

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

Silvane Santos da Silva

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE
CONCRETOS COM FÍLER CALCÁRIO, EM ALTOS TEORES, CINZA
DE CASCA DE ARROZ E ATIVADORES**

Santa Maria, RS
2019

Silvane Santos da Silva

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS COM
FÍLER CALCÁRIO, EM ALTOS TEORES, CINZA DE CASCA DE ARROZ E
ATIVADORES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS
2019

Silva, Silvane Santos da
Avaliação de propriedades físico-mecânicas de concretos
com fíler calcário, em altos teores, cinza de casca de
arroz e ativadores / Silvane Santos da Silva.- 2019.
113 p.; 30 cm

Orientador: Geraldo Cechella Isaia
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Adições minerais 2. Durabilidade 3. Concreto
estrutural 4. Empacotamento de partículas I. Isaia,
Geraldo Cechella II. Título.

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

© 2019

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

E-mail: silvaneengciv@hotmail.com

Silvane Santos da Silva

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS COM
FÍLER CALCÁRIO, EM ALTOS TEORES, CINZA DE CASCA DE ARROZ E
ATIVADORES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 06 de novembro de 2019:

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Dr. (UFSM)

Juarez Hoppe Filho, Dr. (UFOB) (Vídeo conferência)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

A Deus pelo dom da vida e por me presentear com saúde, inteligência e a oportunidade de crescimento na busca do conhecimento.

Aos meus familiares por todo apoio, incentivo, durante essa trajetória. Sem vocês isso não teria sido possível, a vocês meus sinceros agradecimentos.

AGRADECIMENTOS



Gostaria de agradecer ao meu estimado orientador, professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, sempre muito presente, dando-me todo o suporte necessário.

Ao PPGEC, em especial a secretária Luciane pelos inumeros questionamentos resolvidos.

Aos colegas do GEPECON por todo auxílio, sempre muito solícitos, assim como todos os bolsistas e voluntários que participaram durante todo o processo.

Ao professor Dr. André Lübeck que nunca mediu esforços em sanar minhas dúvidas, assim como o Tec. do LMCC – UFSM, Vilson Machado, dando todo o suporte necessário nos ensaios laboratoriais e os queridos tec. do LMCC – URI Santo Ângelo, Eduardo Chaves e Pablo Mello, sempre indescritíveis.

A amada Engenheira Civil, Mestre Marina Copetti, uma amiga fiel, nunca mediu esforços em auxiliar nos mais variados questionamentos.

Ao amor da minha vida, Luis Carlos, sempre presente, incentivando, auxiliando nas mais diversas atividades, “meu bolsista favorito”.

A minha família que está sempre acreditando em mim, Pai Joaquim, Mãe Jussara, Sogro Carlos e Sogra Eli.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS COM FÍLER CALCÁRIO, EM ALTOS TEORES, CINZA DE CASCA DE ARROZ E ATIVADORES

AUTORA: Silvane Santos da Silva
ORIENTADOR: Geraldo Cechella Isaia

A construção civil é um dos maiores setores da economia em virtude de suprir demandas básicas. O material principal as atividades da construção civil é o cimento Portland. Sabe-se que a sua substituição por adições minerais propicia ganhos com relação a propriedades mecânicas e redução de impactos ambientais do concreto. Entre as adições inertes mais utilizadas pela indústria cimenteira está o fíler calcário moído. Assim, buscando-se desenvolver misturas de concreto estrutural com elevado teor de substituição do cimento por fíler calcário, mas que também apresentassem desempenho mecânico semelhante as resistências características usuais (20 a 50 MPa). Desenvolveu-se o programa experimental com misturas granulometricamente otimizadas através do software Emma, de misturas binárias de fíler calcário e ternárias de fíler calcário com cinza de casca de arroz, ativadas quimicamente por sulfato de cálcio e hidróxido de cálcio. Com teores de substituição de até 70% em relação ao volume do cimento, buscou-se avaliar as propriedades mecânicas, compressão axial aos 7, 28 e 91 dias, tração por compressão diametral, aos 28 e 91 dias, módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias e retração por secagem do concreto nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, comparados a uma mistura de controle. Os resultados evidenciaram que é possível a utilização de fíler calcário em altos teores, com ganhos de resistência significativos em misturas binárias com 50% e 60% de substituição do cimento. A adição de sulfato de cálcio propiciou elevação da resistência a compressão axial nas idades avançadas para a mistura com 70% de substituição. O hidróxido de cálcio potencializou o ganho de resistência na idade de 28 dias para a mistura ternária com cinza de casca de arroz, quando comparada com a adição de sulfato de cálcio. Em relação a retração por secagem, todas as misturas com substituições apresentaram retrações inferiores que a mistura de controle. Através do estudo desenvolvido é possível uma redução do consumo de clínquer, colaborando para a redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Adições minerais. Durabilidade. Concreto estrutural. Empacotamento de partículas.

