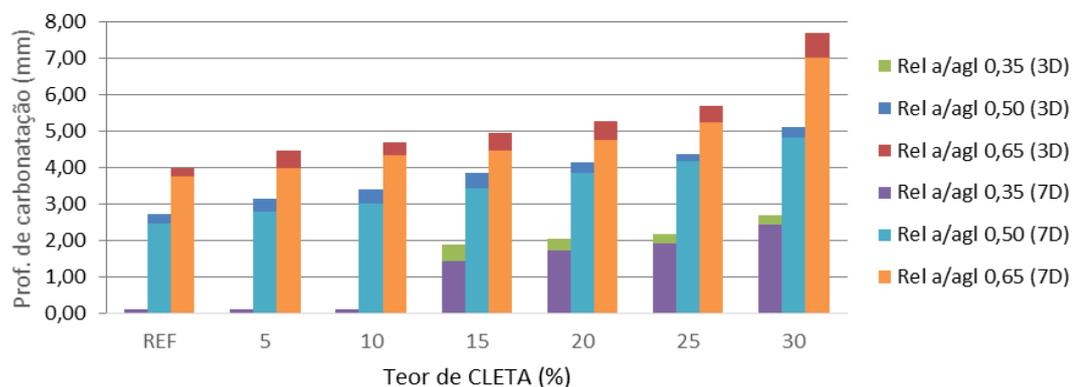


Figura 31 – Coeficientes de carbonatação em função do período de cura



Fonte: Autor.

Pela análise das figuras, nota-se que as profundidades e coeficientes de carbonatação, para todas as misturas, diminuem quando o período de cura passa de 3 para 7 dias. A mistura 5L foi a que apresentou as maiores reduções no coeficiente

de carbonatação, sendo estas de 11,75% e 10,94% para as relações a/agl de 0,50 e 0,65, respectivamente.

A redução da intensidade da carbonatação, em função do aumento do período de cura, é atribuída à melhor hidratação da mistura, resultando em uma diminuição da porosidade, redução da conectividade e tortuosidade da rede de poros e mitigando o surgimento de fissuras.

Borges et al (2010) estudaram a carbonatação de pastas de cimento com adição teores de 75% e 90% de escória granulada de alto-forno e relação a/agl de 0,33, curadas à temperaturas de 20°C e 60°C. Os autores observaram que, após 21 dias de exposição à um teor de 5% de CO₂, 60% de umidade relativa e temperatura de 25 ± 5°C, as amostras com 90% de escória apresentaram aumentos de 107,14%, quando curadas a 20°C, e de 172,63%, quando curadas a 60°C, em relação ao concreto com 75% de escória.

Metalssi et al (2012) estudaram a carbonatação em argamassas com adição de 0,27 de éter de celulose e períodos de cura de 1, 3, 7, e 14 dias, além de uma mistura sem cura. As misturas foram mantidas em uma câmara com temperatura de 20 ± 2°C, umidade relativa de 65 ± 5% e 5% de concentração de CO₂. Os autores observaram que o aumento do período de cura acarreta na diminuição da cinética da carbonatação. As amostras curadas durante 1 dia necessitaram do dobro do tempo para atingir a mesma profundidade de carbonatação das amostras não curadas. Os autores observaram, também, que após 7 dias, a cura não teve influência significativa na redução das profundidades de carbonatação das amostras.

Rabehi, Mezghiche e Guettala (2013) estudaram a carbonatação em concretos com dois tipos de cimento (CEM I 42,5 e CEM II/B 42,5) e com diferentes tipos de cura. O primeiro, denominado concreto de controle, consistiu na estocagem dos corpos-de-prova em laboratório, com temperatura de 20 ± 2°C e umidade relativa de 45 ± 10%. O segundo tipo de cura consistiu em deixar os corpos-de-prova submersos em água, com temperatura de 20 ± 2°C, por 3, 7 e 28 dias. Os autores observaram que a profundidade de carbonatação diminuía à medida que o período de cura aumentava. Para os concretos de CEM I 42,5, com consumo de cimento de 300 kg/m³, foram observadas reduções, em relação ao concreto de controle, de 41,37%, 46,54% e 55,12%, para os períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Para os concretos de CEM II/B 42,5 e consumo de cimento de 300

kg/m³, foram observadas reduções, em relação ao concreto de controle, de 39,62%, 47, 62% e 52,38%, para os períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

6.3 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

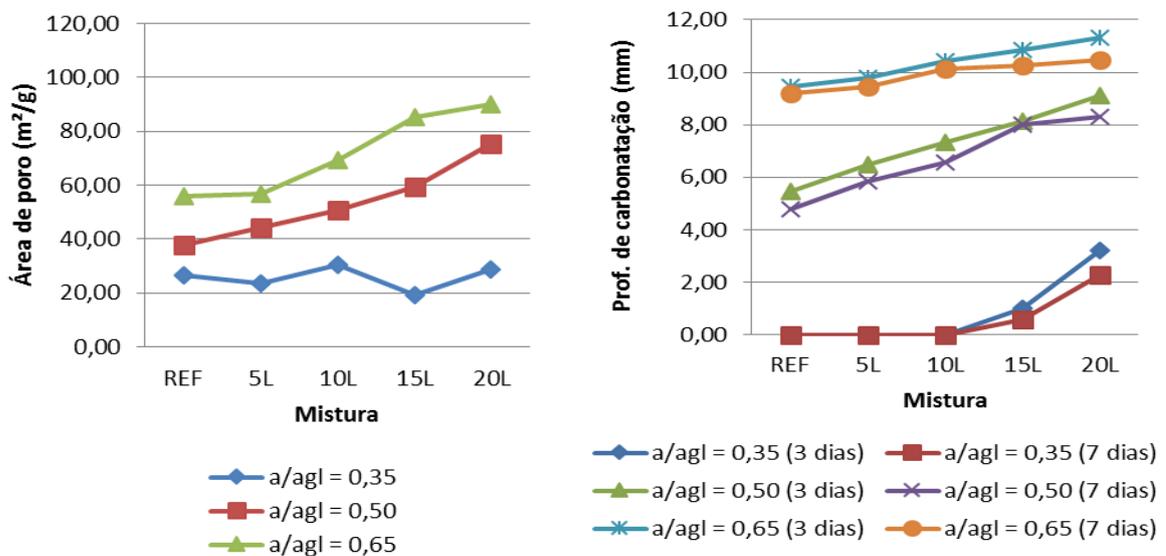
6.3.1 Carbonatação VS Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

As profundidades e coeficientes de carbonatação foram comparados com os valores de área e de diâmetro crítico dos poros, obtidos por Stein (2016), para pastas com adição de 5%, 10%, 15% e 20% de CLETA, bem como para uma mistura sem adições minerais, conforme apresentado no anexo A.

Nas figuras 32 e 33 estão representados os valores de área dos poros, bem como, respectivamente, as profundidades, após 4 semanas de exposição, e os coeficientes de carbonatação, para cada mistura investigada.

Pela análise dos gráficos, nota-se que a área dos poros aumenta junto o teor de CLETA incorporado, indicando um aumento da porosidade do material. Paralelamente, as profundidades e coeficientes de carbonatação aumentam, indicando uma maior facilidade de penetração do CO₂, em função do aumento da porosidade.

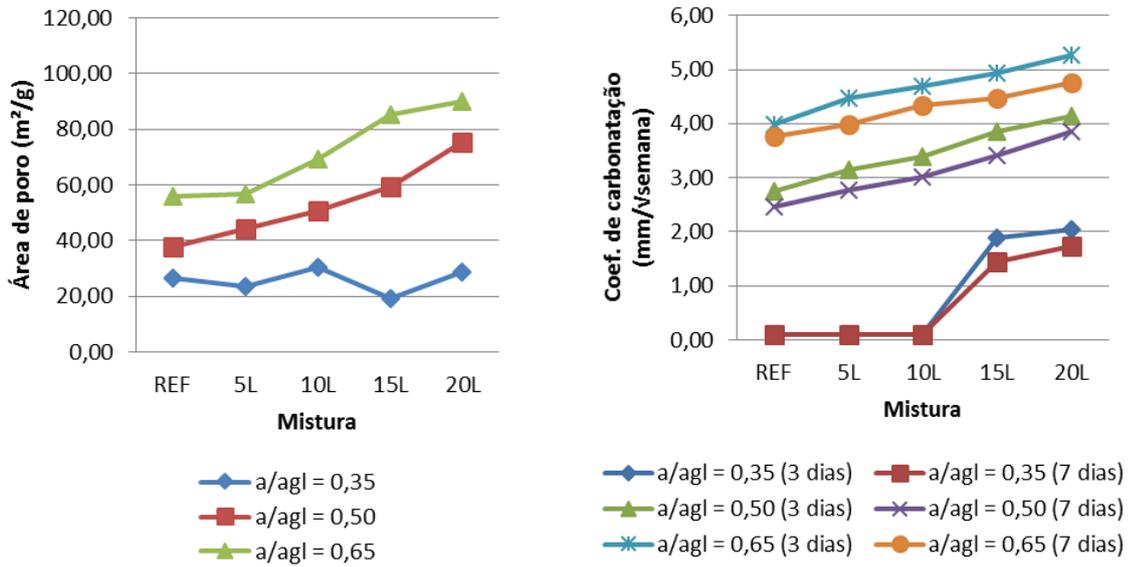
Figura 32 – Variação a) da área dos poros e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA



a) Área dos poros

b) Profundidades de carbonatação

Figura 33 – Variação a) da área dos poros e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA



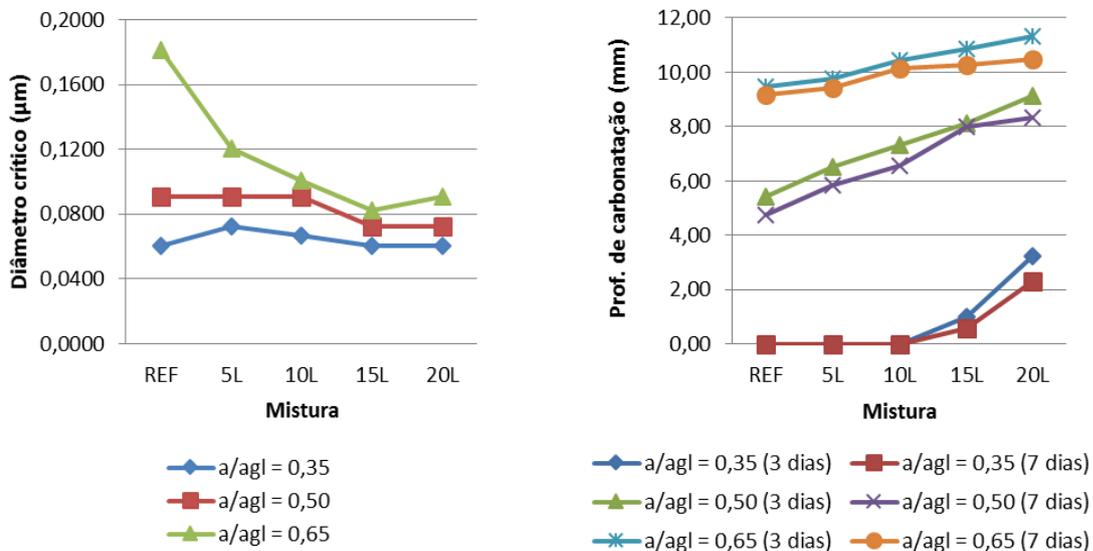
a) Área dos poros

b) Coeficientes de carbonatação

Fonte: Autor.

Respectivamente, nas figuras 34 e 35, as profundidades, após 4 semanas de exposição, e coeficientes de carbonatação são relacionados com os diâmetros críticos obtidos para as misturas investigadas.

Figura 34 – Variação a) do diâmetro crítico dos poros e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA

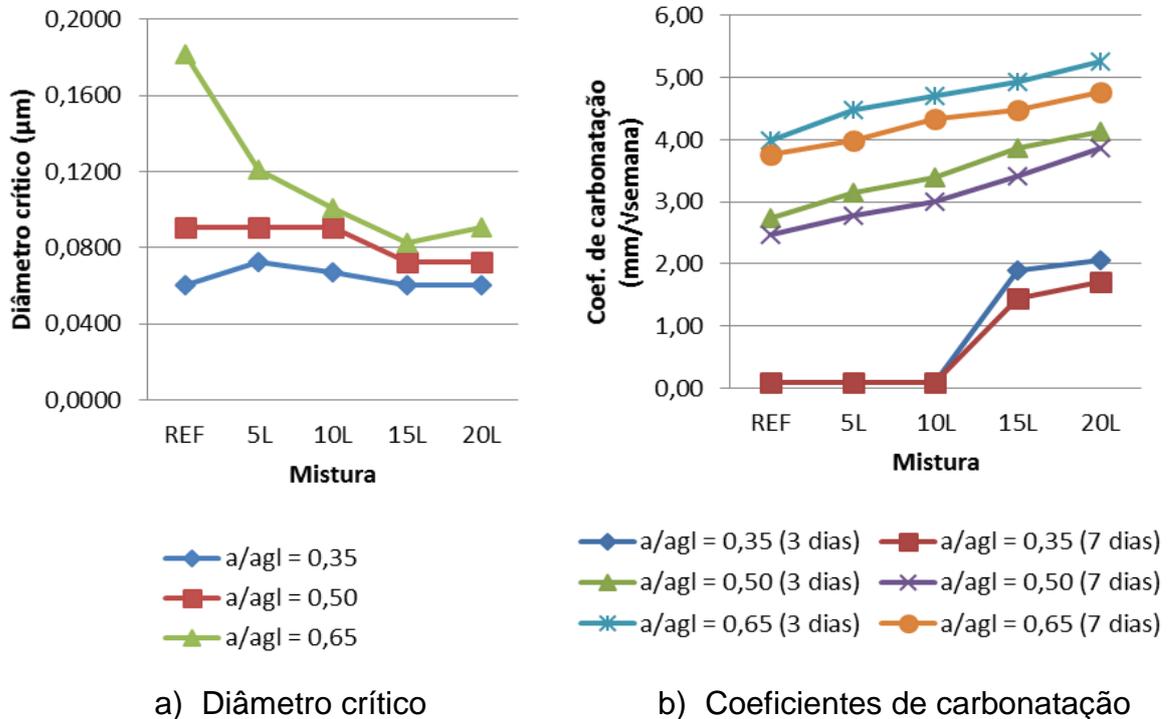


a) Diâmetro crítico

b) Profundidades de carbonatação

Fonte: Autor.

Figura 35 – Variação a) do diâmetro crítico dos poros e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA

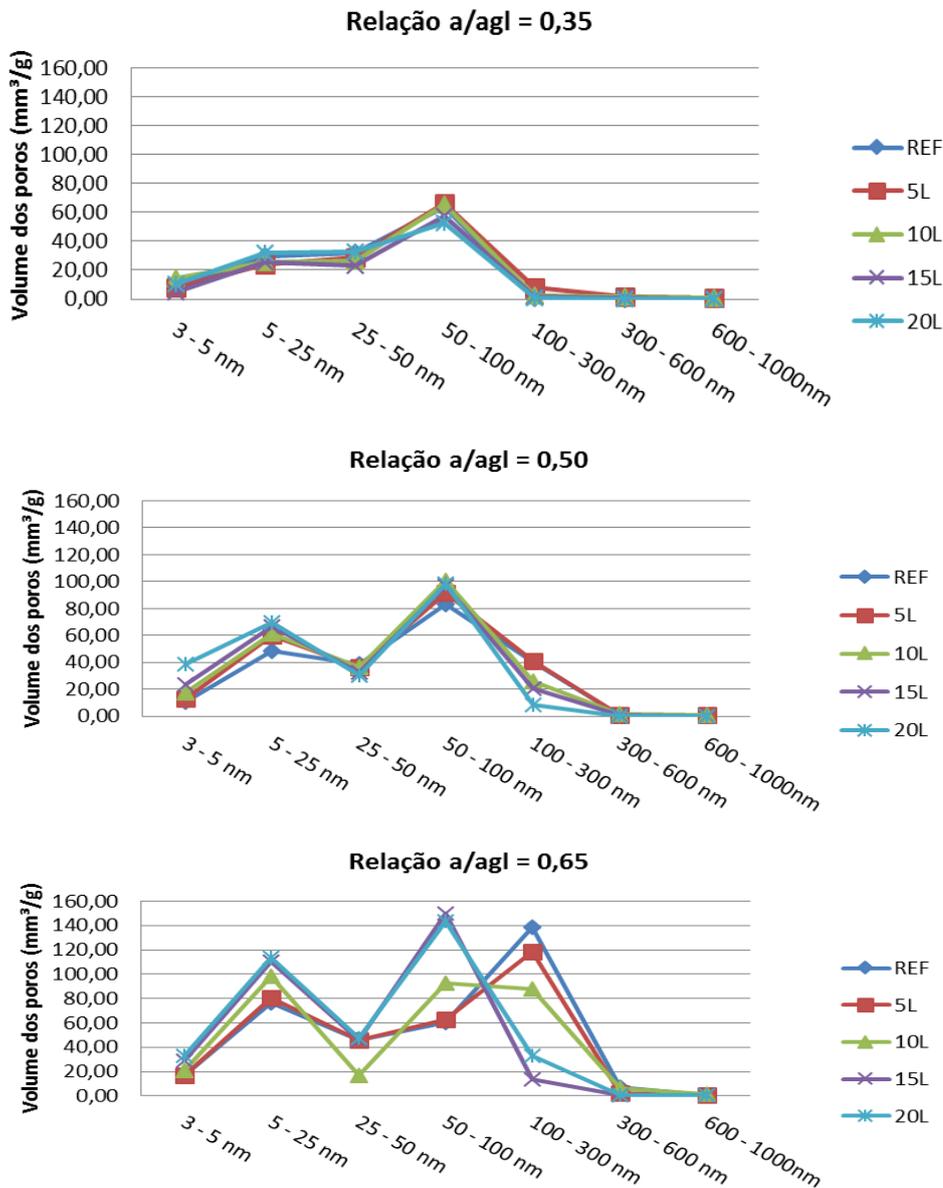


Fonte: Autor.