ABSTRACT

EVALUATION OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-LIME CONCRETE CONCRETES, RICE GRAY GRAY AND ACTIVATORS

AUTHOR: SILVANE SANTOS DA SILVA
ADVISOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

Construction is one of the largest sectors of the economy by virtue of meeting basic demands. The main material the construction activities is Portland cement. It is known that its substitution by mineral additions provides gains regarding mechanical properties and reduction of environmental impacts of concrete. Among the inert additions most commonly used by the cement industry is ground limestone. Thus, seeking to develop structural concrete mixtures with high content of cement replacement by limestone filler, but also presenting mechanical performance similar to the usual characteristic resistances (20 to 50 MPa). The experimental program was developed with granulometrically optimized mixtures using the Emma software, binary mixtures of limestone and ternary limes of rice carcass ash chemically activated by calcium sulfate and calcium hydroxide. With substitution contents of up to 70% in relation to cement volume, the aim was to evaluate the mechanical properties, axial compression at 7, 28 and 91 days, traction by diametrical compression at 28 and 91 days, modulus of elasticity at 28 and 91 days and drying shrinkage at 7, 14, 28 and 56 days compared to a control mixture. The results showed that it is possible to use high strength limestone fillers, with significant strength gains in binary mixtures with 50% and 60% cement substitution. The addition of calcium sulfate increased axial compression strength in the advanced ages for the 70% substitution mixture. Calcium hydroxide enhanced the strength gain at the age of 28 days for the ternary mixture with rice husk ash when compared with the addition of calcium sulfate. With respect to drying shrinkage, all substitution mixtures had lower shrinkages than the control mixture. Through the study developed it is possible to reduce clinker consumption, contributing to the reduction of environmental impacts.

Keywords: Mineral additions. Durability. Structural concrete. Particle packing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da resistência à compressão de concretos em relação ao tempo de cura	29
Figura 2 – Empacotamento de partículas.....	33
Figura 3 – Espaço entre partículas da pasta – Inter Particle Spacing (IPS).....	35
Figura 4 – Distância entre os agregados - Maximum Paste Thickness (MPT)	35
Figura 5 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica	37
Figura 6 – Efeito do calcário em relação a resistência à compressão.....	38
Figura 7 – Resistência à compressão de misturas ternárias de calcário e cinza de casca de arroz.....	40
Figura 8 – Resistência à compressão de mistura ternária de SA e CCA	41
Figura 9 – Curvas granulométricas cimento (CP), fíler calcário (FC) e cinza de casca de arroz (CCA).....	47
Figura 10 – Difratoograma do cimento	49
Figura 11 – Distribuição do tamanho das partículas do cimento.....	50
Figura 12 – Micrografia cimento	51
Figura 13 – Curva termogravimétrica do cimento CPV-ARI.....	52
Figura 14 – Difratoograma da cinza de casca de arroz.....	54
Figura 15 – Micrografia CCA.....	55
Figura 16 – Distribuição do tamanho das partículas da CCA	55
Figura 17 – Curva termogravimétrica da CCA.....	56
Figura 18 – Difratoograma do fíler calcário	57
Figura 19 – Micrografia grãos do FC	58
Figura 20 – Distribuição do tamanho das partículas do FC.....	58
Figura 21 – Curva termogravimétrica do FC.....	59
Figura 22 – Difratoograma do GS	60
Figura 23 – Micrografia grãos do GS	61
Figura 24 – Distribuição do tamanho das partículas do Sulfato de cálcio dihidratado (GS)..	61
Figura 25 – Curva termogravimétrica do GS	62
Figura 26 – Difratoograma da CH I.....	63
Figura 27 – Micrografia grãos do CH I	64
Figura 28 – Distribuição do tamanho das partículas do Hidróxido de cálcio.....	64
Figura 29 – Curva termogravimétrica do CH I.....	65
Figura 30 – Distribuição do tamanho das partículas dos agregados miúdos	67
Figura 31 – Distribuição do tamanho das partículas do agregado graúdo.....	67
Figura 32 – Equipamentos utilizados no ensaio Marsh. Da esquerda para a direita: misturador mecânico, funil Marsh e cronômetro	69
Figura 33 – Compatibilidade do cimento com o aditivo plastificante MasterGlenium 54.....	69
Figura 34 – Mistura com 50% de cimento e 50% de fíler calcário (50FC).....	71
Figura 35 – Mistura com 40% de cimento e 60% de fíler calcário (60FC).....	71
Figura 36 – Mistura com 30% de cimento, 70% de fíler calcário e 5% de sulfato de cálcio (70FC5GS)	72
Figura 37 – Mistura com 40% de cimento, 50% de fíler calcário, 10% de cinza de casca de arroz e 10% de hidróxido de cálcio (50FC10CCA10CHI)	72
Figura 38 – Mistura com 40% de cimento, 50% de fíler calcário, 10% de cinza de casca de arroz e 5% de sulfato de cálcio (50FC10CCA5GS).....	73
Figura 39 – Compressão axial	76
Figura 40 – Tração por compressão diametral	77

Figura 41 – Corpo de prova após ruptura.....	77
Figura 42 – Módulo de elasticidade	79
Figura 43 – Fôrma prismática	80
Figura 44 – Ambiente de cura dos corpos de prova de retração	81
Figura 45 – Comparador de expansibilidade	82
Figura 46 – Temperatura das misturas no estado fresco	86
Figura 47 – Resistência à compressão axial.....	87
Figura 48 – Resistência a tração por compressão diametral	92
Figura 49 – Resultados de módulo de elasticidade	96
Figura 50 – Comparativo E (GPa)	98
Figura 51 – Resistência por módulo de elasticidade aos 28 dias.	98
Figura 52 – Resistência por módulo de elasticidade aos 91 dias	99
Figura 53 – Retrações (%).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emissões de CO ₂ por Tonelada de Clínquer	26
Tabela 2 – Caracterização físicas do cimento	49
Tabela 3 – Diâmetros médios das adições minerais.....	50
Tabela 4 – Caracterização por análise termodiferencial e termogravimétrica.....	51
Tabela 5 – Perdas de massa e teores de portlandita e calcário.....	52
Tabela 6 – Composição química da CCA.....	53
Tabela 7 – Caracterização físicas da CCA.....	54
Tabela 8 – Diâmetro médio da CCA.....	56
Tabela 9 – Composição química do FC	57
Tabela 10 – Caracterização físicas do FC	57
Tabela 11 – Diâmetro médio do fíler calcário	59
Tabela 12 – Caracterização físicas do GS.....	60
Tabela 13 – Diâmetros médios do GS.....	62
Tabela 14 – Caracterização físicas do CH I.....	63
Tabela 15 – Diâmetros médios da CH I.....	65
Tabela 16 – Características físicas dos agregados miúdos e graúdos	66
Tabela 17 – Características dos aditivos	68
Tabela 18 – Traços unitários dos concretos em massa	73
Tabela 19 – Consumo de materiais por m ³ de concreto. Aditivo em l/m ³ e demais materiais em kg/m ³	74
Tabela 20 – Características das misturas no estado fresco	85
Tabela 21 – Variação resistência compressão axial.....	88
Tabela 22 – Consumo de clínquer/MPa	89
Tabela 23 – ANOVA fator único compressão axial 7 dias.....	90
Tabela 24 – ANOVA fator único compressão axial 28 dias.....	90
Tabela 25 – ANOVA fator único compressão axial 91 dias.....	90
Tabela 26 – Teste tukey compressão axial 7 dias	90
Tabela 27 – Teste tukey compressão axial 28 dias	91
Tabela 28 – Teste tukey compressão axial 91 dias	91
Tabela 29 – Módulo de elasticidade E _c (GPa) ensaiado e através da (ABNT NBR 6118, 2014).....	97
Tabela 30 – ANOVA fator único módulo de elasticidade 28 dias.....	99
Tabela 31 – ANOVA fator único módulo de elasticidade 91 dias.....	100
Tabela 32 – Teste tukey módulo de elasticidade 28 dias	100
Tabela 33 – Teste tukey módulo de elasticidade 91 dias	100
Tabela 34 – ANOVA fator único retração por secagem	102
Tabela 35 – Teste Tukey retração por secagem	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	23
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	O FÍLER CALCÁRIO E A CINZA DE CASCA DE ARROZ ATIVADOS QUIMICAMENTE, NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS DO CONCRETO	25
2.1	MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETOS.....	26
2.1.1	Cinza de casca de arroz	27
2.1.2	Fíler calcário	30
2.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	32
2.2.1	Teorias de empacotamento	34
2.2.2	Software de empacotamento EMMA	36
2.2.3	Misturas binárias de fíler com moagem separada	37
2.2.4	Misturas ternárias de fíleres e cinza de casca de arroz	39
2.2.5	Ativação química de misturas com fíler calcário e cinza de casca de arroz	41
3	METODOLOGIA	45
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	45
3.1.1	Variáveis independentes	45
3.1.2	Variáveis intervenientes	45
3.1.3	Variáveis dependentes	46
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS	46
3.2.1	Aglomerantes e ativadores	46
3.2.1.1	<i>Cimento</i>	48
3.2.1.2	<i>Cinza de casca de arroz</i>	53
3.2.1.3	<i>Fíler calcário</i>	56
3.2.1.4	<i>Sulfato de cálcio dihidratado</i>	60
3.2.1.5	<i>Hidróxido de cálcio</i>	62
3.2.2	Agregados	65
3.2.3	Aditivo químico	68
3.2.3.1	<i>Verificação da compatibilidade entre cimento e aditivos pelo método Marsh</i>	68
3.2.4	Água	70
3.3	DOSAGEM E EMPACOTAMENTO	70
3.4	ENSAIOS REALIZADOS	74
3.4.1	Estado fresco	74
3.4.1.1	<i>Massa específica, rendimento e teor de ar incorporado</i>	74
3.4.1.2	<i>Temperatura interna e externa</i>	74
3.4.1.3	<i>Consistência pelo abatimento do tronco de cone</i>	75
3.4.2	Estado endurecido	75
3.4.2.1	<i>Ensaio de resistência à compressão axial</i>	75
3.4.2.2	<i>Ensaio de resistência à compressão diametral</i>	76
3.4.2.3	<i>Módulo de elasticidade</i>	78
3.4.2.4	<i>Retração por secagem</i>	79
3.4.2.5	<i>Análise estatística e tratamento de dados</i>	82