À medida que o teor de CLETA incorporado aumentou, o diâmetro crítico das misturas investigadas diminuiu, indicando a existência de um refinamento no tamanho dos poros. Para a mistura 20L, foram observadas reduções de 19,89% e de 50,08% para as amostras com relações a/agl de 0,50 e 0,65, respectivamente. As amostras com relação a/agl de 0,35 não apresentaram reduções. Apesar de o diâmetro crítico diminuir, a intensidade da carbonatação aumentou junto com o teor de CLETA incorporado.

Na figura 36 são apresentados os valores de volume dos poros, para diferentes faixas de distribuição de tamanhos, para as misturas REF, 5L, 10L, 15L e 20L, conforme anexo B.

Figura 36 – Volume dos poros para diferentes faixas de distribuição de tamanho



Fonte: Autor.

As amostras com relação a/agl de 0,35 apresentaram, para todas as misturas investigadas, pouca ou nenhuma variação no volume dos poros. Este comportamento demonstra que a baixa relação a/agl tem um efeito maior sobre a microestrutura da pasta de cimento do que o teor de CLETA adicionado. Da mesma maneira, a mistura com relação a/agl de 0,50 apresentou pouca variação no volume de poros, ocorrendo uma diminuição no volume de poros maiores (entre 50 e 300 nm) e um aumento no volume de poros menores (entre 3 e 50 nm). Em função das pequenas mudanças microestruturais ocorridas nas amostras com relação a/agl de

0,35 e de 0,50, pode-se supor que o aumento da intensidade da carbonatação, a medida que o teor de CLETA aumenta, ocorre, principalmente, em função da diminuição da reserva alcalina.

As amostras com relação a/agl de 0,65 apresentaram uma grande variação no volume dos poros, ocorrendo uma diminuição no volume dos poros maiores (acima de 50nm) e um acréscimo no volume dos poros menores (menores de 50nm). Desse modo, pode-se concluir que o teor de CLETA tem grande influência sobre a microestrutura do material e, em consequência, sobre a intensidade da carbonatação.

6.3.2 Carbonatação VS Termogravimetria

O teor de CH de pastas de cimento Portland com adição de CLETA foi determinado por Stein (2016), conforme anexo C, por meio do ensaio de Termogravimetria, na idade de 28 dias.

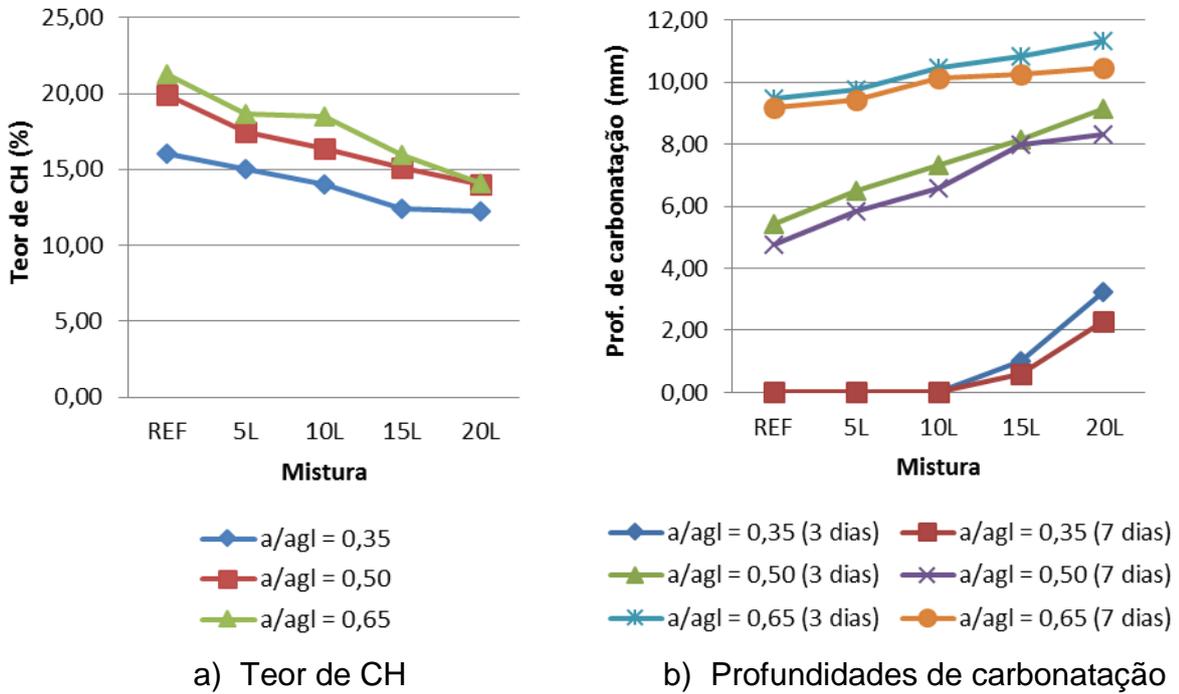
Na figura 37 é apresentada a relação entre o teor de CH e a profundidade de carbonatação, após 4 semanas de exposição ao CO₂. Na Figura 38 é apresentada a relação entre teor de CH e o coeficiente de carbonatação de cada mistura investigada.

Pela análise dos gráficos, nota-se que o teor de CH, para todas as misturas investigadas, diminui à medida que o teor de CLETA incorporado ao concreto aumenta. Este efeito é decorrente da diminuição da reserva alcalina, causada pelo consumo de CH na reação pozolânica.

A diminuição do teor de CH no concreto faz com que este seja consumido mais rapidamente pela reação com o CO₂, resultando, assim, no aumento da intensidade da carbonatação, como pode ser observado nos gráficos acima.

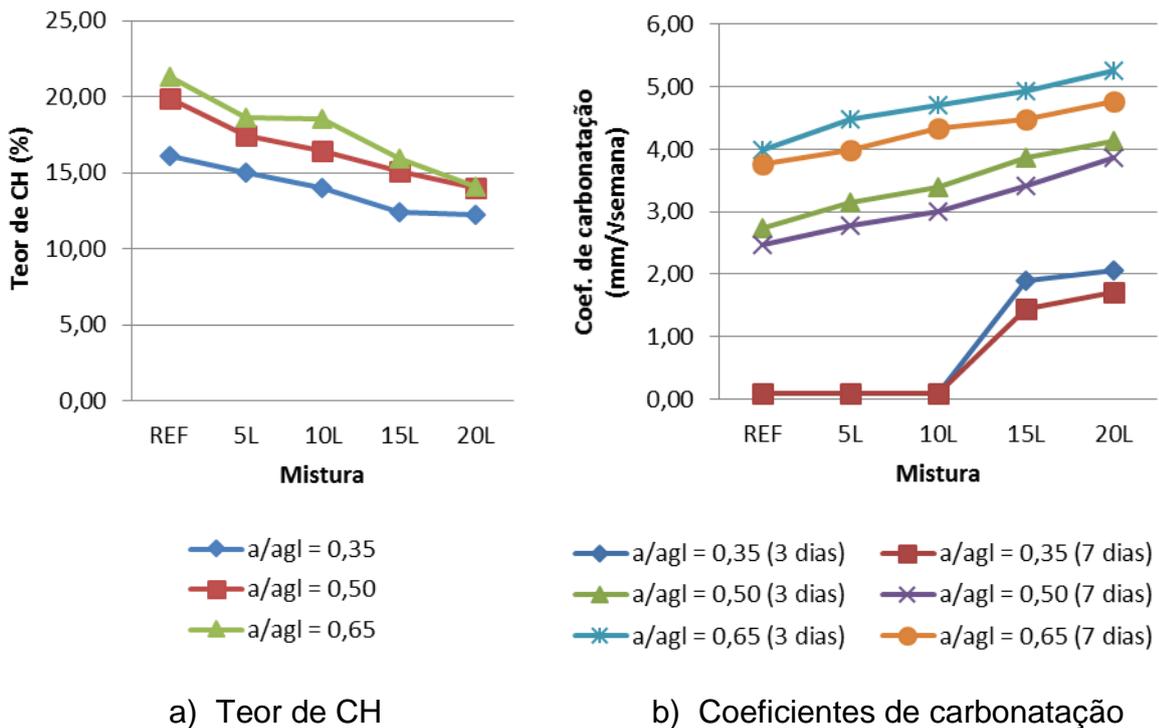
A incorporação de 20% de CLETA ao concreto resulta, em relação a mistura REF, numa redução de 29,53% e 33,76% do teor de CH, das amostras com relação a/agl de 0,50 e 0,65, respectivamente. O aumento do coeficiente de carbonatação observado para estas misturas foi, para períodos de cura de 3 e 7 dias, de 51,09% e 56,28%, para as amostras com relação a/agl de 0,50, e de 31,83% e 26,60%, para as amostras com relação a/agl de 0,65.