4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
4.1	ESTADO FRESCO	85
4.2	ESTADO Endurecido.....	86
4.2.1	Resistência à compressão axial	86
4.2.1.1	<i>Evolução da resistência a compressão axial</i>	87
4.2.1.2	<i>Análise estatística compressão axial</i>	90
4.2.2	Resistencia à tração por compressão diametral	91
4.2.2.1	<i>Análise estatística tração por compressão diametral</i>	94
4.2.3	Módulo de elasticidade	96
4.2.3.1	<i>Análise estatística módulo de elasticidade</i>	99
4.2.4	Retração por secagem	100
4.2.4.1	<i>Análise estatística retração por secagem</i>	102
5	CONCLUSÕES	103
5.1	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam aproximadamente de 3% a 5% em massa, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação (BATAGGIN, 2017). Considerado insumo fundamental na cadeia produtiva da indústria da construção, componente básico de concretos, argamassas é o material feito pelo homem mais utilizado no planeta (SNIC, 2019).

De acordo com o (SNIC, 2019) o Brasil, como país em desenvolvimento, tem um importante programa de infraestrutura a ser implementado, e o aumento da população, aliado aos seus crescentes padrões de urbanização, deverá impulsionar a demanda por cimento nas próximas décadas.

É impossível andar pelas cidades sem ver concreto de alguma forma. Quando um material se torna tão integral à estrutura quanto o concreto, é importante analisar seus impactos ambientais para concluir se o material é tão sustentável quanto é predominante (RAMEZANIANPOUR, 2014).

Em nível de sociedade existe conscientização, se não plena, bastante ampla, sobre a necessidade de cada setor contribuir para a sustentabilidade local ou regional, sob a ótica do Relatório da Comissão Brundtland que definiu os conceitos e as necessidades para uma sociedade sustentável, no documento *Our Common Future*, organizado pela ONU (ONU, 1987). Entretanto, o aumento da população mundial, que hoje atinge 7,7 bilhões de habitantes (WORLDMETERS, 2019), a elevação do padrão de consumo da sociedade moderna e dos avanços tecnológicos atuais, por um lado, e o declínio na disponibilidade de recursos naturais e seu impacto sobre os ecossistemas por outro, tornam pequena a margem de ação dos agentes envolvidos na solução do desenvolvimento sustentável.

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

Na Indústria da Construção Civil este panorama é mais dramático pela amplitude mundial e necessidade crescente de novas moradias e obras de infraestrutura. Segundo Agopyan (2017), a construção civil é responsável pelo consumo de 40% a 75% da

matéria-prima produzida no planeta, sendo produzidos anualmente, cerca de 500 kg de entulhos por pessoa.ano, equivalentes 3,75 bilhões de toneladas, fazendo deste segmento industrial o mais poluente do planeta.

O setor de cimento conta com 100 fábricas no Brasil, sendo 64 delas integradas (que abrangem todo o ciclo, do minério à produção do clínquer) e 36 moagens (não têm fornos – compram apenas clínquer). A produção atual é de 53 milhões de toneladas. O Brasil é o 12º produtor mundial de cimento (PENNA, 2019).

O consumo per capita brasileiro encontra-se em 260 kg/habitante-ano, menos da metade da média mundial (553 kg/habitante/ano) e bem abaixo de países em franco desenvolvimento ou já desenvolvidos. O elevado déficit habitacional e a precária base de infraestrutura exigem do Brasil a implementação de importantes programas de investimentos. Considerando o aumento populacional, em trajetória crescente prevista até meados de 2040, e sendo o cimento a base indispensável para a construção dessa infraestrutura, espera-se um aumento de produção do insumo nas próximas décadas. Conciliar esse crescimento com a redução das suas emissões de carbono é prioritário para o setor (ROADMAP, 2019).

Aproximadamente 90% das emissões de CO₂ provenientes da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na descarbonatação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. Os esforços atuais são inúmeros, na tentativa de reduzir as emissões de gases de efeito estufa – GEE (MATOS, 2015).

Efetivamente, a indústria do cimento reconheceu a sua fragilidade por ser emissora de CO₂. A indústria mundial de cimento respondeu, em 2018, por 7% das emissões globais de gás carbônico, enquanto as indústrias cimenteiras do Brasil geraram 2,6% (ROADMAP, 2019). Destaca-se os bons resultados do Brasil, obtidos com a implantação de novos conceitos de sustentabilidade, com a percepção da necessidade de reduzir a vulnerabilidade do setor, de 564 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido, volume abaixo da média europeia, que é de 625 kg de CO₂, e da América do Norte, onde são gerados 734 kg de CO₂ por tonelada de cimento. A média mundial é de 633 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento (PENNA, 2019).

Com a revisão da norma NBR 16697:2018 do cimento, ampliou a possibilidade de adições minerais ao clínquer. Passou-se a trabalhar com a possibilidade de uso de fíler calcário, saindo de algo entre 5% a 15% para 20% a 25% de adições de fíler calcário.

Para o período de 2030 e 2050, o volume de adições deverá aumentar, reduzindo o fator clínquer dos níveis atuais (ao redor de 67%) para 59% em 2030 e para 52% em 2050. Dentre todas as adições o fíler calcário apresenta o maior potencial de mitigação de CO₂.

Projeta-se um consumo de 16,4 Mt em 2030 e 33,5 Mt em 2050 de fíler calcário na produção do cimento (VISED0; PECHIO; BATTAGIN, 2019).

De acordo com John (2019), dados comprovam que é viável fazer concretos estruturais com 60-70% de fíler e 30-40% de clínquer e gipsita, usando tecnologia diferente da atual, que faz moagem conjunta de clínquer e fíler, que não controla granulometria, que não garante dispersão. Em 10-15 anos deverá ter no mercado cimentos do tipo LEAP (tecnologia que combina fíler, projeto de distribuição de partículas e dispersão) com 50% de fíler, visando aproveitar melhor os recursos, com menos energia e menor pegada de CO₂.

Em vista do exposto, a presente pesquisa teve por escopo estudar a inclusão em níveis mais elevados de fíler calcário, em teores de até 70% em substituição binárias com o cimento Portland e em misturas ternárias com cinza de casca de arroz, porque são produtos regionais disponíveis em escala industrial para aproveitamento junto com o clínquer Portland, investigando as propriedades mecânicas quando são empregados fíler calcário e CCA, comparados a mistura de referência de cimento Portland, sem substituições.

1.1 JUSTIFICATIVA

A produção de cimento supera a de consumo de alimentos, segundo Agopyan e John (2011), o que confere a dimensão do seu consumo e a sua importância como material básico de construção para todo e qualquer ambiente construído.

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

É evidente que a mitigação dos gases do efeito estufa causados pela fabricação do cimento é proporcional à redução do teor de clínquer e aumento das adições minerais, sejam de qualquer fonte mineral ativa ou inerte, convencional ou não convencional, experimentalmente comprovada (JOHN et al., 2018). A escolha das adições a serem incorporadas ao cimento ou em substituição ao mesmo, devem atender a critérios de disponibilidade e economicidade e, de preferência serem resíduos, subprodutos ou coprodutos de outros processos industriais, que apresentem baixa emissão de GEE, de preferência que tenham o menor balanço de emissão de CO₂.

Existem vários resíduos e subprodutos agrícolas e industriais que podem ser considerados adições minerais ativas ou inertes. Por exemplo, existem fíleres dos mais diversos tipos de acordo com a rocha matriz da qual provém, assim como pozolanas provenientes de biomassa, conforme é extensamente citado por (CALMON, 2017).

São poucos os trabalhos publicados nos últimos anos sobre misturas ternárias de fíler calcário com pozolana. Silva, P. R.; Brito, (2016) constataram bom desempenho à durabilidade em misturas binárias com substituição de até 70% (em volume) de clínquer por fíler e ternárias de 40% de cinza volante com 20% de fíler, com exceção para as misturas com 60% e 70% de fíler e cinza volante em misturas binárias e ternárias, que apresentaram maior carbonatação devido ao consumo da reserva alcalina. Estudo similar foi realizado por Githachuri e Alexander (2013) com três tipos distintos de cimento com fíler, em misturas binárias com escória de alto forno e cinza volante; em que as misturas com escória não apresentaram efeito adverso nas propriedades estudadas como permeabilidade a gases e resistência mecânica, entretanto com a cinza volante reduziu essa última devido a sua menor reatividade pozolânica. A utilização de misturas de fíler e metacaulim em misturas ternárias com substituição de cimento proporcionou aumento de resistência à compressão até o nível de 45% da massa de cimento, e perda de apenas 7% para com 60% de substituição, segundo estudo de (ANTONI et al., 2012).

São raras as pesquisas de misturas de fíler com cinza de casca de arroz na literatura, em misturas ternárias de concreto. Uma das poucas investigações encontradas é descrita por Isaia; Gastaldini; Moraes, (2003) quando foram testadas misturas binárias com 12,5%, 25% e 50% de fíler calcário e com cinza de casca de arroz para determinar os efeitos físicos e pozolânicos sobre a resistência mecânica. Os resultados revelaram que para resistências mais elevadas de 65 MPa, o efeito físico do fíler cresceu mais do que o efeito pozolânico da CCA.