Figura 37 – Variação a) do teor de CH e b) das profundidades de carbonatação em função do teor de CLETA



Fonte: Autor.

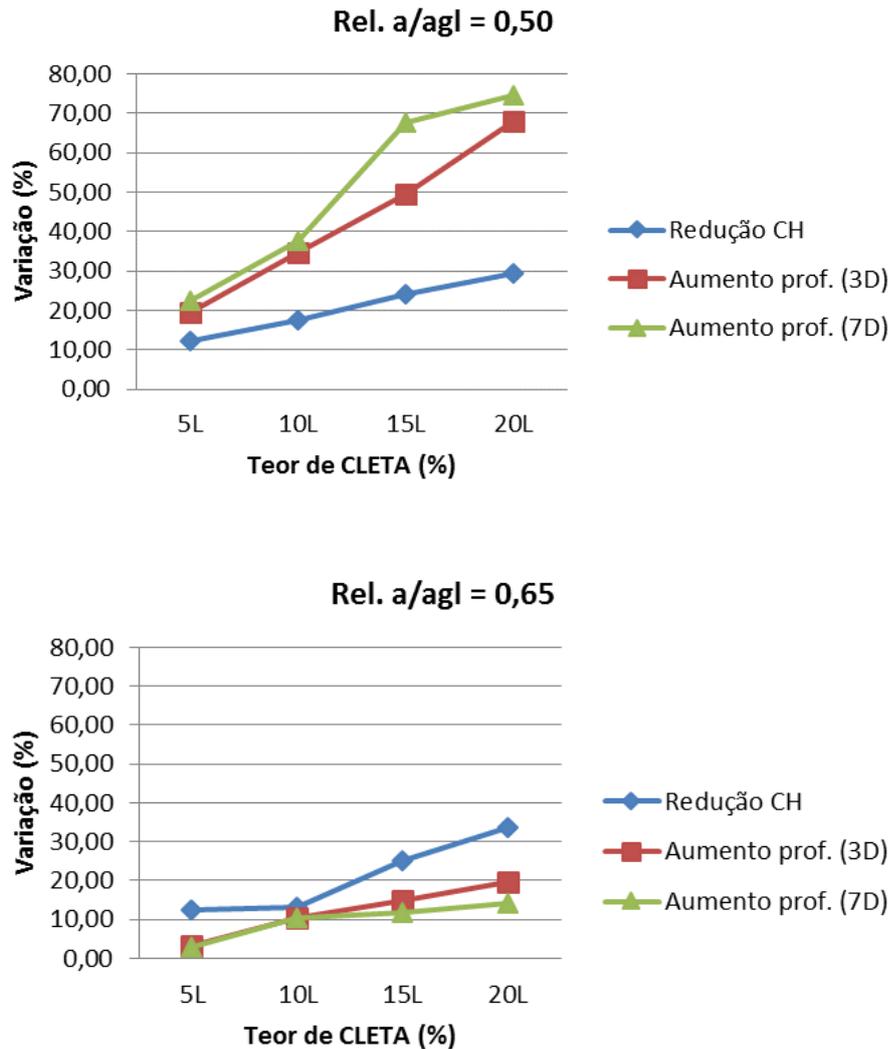
Figura 38 – Variação a) do teor de CH e b) dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CLETA



Fonte: Autor.

Na figura 39 são apresentadas as variações, em porcentagem, do teor de CH e das profundidades de carbonatação, após 4 semanas de exposição, das misturas 5L, 10L, 15L e 20L em relação à mistura REF.

Figura 39 – Relação entre a variação do teor de CH e das profundidades de carbonatação



Fonte: Autor.

Os concretos com relação a/agl de 0,50 apresentaram grandes acréscimos nas profundidades de carbonatação quando o teor de CH foi reduzido, sendo em torno de 70% para a mistura 20L. Já os concretos com relação a/agl de 0,65 apresentaram acréscimos menores, em torno de 20% para a mistura 20L. Em função da relação a/agl mais alta, a porosidade destes concretos é um fator de maior influência sobre o processo de carbonatação do que a reserva alcalina da mistura.

Borges et al (2010) estudaram a carbonatação em pastas de concreto com altos teores de escória granulada de alto forno (75% e 90%). Após 90 dias de hidratação e antes de serem submetidas à carbonatação, as amostras com 75% de escória apresentaram teores de 4,9% de CH, enquanto as amostras com 90% de escória apresentaram teores de 2,7% de CH, demonstrando que a incorporação de adições minerais resulta em uma diminuição da reserva alcalina. As amostras com 75% de escória apresentaram teores de CH de 4,2%, após 7 dias de carbonatação acelerada, e de 2,7%, após 21 dias de carbonatação acelerada. As amostras com 90% de escória não apresentaram teores de CH mensuráveis após 7 e 21 dias de carbonatação acelerada.

6.3.3 Análise da carbonatação em igualdade de resistência

A resistência à compressão é o principal parâmetro utilizado por projetistas na especificação do concreto a ser utilizado em uma estrutura. Deste modo, a obtenção dos valores de carbonatação em igualdade de resistência permite uma análise mais prática do desempenho do concreto frente a esse fenômeno, no que se refere ao dimensionamento das estruturas.

Nesta pesquisa, a intensidade da carbonatação foi analisada em três níveis de resistência à compressão (35MPa, 45MPa e 55MPa), nas idades de 28 e 91 dias. Os níveis de resistência à compressão (f_{cj}) foram determinados a partir da equação 25, aplicando-se os valores de f_{ck} (30MPa, 40MPa e 50MPa) e do desvio padrão ($sd = 3,5$ MPa).

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot sd \quad (25)$$

Os resultados de resistência à compressão dos concretos com adição de CLETA foram apresentados e discutidos por Hengen (2014), conforme consta no anexo D.

Primeiramente, foram obtidos, para as misturas REF, 5L, 10L, 15L e 20L, os coeficientes C, D e r^2 das equações exponenciais que relacionam as profundidades ou o coeficiente de carbonatação com a relação a/agl (x), conforme equação 26.

$$k = \frac{C}{D^x} \quad (26)$$

Nas tabelas 12 e 13 são apresentados os coeficientes C, D e r^2 , obtidos a partir dos valores das profundidades de carbonatação com 4 e 12 semanas de exposição, respectivamente. Na tabela 14 são apresentados os coeficientes C, D e r^2 , obtidos a partir dos valores dos coeficientes de carbonatação.

Tabela 12 – Coeficientes C, D e r^2 , obtidos a partir das profundidades de carbonatação com 4 semanas de exposição.

Mistura	Profundidade de carbonatação (4 semanas de exposição)						
	Cura (dias)	Relação a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	C	D	r^2
REF	3	0,10	5,44	9,46	0,00087902	0,00000026	0,84
	7	0,10	4,77	9,18	0,00087700	0,00000029	0,86
5L	3	0,10	6,50	9,77	0,00089536	0,00000023	0,82
	7	0,10	5,84	9,43	0,00090573	0,00000026	0,83
10L	3	0,10	7,32	10,44	0,00085114	0,00000019	0,81
	7	0,10	6,56	10,15	0,00085310	0,00000021	0,82
15L	3	1,01	8,13	10,85	0,08550667	0,00036559	0,84
	7	0,58	7,99	10,26	0,03019952	0,00006934	0,81
20L	3	3,23	9,13	11,33	0,85703785	0,01527566	0,87
	7	2,29	8,32	10,48	0,46344692	0,00629506	0,86

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Coeficientes C, D e r^2 , obtidos a partir das profundidades de carbonatação com 12 semanas de exposição.

Mistura	Profundidade de carbonatação (12 semanas de exposição)						
	Cura (dias)	Relação a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	C	D	r^2
REF	3	0,10	9,68	14,19	0,00062087	0,00000007	0,81
	7	0,10	8,46	13,00	0,00066681	0,00000009	0,82
5L	3	0,10	10,92	15,84	0,00055847	0,00000005	0,80
	7	0,10	9,84	13,84	0,00064565	0,00000007	0,80
10L	3	0,10	11,86	16,41	0,00054702	0,00000004	0,80
	7	0,10	10,32	14,77	0,00060117	0,00000006	0,80
15L	3	6,12	13,90	17,73	1,94536008	0,02890680	0,91
	7	4,31	12,46	15,16	1,14551294	0,01513561	0,86
20L	3	6,69	14,64	18,91	2,17270118	0,03133286	0,92
	7	5,60	14,04	16,48	1,80301774	0,02741574	0,86

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Coeficientes C, D e r², obtidos a partir dos coeficientes de carbonatação.