Na presente pesquisa foram empregados fíleres calcários e cinza de casca de arroz por serem adições com disponibilidade no RS e, principalmente na região central do Estado, com grande disponibilidade, baixo custo e distâncias de transporte.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Formular misturas de concreto com teores altos de substituição de cimento Portland, em misturas binárias com fíler calcário e ternárias com cinza de casca de arroz, com

ativadores químicos para observar seus efeitos sobre às misturas de referência sem adições, nas principais propriedades mecânicas do concreto endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Formular, com os materiais granulometricamente otimizados, traços de concreto com teores crescentes de fíler e de cinza de casca de arroz, em substituição ao cimento em misturas binárias e ternárias, para moldagem de corpos de prova para os ensaios de propriedades mecânicas;
- ✓ Determinar as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade longitudinal e retração por secagem, a partir das misturas de concreto formuladas;
- ✓ Escolher as formulações com melhor desempenho mecânico dentre as estudadas e compará-las com os níveis de resistência características usuais (C20 a C50) empregadas em estruturas de concreto, em função do teor de adições minerais utilizadas em substituição ao clínquer.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, apresentados a seguir:

- ✓ Capítulo I – apresenta uma breve introdução ao tema, justificando os motivos do estudo e apresentando os objetivos, tanto gerais como específicos;
- ✓ Capítulo II – a partir de pesquisa bibliográfica, é realizada uma abordagem dos aspectos relacionados ao fíler calcário em substituição ao cimento em níveis altos, a fim de produzir concretos sustentáveis bem como apresentar os aspectos voltados ao empacotamento de partículas e comportamento mecânico dos mesmos;
- ✓ Capítulo III – aborda a metodologia seguida durante o estudo, os materiais que foram utilizados, suas caracterizações e ensaios para avaliar o desempenho mecânico das misturas;
- ✓ Capítulo IV – apresenta os resultados e discussões sobre o estudo;
- ✓ Capítulo V – este último apresenta as conclusões e considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 O FÍLER CALCÁRIO E A CINZA DE CASCA DE ARROZ ATIVADOS QUIMICAMENTE, NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS DO CONCRETO

A construção civil é a cadeia de maior consumo de matérias-primas, estimando-se que seja responsável por 50% de todos os recursos naturais disponíveis (UNEP, 2003; SOUZA, 2005). Dentro dela, o concreto é o material manufaturado mais utilizado pelo homem (JOHN et al., 2018), isto se deve ao fato de ser necessário para praticamente todas as obras de construção civil, sua matéria-prima disponível em abundância na crosta terrestre, baixo custo, resistente, durável e de fácil manuseio.

Os agregados que compõe o concreto representam próximo de 80% da sua massa total, ficando a cargo do cimento e demais ligantes uma parcela ao redor de 20%. Apesar da contribuição do cimento não ser tão significativa na massa total do concreto, o mesmo contribui com 80% das emissões de CO₂ como um todo (VARES; HAKKINEM, 1998). Outros autores indicam que o clínquer é responsável por mais de 91% das emissões de CO₂ do concreto (KJELLEN; GUIMARAES; NILSSON, 2005). A disparidade apresentada nos números reflete o fato de que a produção de uma tonelada de clínquer emana entre 825 à 1.150 kg de CO₂ entre as diversas unidades de fabricação ao redor do mundo (DAMINELLI, 2013).

Várias são as formas de produção do clínquer, dentre as principais pode-se destacar: via úmida, semiúmido/semi-seco, via seca, via seca/pré-aquecimento e via seca/pré-aquecimento/pré-calcinação. Grande parte dos produtores de cimento, inclusive no Brasil tem migrado o sistema de produção para métodos mais eficientes como a via seca com pré-aquecimento e pré-calcinação, estima-se que mais de 68% das empresas cimenteiras (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT/GNR, 2011).

Tanto a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos, bem como a substituição do clínquer já vem sendo utilizados de forma mais ou menos significativa dependendo da disponibilidade de recursos e tecnologias de cada produtor. Quanto a captura e sequestro de carbono, apesar de sua eficácia seu impacto nos custos de produção seriam elevados, algo entorno de USD 40 e 250/tonelada de CO₂ capturado (ANDERSON; NEWELL, 2004; HOENIG; HOPPE; EMBERGER, 2007). Como consequência da adoção desta tecnologia o custo final do cimento seria impactado para valores não compatíveis para países em desenvolvimento, os quais necessitam de um custo adequado para financiar a expansão de sua infraestrutura. Outro aspecto importante a ser enfatizado diz respeito ao

aumento relativo das emissões de CO₂ do cimento levando-se em conta o cenário da necessidade de expansão da sua produção, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Emissões de CO₂ por Tonelada de Clínquer

Ano	2012	2015	2020	2025	2030	2050
Teor de clínquer	0,77	0,76	0,74	0,735	0,73	0,71
Kg CO₂ / t cimento	750	660	620	590	560	420
Kg CO₂ / t clínquer	974,03	868,42	837,84	802,72	767,12	591,55

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado WBCSD/IEA (2009).

2.1 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETOS

As adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas, pois são de baixo custo e substituem um material nobre que necessita de muita energia para ser obtido, o cimento Portland. Algumas adições possuem atividade hidráulica (cimentante), tal como a escória de alto-forno, outras possuem atividade pozolânica, como a cinza volante, a cinza de casca de arroz, e ainda as que possuem efeito fíler como é o caso do calcário. (SAMPAIO; ALMEIDA, 2008).

Segundo a ABNT NBR 12653:2014, pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma característica aglomerante, mas, quando finamente dividida e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) em temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Algumas adições minerais são pozolânicas (como a cinza volante de baixo teor de cálcio, Classe F), algumas cimentantes (como a escória granulada de alto forno) enquanto outras são tanto cimentantes, quanto pozolânicas (como as cinzas volantes com alto teor de cálcio, Classe C). Uma classificação das adições minerais de acordo com suas características pode ser identificada conforme a sua composição química e mineralógica e ainda de acordo com as características das partículas, podendo ser: cimentante e pozolânica, pozolanas altamente reativas, pozolanas comuns e pozolanas pouco reativas. As principais adições minerais podem ser divididas em dois grupos: materiais naturais e subprodutos (MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, 2014). Os materiais naturais, são aqueles processados com a finalidade única de produzir uma pozolana. Seu processamento, normalmente, envolve britagem, moagem e separação por tamanho; e alguns casos, pode incluir também a ativação térmica. A maioria das pozolanas são derivadas de rochas minerais e vulcânicas. Podem ser: vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados e terras diatomáceas. Os

subprodutos, são aqueles que não são produtos primários das indústrias que os produzem. São os subprodutos industriais que podem ou não exigir algum processamento (secagem ou pulverização, por exemplo) antes de serem utilizados como adição mineral. As cinzas da combustão de carvão e alguns resíduos agrícolas, como palha e cinza de casca de arroz, sílica ativa de certos processos metalúrgicos e escória granulada de metais industriais ferrosos e não ferrosos fazem parte dos subprodutos industriais que são adequados para o uso como adições minerais no concreto de cimento Portland.

Observa-se hoje, um grande esforço de desenvolvimento de novos materiais e até de melhorias de materiais existentes. Os focos principais incluem a redução dos impactos ambientais na produção ou durante a fase de uso, bem como a incorporação de novas funções a produtos existentes, os chamados polifuncionais (AGOPYAN, V.; JOHN, 2011).

2.1.1 Cinza de casca de arroz

Uma adição mineral ativa muito ocorrente na região Sul do Brasil provém do arroz, um dos principais cereais cultivados no mundo, principalmente no continente asiático, que concentra o equivalente a 90% da produção mundial, no total de 480 milhões de toneladas. O Brasil, maior produtor das Américas e 10º mundial, produziu 11,5 milhões de toneladas na safra 2016/2017, sendo que o Rio Grande do Sul contribuiu com quase 70% dessa produção ou 8,25 milhões de toneladas (CEPEA, 2017). Após beneficiado, obtém-se a casca, cuja queima aproveita-se a energia gerada, para próprio consumo ou venda do excedente para terceiros, restando a cinza que possui estrutura semicristalina que pode ser utilizada como subproduto agroindustrial, especialmente com o cimento Portland, por suas características pozolânicas. Cerca de 4% da massa de arroz é transformada em cinza o equivale a uma produção nacional potencial de 460 mil toneladas (320 mil toneladas no Rio Grande do Sul). Observa-se que a cinza de casca de arroz (CCA) é um subproduto que tem grande potencialidade de ser utilizada junto com o clínquer na produção de cimento porque participa na sua hidratação por meio das reações pozolânicas, contribuindo com compostos hidratados similares ao C-S-H.

A Tabela 2 apresenta estimativa de valores de produção anual de casca de arroz no Brasil e no mundo.

Tabela 2 – Valores estimados de produção anual de casca e cinza de casca de arroz no Brasil e no mundo

Produção	Ano	Arroz (t)	Casca (t)	Cinza (t)
Mundial	2014	740.000.000	148.000.000	29.600.000
Brasil	2014	12.000.000	2.400.000	480.000
RS	2015/16	7.300.000	1.460.000	292.000

Fonte: FAO (2016) e IRGA (2016).

O subproduto final, a cinza de casca de arroz, além de ser utilizado na construção civil como pozolana, junto com o cimento Portland, possui outras utilidades como na indústria petroquímica, corretivos de solo na agricultura e muitas outras utilidades, tendo em vista o alto teor de sílica em sua composição, em geral acima de 90%. Na indústria da construção civil, o maior potencial de uso é como adição mineral ativa, tendo em vista o efeito escala de produção de cimento no Brasil, cerca de 53 milhões de toneladas, e de 1,4 milhões de toneladas no Rio Grande do Sul em 2018 (SNIC, 2019).