Mistura	Coeficiente de carbonatação						
	Cura (dias)	Relação a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	C	D	r ²
REF	3	0,10	2,74	3,99	0,00221309	0,00000461	0,83
	7	0,10	2,47	3,76	0,00231206	0,00000562	0,84
5L	3	0,10	3,15	4,48	0,00198609	0,00000313	0,82
	7	0,10	2,78	3,99	0,00222331	0,00000461	0,82
10L	3	0,10	3,39	4,70	0,00190985	0,00000267	0,81
	7	0,10	3,01	4,34	0,00204174	0,00000348	0,82
15L	3	1,89	3,86	4,94	0,66680677	0,04073803	0,93
	7	1,44	3,42	4,48	0,42364297	0,02275097	0,92
20L	3	2,05	4,14	5,26	0,73790423	0,04325138	0,93
	7	1,72	3,86	4,76	0,58076442	0,03365116	0,90

Fonte: Autor.

Foram calculados, em seguida, os coeficientes A, B e r² das equações exponenciais que relacionam a resistência à compressão (f_c) com a relação a/agl (x), conforme equação 27.

$$f_c = \frac{A}{B^x} \quad (27)$$

Os valores obtidos em relação à resistência nas idades de 28 e 91 dias encontram-se nos anexos E e F, respectivamente.

Por meio da equação 27, foram obtidas as relações a/agl referentes aos níveis de resistência de 35MPa, 45MPa e 55MPa, aos 28 e 91 dias. Aplicando estes valores na equação 26, foram obtidos os valores de profundidades e coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência.

Na tabela 15 são apresentados os valores das profundidades, após 4 semanas de exposição, e dos coeficientes de carbonatação, em relação a resistência à compressão de 28 dias. Na tabela 16, constam os valores de profundidades, após 12 semanas de exposição, e dos coeficientes de carbonatação, em relação a resistência à compressão de 91 dias.

Tabela 15 – Profundidades e coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência (28 dias).

Nível de resistência	Mistura	Cura (dias)	Rel. a/agl	Prof. (mm)	Coef (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)	
35MPa	REF	3	0,57	4,99	2,44	
		7	0,63	11,60	4,69	
	5L	3	0,61	9,96	4,52	
		7	0,69	31,47	10,69	
	10L	3	0,69	37,41	13,38	
		7	-	-	-	
	15L	3	0,63	12,51	5,01	
		7	0,68	20,33	5,55	
	20L	3	0,68	14,72	6,24	
		7	-	-	-	
	45MPa	REF	3	0,42	0,51	0,39
			7	0,49	1,41	0,86
5L		3	0,45	0,86	0,60	
		7	0,57	5,11	2,45	
10L		3	0,56	4,99	2,52	
		7	0,58	6,46	2,99	
15L		3	0,52	5,24	3,52	
		7	0,56	6,44	3,52	
20L		3	0,56	8,91	4,28	
		7	0,60	9,70	4,44	
55MPa		REF	3	0,30	0,08	0,09
			7	0,37	0,23	0,20
	5L	3	0,33	0,14	0,13	
		7	0,48	1,31	0,81	
	10L	3	0,46	1,06	0,70	
		7	0,48	1,38	0,85	
	15L	3	0,44	2,78	2,73	
		7	0,47	2,72	2,51	
	20L	3	0,46	5,87	3,13	
		7	0,50	5,84	3,17	

Fonte: Autor.

Tabela 16 – Profundidades e coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência (91 dias).

Nível de resistência	Mistura	Cura (dias)	Rel. a/agl	Prof. (mm)	Coef (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)	
35MPa	REF	3	0,66	33,67	7,36	
		7	0,67	35,06	7,61	
	5L	3	-	-	-	
		7	-	-	-	
	10L	3	-	-	-	
		7	-	-	-	
	15L	3	0,66	20,17	5,51	
		7	0,71	22,45	6,22	
	20L	3	-	-	-	
		7	-	-	-	
	45MPa	REF	3	0,51	2,83	1,17
			7	0,53	3,62	1,40
5L		3	0,56	7,13	2,40	
		7	0,61	14,57	4,00	
10L		3	0,61	17,44	4,79	
		7	0,64	25,52	6,36	
15L		3	0,56	14,15	4,00	
		7	0,60	14,16	4,10	
20L		3	0,61	17,97	5,01	
		7	0,65	18,68	5,27	
55MPa		REF	3	0,39	0,39	0,27
			7	0,42	0,61	0,37
	5L	3	0,41	0,57	0,36	
		7	0,50	2,39	1,04	
	10L	3	0,50	2,69	1,17	
		7	0,53	4,09	1,59	
	15L	3	0,48	10,66	3,10	
		7	0,51	9,71	2,92	
	20L	3	0,51	12,71	3,66	
		7	0,54	12,57	3,63	

(-) Fora dos limites de confiança.

Observa-se, pela análise das tabelas 15 e 16, que as menores relações a/agl , independente do nível de resistência, foram obtidas para a mistura REF, com 3 dias de cura, enquanto os maiores valores foram obtidos para a mistura 20L, com 7 dias de cura.

Para todos os níveis de resistência, com exceção de 35 MPa (91 dias), os menores valores de profundidades e coeficientes de carbonatação foram obtidos para a mistura REF, com 3 dias de cura. Para igualdade de resistência de 35 MPa, na idade de 91 dias, os menores valores obtidos foram para a mistura 15L, com 3 dias de cura.

Os maiores valores de profundidades e coeficientes de carbonatação, para o nível de resistência de 35MPa, foram obtidos para a mistura 10L, com 3 dias de cura, para resistência aos 28 dias, e para a mistura REF, para resistência aos 91 dias. Para o nível de resistência de 45MPa, os maiores valores da profundidade de carbonatação foram obtidos para a mistura 20L, com 7 dias de cura, enquanto os maiores valores do coeficiente de carbonatação foram obtidos para a mistura 10L, com 7 dias de cura. Por fim, para o nível de resistência de 55MPa, os maiores valores de profundidades e coeficientes de carbonatação foram obtidos para a mistura 20L, com 3 dias de cura, com exceção da profundidade de carbonatação para nível de resistência aos 28 dias, cujo valor máximo obtido para a mistura 20L, com 7 dias de cura.

Como determinado por Hengen (2014), a incorporação de CLETA ao concreto resulta no aumento da resistência mecânica deste. Sendo assim, concretos com maiores teores de CLETA atingiram um determinado nível de resistência com uma relação a/agl mais alta, resultando em uma maior porosidade. Além disso, a reação pozolânica, resultando da adição de CLETA, diminui a reserva alcalina do concreto, justificando o aumento da intensidade da carbonatação nas misturas com maiores teores de CLETA.

Para melhor analisar a viabilidade da utilização dos concretos com adição de CLETA, foi estimado o tempo, em anos, que cada mistura levaria para atingir uma profundidade de carbonatação de 25 mm. Esta estimativa foi realizada considerando que um coeficiente de carbonatação de $1\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$, obtido por meio de ensaio acelerado, corresponde à um coeficiente de carbonatação de $1\text{mm}/\sqrt{\text{ano}}$ em condições naturais, como destacado por Ho e Lewis (1987) e Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001). Na tabela 17 consta o tempo necessário para cada mistura atingir

uma profundidade de 25 mm, calculado a partir dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência.

Tabela 17 – Tempo necessário para cada mistura atingir uma profundidade de carbonatação de 25 mm.

Nível de resistência	Mistura	Cura (dias)	Kc (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)		Tempo (anos)		
			28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	
35 MPa	REF	3	2,44	7,36	105	12	
		7	4,69	7,61	28	11	
	5L	3	4,52	-	31	-	
		7	10,69	-	5	-	
	10L	3	13,38	-	3	-	
		7	-	-	-	-	
	15L	3	5,01	5,51	25	21	
		7	5,55	6,22	20	16	
	20L	3	6,24	-	16	-	
		7	-	-	-	-	
	45 MPa	REF	3	0,39	1,17	4109*	457*
			7	0,86	1,4	845*	319*
5L		3	0,6	2,4	1736*	109*	
		7	2,45	4	104*	39*	
10L		3	2,52	4,79	98*	27*	
		7	2,99	6,36	70*	15*	
15L		3	3,52	4	50	39	
		7	3,52	4,1	50	37	
20L		3	4,28	5,04	34	25	
		7	4,44	5,27	32	23	
55 MPa		REF	3	0,09	0,27	77160*	8573*
			7	0,2	0,37	15625*	4565*
	5L	3	0,13	0,36	36982*	4823*	
		7	0,81	1,04	953*	578*	
	10L	3	0,7	1,17	1276*	457*	
		7	0,85	1,59	865*	247*	
	15L	3	2,73	3,1	84	65	
		7	2,51	2,92	99	73	
	20L	3	3,13	3,66	64	47	
		7	3,17	3,63	62	47	

(-) Fora do limite de confiança.

(*) Dificuldade em prever o comportamento em longo prazo, em função da adoção de $K_c = 0,10$ mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

Pela análise do gráfico, nota-se que, para estruturas usuais de concreto armado, cuja vida útil é de 50 anos, não é viável a utilização de concretos com adição de CLETA com nível de resistência de 35MPa. Para o nível de resistência de 45MPa aos 28 dias, o uso de da CLETA se torna viável para teores de até 15%. Para resistência de 55MPa aos 28 dias, pode se utilizar teores de CLETA de 20%, enquanto que para resistência de 55MPa aos 91 dias, teores de até 15% de CLETA podem ser utilizados.

Em função dos concretos com adição de até 10% de CLETA não apresentarem carbonatação mensurável para a relação a/agl de 0,35, onde foi adotado $k_c = 0,10\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$, tornou-se difícil prever o comportamento destes ao longo do tempo.

A incorporação de CLETA ao concreto, do ponto de vista da carbonatação, se torna viável à medida que a resistência mecânica do concreto aumenta.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento de concretos de cimento Portland (CP V – ARI) com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) frente à carbonatação acelerada. Para tal, foram moldados concretos com teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CLETA, em substituição ao cimento Portland, bem como uma mistura de referência, sem adições minerais. Foram utilizadas, para cada mistura, três relações a/agl (0,35; 0,50 e 0,65) bem como dois períodos de cura úmida (três e sete dias). As profundidades e os coeficientes de carbonatação das misturas investigadas foram analisados a partir da relação a/agl, do teor de CLETA incorporado e do período de cura úmida.

A mistura REF apresentou os menores valores de profundidades e, em consequência, os menores coeficientes de carbonatação (K_c). Para a relação a/agl de 0,35 não houve carbonatação mensurável, independente do período de cura, sendo adotado um coeficiente de 0,10 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Para as amostras com relação a/agl de 0,50 foram obtidos coeficientes de carbonatação de 2,74 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,99 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para períodos de cura de 3 e 7 dias, respectivamente. Para as amostras com relação a/agl de 0,65 foram obtidos coeficientes de carbonatação de 2,47 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as amostras com cura de 3 dias, e de 3,76 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as amostras com cura de 7 dias.

O mesmo comportamento foi observado para todas as misturas investigadas, onde a intensidade da carbonatação aumentou junto com a relação a/agl e diminuiu à medida que o período de cura foi acrescido. A relação a/agl tem influência direta sobre a porosidade da matriz de cimento. Desse modo, quanto maior a relação a/agl da mistura, maior sua porosidade e, em consequência, mais rapidamente o dióxido de carbono (CO_2) ingressará na matriz de cimento. A cura tem por objetivo promover uma hidratação adequada do concreto, evitando a perda de água e diminuindo o aparecimento de fissuras. Sendo assim, um maior período de cura resulta em uma matriz cimentícia mais compacta, dificultando o ingresso do CO_2 e retardando o processo de carbonatação.

No que se refere à influência da adição mineral, foi observado que a intensidade da carbonatação aumentou junto com o teor de CLETA incorporado. A mistura 5L foi a que apresentou os menores acréscimos nos coeficientes de carbonatação, em relação à mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de

0,50, foram obtidos coeficientes de carbonatação de 3,15 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 4,48 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para os períodos de cura de 3 e 7 dias, representando acréscimos de 14,96% e 12,55% em relação à mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de 0,65, foram obtidos coeficientes de 2,78 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para período de cura de 3 dias, e de 3,99 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para período de cura de 7 dias, equivalendo à acréscimos de 12,28% e 6,12%, respectivamente, em relação à mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de 0,35, não houve carbonatação mensurável, independente do período de cura, sendo adotado um coeficiente de carbonatação de 0,10 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

A mistura 30L foi a que apresentou os maiores acréscimos nos coeficientes de carbonatação em relação à mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de 0,50 foram obtidos, para períodos de cura de 3 e 7 dias, coeficientes de carbonatação de 5,12 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 7,69 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, equivalendo à acréscimos de 86,86% e 95,55%, em relação a mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de 0,65, foram obtidos coeficientes de carbonatação, para períodos de cura de 3 e 7 dias, de 4,83 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 7,01 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, equivalendo a acréscimos de 92,73% e 86,44%, em relação à mistura REF. Para as amostras com relação a/agl de 0,35 foram obtidos coeficientes de carbonatação de 2,69 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 2,44 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para os períodos de cura de 3 e 7 dias respectivamente.

A incorporação de adições minerais promove alterações físicas e químicas na microestrutura do concreto. Estas alterações foram observadas por meio dos ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Termogravimetria, ambos discutidos por Stein (2016) em pastas de cimento com teores de 0, 5%, 10%, 15% e 20% de CLETA. Por meio do ensaio de PIM, foi observado que a área dos poros aumentou junto com o teor de CLETA incorporado, indicando um aumento na porosidade da pasta cimentícia. Além disso, foi verificado que, para as amostras com relação a/agl de 0,65, houve uma grande variação no volume dos poros, especialmente para as misturas com teores de 15% e 20% de CLETA, onde ocorreu uma diminuição no volume de poros maiores ($> 50\text{nm}$) e um acréscimo no volume de poros menores ($< 50\text{nm}$), indicando uma grande influência do teor de CLETA sobre a porosidade do material e, em consequência, sobre a intensidade da carbonatação.

Por meio do ensaio de TG, foi observado que o teor de CH das misturas diminuiu à medida que o teor de CLETA aumentou. Desse modo, ocorre uma

diminuição da reserva alcalina, aumentando a intensidade da carbonatação. Para a mistura 20L foram observados, para as amostras com relação a/agl de 0,50 e 0,65, acréscimos de 70% e 20% nos coeficientes de carbonatação, respectivamente, enquanto o teor de CH de ambas as misturas reduziu em torno de 30%. Observa-se, assim, que a carbonatação das amostras com relação 0,50 sofre uma maior influência da diminuição da reserva alcalina, enquanto a carbonatação das amostras com relação a/agl de 0,65 é mais influenciada pela porosidade da matriz de cimento.

As profundidades de carbonatação, das misturas REF, 5L, 10L, 15L e 20L foram analisadas para três níveis de resistência (35MPa, 45MPa e 55MPa). Os valores de resistência à compressão, na idade de 28 e 91 dias, foram obtidos por Hengen (2014), para concretos semelhantes aos utilizados nesta pesquisa. As menores relações a/agl foram obtidas para a mistura REF, com 3 dias de cura, resultando em coeficientes de carbonatação de 2,44 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 0,39 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 0,09 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para os níveis de resistência, na idade de 28 dias, de 35MPa, 45MPa e 55MPa, respectivamente. Para os mesmos níveis de resistência, na idade de 91 dias, foram obtidos coeficientes de carbonatação de 7,36 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 1,17 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 0,27 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

As maiores relações a/agl, para os níveis de resistência de 45MPa e 55MPa, foram obtidas para a mistura 20L, com 7 dias de cura, resultando em coeficientes de carbonatação de 4,44 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,17 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, na idade de 28 dias, e 5,27 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,63 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para os mesmos níveis de resistência, na idade de 91 dias. Para o nível de resistência de 35MPa, aos 28 e 91 dias, os maiores coeficientes de carbonatação foram obtidos, respectivamente, para as misturas 10L (13,38 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$), com 3 dias de cura, e REF (7,61 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$), com 7 dias de cura.

A incorporação de CLETA ao concreto resulta no aumento da resistência à compressão do mesmo. Em função disso, a mistura 20L atingiu os mesmos níveis de resistência que a mistura REF, com relações a/agl mais altas. Desse modo, a mistura 20L apresentou uma matriz cimentícia mais porosa e com uma reserva alcalina mais abaixo, resultando em coeficientes de carbonatação mais elevados que a mistura REF.

Por fim, foi estimado o tempo necessário, em anos, para que cada mistura atingisse uma profundidade de 25mm, a partir dos coeficientes de carbonatação obtidos em igualdade de resistência. A adição de CLETA se demonstrou inviável, do

ponto de vista da carbonatação, para concretos com resistência de 35MPa, apresentando vida útil inferior à 50 anos. Para concretos com resistência de 45MPa aos 28 dias e de 55MPa aos 91 dias, teores de até 15% de CLETA podem ser utilizados sem prejudicar a vida útil da estrutura. Já para concretos com resistência de 55MPa aos 28 dias, teores de 20% de CLETA podem ser utilizados sem prejudicar a vida útil deste frente à carbonatação.

Portanto, apesar da incorporação de CLETA prejudicar o desempenho do concreto frente à carbonatação, sua utilização se torna viável em concretos com relações a/agl mais altas.

8 ESTUDOS FUTUROS

Com o objetivo de analisar a viabilidade técnica do uso da cinza de lodo de ETA como adição mineral e dando continuidade deste trabalho, sugere-se o estudo de outras propriedades relacionadas à durabilidade do concreto e mencionadas a seguir:

- a) reação álcali-agregado;
- b) penetração de cloretos;
- c) teor de cloretos fixados;
- d) resistência a sulfatos;
- e) permeabilidade ao oxigênio.

REFERÊNCIAS

- ACHON, C. L; SOARES, L. V; MEGDA, C. R. Impactos ambientais causados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, MS. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2005.
- AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement e concrete composites**, v. 25, p. 459-471, 2003.
- AHMAD, T; AHMAD, K; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of cleaner production**, v.30, p. 1-13, 2016.
- ALGHAMDI, S. A; AHMAD, S. Service life prediction of RC structures based on correlation between electrochemical and gravimetric reinforcement corrosion rates. **Cement e concrete composites**, v. 47, p. 64-68, 2014.
- AMARAL; F. D. **Resistividade elétrica e absorção capilar de concretos compostos com cinza de lodo de ETA**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- ANN, K. Y. et al. Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. **Construction and building materials**, v. 24, p. 1494-1501, 2010.
- ANTOLINI; M. B. **Retração total e penetração de cloretos em concretos compostos por cinza de lodo de ETA e outras adições minerais**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- ARANDIGOYEN, M. et al. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. **Applied surface science**, v. 252, p. 7562 - 7571, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004c.
- _____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991b.

_____. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 10**: Cimento Portland - Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004b. 129 p.

_____. **NBR NM 11-1**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 1: Método ISO. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR NM 12**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR NM 13**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR NM 14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004e.

_____. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004f.

_____. **NBR NM 17**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004g.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004h.

_____. **NBR NM 19**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004i.

_____. **NBR NM 21**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004j.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2004k.

_____. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 43:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003d.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and building materials**, v. 17, p. 147-152, 2003.

BAROGHEL-BOUNY, V; CAPRA, B; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. CASCUDO, O; CARASEK H. (Coord.). **Durabilidade do concreto:** bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. IBRACON, 2014.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto:** ciência e tecnologia. IBRACON, 2011.

BENHELAL, E. et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of cleaner production**, v. 51, p. 142-161, 2013.

BERNAL, S. et al. Natural carbonation of aged alkali-activated slag concretes. **Materials and structures**, v. 47, p. 693-707, 2014.

BERNAL, S. et al. Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/metakaolin blended concretes. **Materials and structures**, v. 48, p. 653-669, 2015.

BITTENCOURT, S. et al. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Eng Sanit Ambient.**, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.

BOLINA, F. et al. Revisão da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto frente a mecanismos químicos de deterioração. In: XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y XIV CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN CONPAT, 2013, Colômbia. **Anais...** Colômbia: CONPAT, 2013.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and concrete research**, v. 40, p. 284-292, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, DF, 2013.

CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, 2005.

CASCUDO, O; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

CEBALLOS, B. S. O; DANIEL, L. A; BASTOS, R. K. X. Tratamento de água para consumo humano: panorama mundial e ações do Prosab. In: PÁDUA, V. L. (Coord.). **Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. ABES, Rio de Janeiro, 2009.

CHANG, J; FANG, Y. Quantitative analysis of accelerated carbonation products of the synthetic calcium silicate hydrate (C-S-H) by QXRD and TG/MS. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 119, p. 57-62, 2015.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição de lodos de estações de tratamento de água**. ABES, Rio de Janeiro, 1999.

CUI, H. et al. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and building materials**, v. 93, p. 522-527, 2015.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para o estudo da microestrutura. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência dos materiais**. IBRACON, 2007.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

DE LA VARGA, I. et al. Fluid transport in high volume fly ash mixtures with and without internal curing. **Cement & concrete composites**, v. 45, p. 102-110, 2014.

DEUS, J. M. et al. The electrochemical behavior of steel rebars in concrete: an electrochemical impedance spectroscopy study of the effect of temperature. **Electrochimica acta**, v. 131, p. 106-115, 2014.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A; VOLTAN; P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos, SP: LDiBe, 2012.

DUARTE, R. G. et al. Corrosion behavior of stainless steel rebars embedded in concrete: an electrochemical impedance spectroscopy study. **Electrochimica acta**, v. 124, p. 218-224, 2014.

DUONG, V. B; SAHAMITMONGKOL, R; TANGTERMSIRIKUL, S. Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials. **Construction and building materials**. v. 40, p. 1066-1075, 2013.

ESCADEILLAS, G; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos. CASCUDO, O; CARASEK H. (Coord.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. IBRACON, 2014.

FERREIRA, A; FRÉZ, J. C; MEDEIROS, M. H. F. Reposição da reserva alcalina de concreto com adição pozolânica usando cal hidratada: um estudo sobre carbonatação acelerada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, 2013, Gramado, RS. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto, 2013.

FERREIRA, F. G. S; HELENE, P. H. L. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada a partir de um programa interlaboratorial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal, RN. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, 2005.

FIGUEIREDO, E. P; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

FRÍAS, M; GOÑI, S. Accelerated carbonation effect on behavior of ternary Portland cements. **Composites: part B**, v. 48, p. 122-128, 2013.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

GASTALDINI, A. L. G.. et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and building materials**, v. 94, p. 513-520, 2015.

GRUYAERT, E; VAN DEN HEEDE, P; DE BELIE; N. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. **Cement & concrete composites**, v. 35, p. 39-48, 2013.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, SP: PINI, 1992.

HENGEN, M. F. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto – (resistência à compressão)**. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

HO, D. W. S; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and concrete research**, v. 17, n.3. 489-504, 1987.

HOPPE; A. E. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

HOPPE; T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOPPEN, C, et al. Co-disposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, v. 51, n. 318, p. 85-95, abr./jun., São Paulo, 2005.

HUSSAIN, R. R; ISHIDA, T; WASIM, M. Experimental investigation of time dependent non-linear 3D relationship between critical carbonation depth and corrosion of steel in carbonated concrete. **Corrosion Engineering. Science and technology**, v. 46, n.5. 657-660, 2011.

HUSSEIN, A. A. E. et al. Compressive strength and microstructure of sugar cane bagasse ash concrete. **Research journal of applied sciences, engineering and technology**, v. 7, n.12. 2569-2577, 2014.

HYVERT, N. et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and concrete research**, v. 40, p. 1582-1589, 2010.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PSNB) 2008**, Rio de Janeiro, 2010.

ISAIA, G. C. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente construído**, v. 4, n. 2, p. 19-30, abr./jun., Porto Alegre, 2004.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.; GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural do concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43º, 2001, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...Foz do Iguaçu**, 2001, 16p.

KANNING, R. C. et al. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. **Construction and building materials**, v. 54, 460-465, 2014.
KHALIL, E. A. B; ANWAR, M. Carbonation of ternary cementitious concrete systems containing fly ash and silica fume. **Water science**, v. 29, p. 36-44, 2015.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and building materials**, v. 20, p. 744-753, 2006.

KIRCHHEIM, A. P. et al. Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption. **Construction and building materials**, v. 84, p. 320-330, 2015.

KIZINIEVIC, O. et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and building materials**, v. 41, 464-473, 2013.

KOLIO, A. et al. Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate. **Engineering structures**, v. 63, p. 42-52, 2014.

KULAKOWSKI, M. P; PEREIRA, F. M; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and building materials**, v. 23, p. 1189-1195, 2009.

LEEMANN, A. et al. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. **Cement & concrete composites**. v. 62, p. 33-43, 2015.

LI, G. et al. Determination of the apparent activation energy of concrete carbonation. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**. v. 28, n. 5, p. 944-949, 2013.

MARQUES, P. F; COSTA, A. Service life of RC structures: carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies. **Construction and building materials**, v. 24, p. 258-265, 2010.

MARQUES, P. F; CHASTRE, C; NUNES, A. Carbonation service life modeling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. **Cement & concrete composites**, v. 37, p. 171-184, 2013.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C. et al. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of environmental management**, v. 95, p. S343-S348, 2012.

MEDEIROS, M. H. F; ANDRADE, J. J. O; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2014.

MEIRA, G. R; et al. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and building materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.

MENEZES, M. P. **Gerenciamento do resíduo sólido oriundo de estação de tratamento de água e estudo da disposição no meio ambiente**. 2006. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Química Agroindustrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia, GO, 2006.

METALSSI, O. O. et al. Consequences of carbonation on microstructure and drying shrinkage of a mortar with cellulose ether. **Construction and building materials**. v. 34, p. 218-225, 2012.

MOHAMMED, M. K; DAWSON, A. R; THOM, N. H. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. **Construction and building materials**, v. 49, p. 84-92, 2013.

MORANDEAU, A; THIÉRY, M; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and concrete research**, v. 56, p. 153-170, 2014.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.

NUNES; D. G. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2014. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, p. 363 – 373, Jul./Aug., 1991.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULON, V; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

PHAM, S. T; PRINCE, W. Effects of carbonation on the microstructure of cement materials: influence of measuring methods and of types of cement. **International journal of concrete structures and materials**, v. 8, n. 4, p. 327-333, 2014.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RABEHI, M; MEZGHICHE, B; GUETTALA. S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. **Construction and building materials**, v. 45, p. 123-129, 2013.

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição de lodos de estações de tratamento de água**. ABES, Rio de Janeiro, 1999.

RIBEIRO, D. V; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. RIBEIRO, D. V. (org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014, 1. ed, 272 p.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo, SP: Blucher, 2001.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo, SP: Blucher, 2009.

RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**. v. 32, n. 217, Apr. 1999.

ROUGEAU, P; GUIRAUD, P. A durabilidade no contexto normativo europeu. CASCUDO, O; CARASEK H. (Coord.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. IBRACON, 2014.

SALES, A; SOUZA, F. R; ALMEIDA, F. C. R. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. **Construction and building materials**, v. 25, p. 2793-2798, 2011.

SHI, H; XU, B; ZHOU, X. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. **Construction and building materials**, v. 23, p. 1980-1985, 2009.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2014.gif>. Acesso em: 10 out. 2015.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do cimento**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Dezembro%202015.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2016.

STEIN, R. T. **Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de lodo de ETA**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

STROEVEN, P; HU, J; KOLEVA D. A. Concrete porosimetry: aspects of feasibility, reliability and economy. **Cement & concrete composites**, v. 32, p. 291-299, 2010.
TANG, S. W. et al. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and concrete research**, v. 78, p. 143-154, 2015.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied clay science**, v. 53, p. 561-565, 2011.

TORGAL, F. P. et al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: evaluation, use of SCMs and/or RAC. **Construction and building materials**, v. 36, p. 141-150, 2012.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Estocolmo: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

USÓN, A. A. et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 23, p. 242-260, 2013.

UWASU, M; HARA, K; YABAR, H. World cement production and environmental implications. **Environmental development**, v. 10, p. 36-47, 2014.

VAGHETI; M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. 2005. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VALCUENDE, M; PARRA, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. **Construction and building materials**, v. 24, p. 848-853, 2010.

WAN, X. et al. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation. **Journal of Zhejiang university – Science A**, v. 14, p. 71-78, 2013.

WOLFF, E; SCHWABE, W. K; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of cleaner production**, v. 96, p. 282-289, 2015.

YAGÜE, A. et al. Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants. **Cement and concrete research**, v. 35, p. 1064-1073, 2005.

ZENG, Q. et al. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. **Cement and concrete research**, v. 42, p. 194-204, 2012.

ZHANG, X. et al. Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. **Applied clay science**, v. 79, p. 36-40, 2013.

ZHOU, J; YE, G; VAN BREUGEL, K. Characterization of pore structure in cement-based materials using pressurization-depressurization cycling mercury intrusion porosimetry (PCD_MIP). **Cement and concrete research**, v. 40, p. 1120-1128, 2010.

ZHOU, Y. et al. Carbonation-induced and chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures. **Journal of materials in civil engineering**, v. 27, p. 1-17, 2015.

ANEXOS

Anexo A – Resultados dos ensaios de Porosimetria por Intrusão de mercúrio

Mistura	Relação a/agl	Área de poro (m²/g)	Diâmetro crítico (µm)
REF	0,35	26,66	0,0603
	0,50	37,90	0,0905
	0,65	55,89	0,1813
5L	0,35	23,50	0,0724
	0,50	44,26	0,0906
	0,65	56,79	0,1208
10L	0,35	30,33	0,0671
	0,50	50,58	0,0905
	0,65	69,30	0,1006
15L	0,35	19,35	0,0603
	0,50	59,20	0,0724
	0,65	85,09	0,0824
20L	0,35	28,71	0,0603
	0,50	75,34	0,0725
	0,65	90,21	0,0905

Fonte: Stein (2016)

Anexo B – Volume dos poros para diferentes faixas de distribuição de tamanho

A/AgI = 0,35							
Volume dos poros (mm³/g) para diferentes faixas de distribuição de tamanho dos poros							
Mistura	3 - 5 nm	5 - 25 nm	25 - 50 nm	50 - 100 nm	100 - 300 nm	300 - 600 nm	600 - 1000nm
REF	7,76	29,70	31,66	63,96	1,18	0,33	0,30
5L	7,88	24,02	29,10	66,00	8,34	1,25	0,66
10L	14,30	25,45	26,64	65,15	2,51	1,32	0,49
15L	4,51	25,85	23,10	57,30	1,33	0,41	0,28
20L	10,40	31,70	32,92	52,97	0,74	0,31	0,23

A/AgI = 0,50							
Volume dos poros (mm³/g) para diferentes faixas de distribuição de tamanho dos poros							
Mistura	3 - 5 nm	5 - 25 nm	25 - 50 nm	50 - 100 nm	100 - 300 nm	300 - 600 nm	600 - 1000nm
REF	10,91	48,70	38,50	83,40	40,30	0,73	0,51
5L	13,30	59,65	36,40	91,70	41,20	1,30	0,63
10L	17,80	61,70	36,20	100,60	25,52	1,42	0,90
15L	23,60	66,40	32,64	97,14	20,90	0,66	0,53
20L	38,90	69,90	30,50	98,70	8,20	0,34	0,47

A/AgI = 0,65							
Volume dos poros (mm³/g) para diferentes faixas de distribuição de tamanho dos poros							
Mistura	3 - 5 nm	5 - 25 nm	25 - 50 nm	50 - 100 nm	100 - 300 nm	300 - 600 nm	600 - 1000nm
REF	16,80	76,40	46,00	60,50	138,40	7,20	0,76
5L	16,40	80,80	45,70	62,70	118,10	2,11	0,84
10L	21,00	98,00	16,80	92,60	87,70	6,50	1,22
15L	28,60	110,40	45,60	150,00	13,20	1,00	0,52
20L	33,20	113,70	47,70	143,10	32,70	1,00	0,52

Fonte: Stein (2016)

Anexo C – Teor de CH, obtido pelo ensaio de Termogravimetria

Mistura	Rel a/agl	Teor de CH (%)
REF	0,35	16,08
	0,50	19,88
	0,65	21,30
5L	0,35	15,04
	0,50	17,43
	0,65	18,66
10L	0,35	14,01
	0,50	16,40
	0,65	18,50
15L	0,35	12,39
	0,50	15,07
	0,65	15,97
20L	0,35	12,21
	0,50	14,01
	0,65	14,11

Fonte: Stein (2016)

Anexo D – Resistência à compressão

Mist.	Rel. a/agl	Resistência à compressão axial (MPa)			
		28 dias		91 dias	
		3 dias de cura	7 dias de cura	3 dias de cura	7 dias de cura
REF	0,35	49,80	56,40	58,40	61,80
	0,50	40,60	44,80	46,20	47,40
	0,65	30,10	33,40	35,10	36,30
5L	0,35	53,00	73,20	59,40	74,30
	0,50	41,70	52,60	48,90	53,50
	0,65	32,70	37,80	40,20	42,60
10L	0,35	68,00	70,50	73,50	75,60
	0,50	50,00	52,70	54,10	58,00
	0,65	37,70	39,10	42,70	44,10
15L	0,35	64,70	69,20	76,90	82,30
	0,50	50,80	52,50	52,90	54,40
	0,65	31,70	37,10	35,60	41,00
20L	0,35	69,20	73,90	76,40	79,00
	0,50	49,60	54,20	53,00	57,80
	0,65	37,80	41,80	42,70	45,40

Fonte: Hengen (2014)

Anexo E – Coeficientes A, B e r^2 , obtidos a partir dos valores de resistência à compressão aos 28 dias

Resistência à compressão – 28 dias							
Mistura	Cura (dias)	Relação a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	A	B	r^2
REF	3	49,8	40,6	30,1	90,991	5,346	0,99
	7	56,4	44,8	33,4	104,954	5,728	1,00
5L	3	53,0	41,7	32,7	93,111	5,000	1,00
	7	73,2	52,6	37,8	158,125	9,036	1,00
10L	3	68,0	50,0	37,7	134,586	7,129	1,00
	7	70,5	52,7	39,1	140,281	7,129	1,00
15L	3	64,7	50,8	31,7	154,525	10,765	0,97
	7	69,2	52,5	37,1	144,877	7,980	1,00
20L	3	69,2	49,6	37,8	138,676	7,499	1,00
	7	73,9	54,2	41,8	142,233	6,668	1,00

Anexo F – Coeficientes A, B e r^2 , obtidos a partir da resistência à compressão aos 91 dias

Resistência à compressão – 91 dias							
Mistura	Cura (dias)	Relação a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	A	B	r^2
REF	3	58,4	46,2	35,1	106,414	5,458	1,00
	7	61,8	47,4	36,3	114,815	5,888	1,00
5L	3	59,4	48,9	40,2	93,541	3,673	1,00
	7	74,3	53,5	42,6	139,637	6,383	0,99
10L	3	73,5	54,1	42,7	136,773	6,109	0,99
	7	75,6	58,0	44,1	141,906	6,206	1,00
15L	3	76,9	52,9	35,6	189,234	13,002	1,00
	7	82,3	54,4	41,0	181,552	10,186	0,99
20L	3	76,4	53,0	42,7	146,893	6,950	0,98
	7	79,0	57,8	45,4	148,936	6,324	0,99