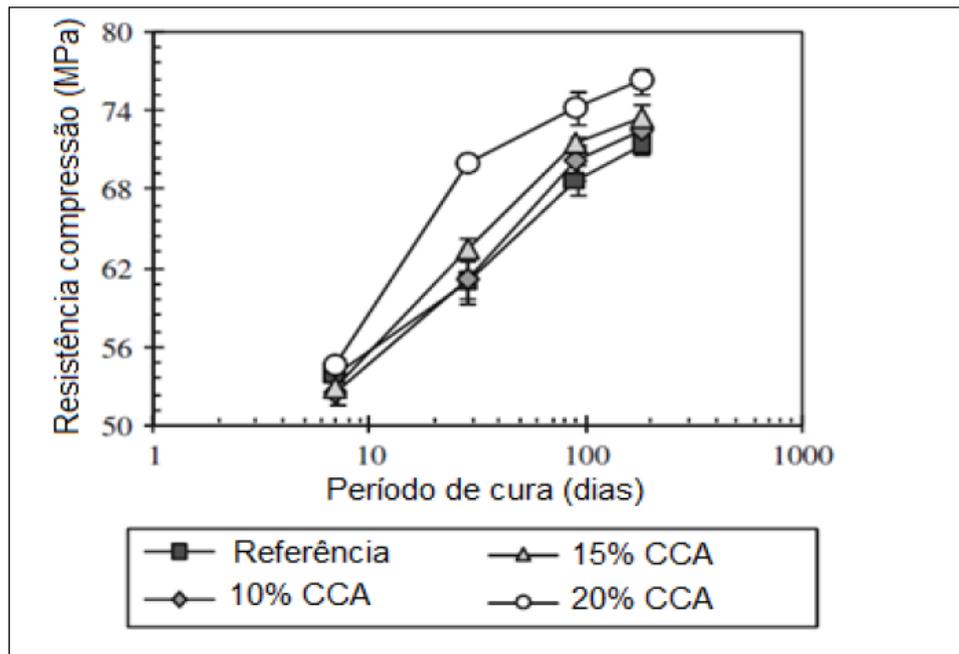
Por ocasião da queima da casca de arroz em condições controladas (tempo de 2 horas e temperatura de 500°C), tem-se a produção de uma CCA amorfa e com adequada porosidade cuja área específica poderá ser de 50 a 100 m²/g. Nessas condições pode-se dizer que a cinza de casca de arroz é mais reativa, sendo bastante adequada para utilização no concreto. Assim sendo por ocasião da queima controlada a qual produz uma CCA amorfa obtém-se um material pozolânico que vem a reagir de forma mais rápida com o hidróxido de cálcio oriundo do clínquer, vindo a formar um tipo secundário de silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) (SENSALE, 2010).

Apesar do bom desempenho da CCA queimada em condições controladas, a utilização das mesmas sem controle de temperatura não pode ser desconsiderada. Conforme estudos realizados por Isaia (1995) com CCA sem controle de temperatura foi observado que o aumento dos teores de CCA sem controle de temperatura trazia consigo uma melhora no desempenho das misturas de concreto principalmente em relação à corrosão das armaduras.

Normalmente credita-se ao efeito químico (pozolânico) o bom desempenho das CCA devido à presença de sílica amorfa. Não obstante deve-se considerar, também, a sua finura que contribui para a formação de pontos de nucleação para as partículas de cimento, tornando assim o efeito físico um importante ator no desempenho da CCA. Independentemente do teor de sílica presente na CCA, constata-se que há um consumo acentuado de hidróxido de cálcio relativo as reações pozolânicas o que leva a redução da relação cálcio sílica no silicato hidratado de cálcio secundário formado (RÊGO et al., 2015). Neste sentido a CCA constitui a adição mineral que mais contribui para a resistência mecânica em idades iniciais (MEHTA,

1992). Corroborando a afirmação de Metha, estudos realizados por Zunino e Lopez (2016) chegaram à conclusão que a CCA é mais efetiva no ganho de resistência em idades iniciais em relação as idades mais avançadas. A Figura 1 apresenta o desenvolvimento de resistência a compressão de misturas com cinza de casca de arroz em diferentes idades no concreto.

Figura 1 – Evolução da resistência à compressão de concretos em relação ao tempo de cura



Fonte: Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009).

Tendo em vista que a área específica da CCA é maior que do clínquer, normalmente há necessidade do aumento da quantidade de água incorporada na mistura afim de garantir a mesma trabalhabilidade o que acarreta uma diminuição da resistência mecânica. A fim de contornar o problema da redução de resistência mecânica incorpora-se a mistura aditivo superplastificante. Com o aumento na incorporação de superplastificantes mantendo-se assim a relação a/ag pode-se obter ganhos tanto de resistência à compressão como de durabilidade em concretos que utilizam CCA (DE NAZARÉ et al., 2014). Por outro lado, foi observado por Ismail e Waliuddin (1996) um decréscimo na resistência mecânica por ocasião da utilização de CCA mantendo-se constante o teor de aditivo superplastificante, neste caso houve um aumento da demanda de água para a mesma trabalhabilidade.

A CCA pode ser utilizada em concretos tanto no seu estado natural (sem moagem) como beneficiada (com moagem), em ambos os casos sua utilização em concretos é viável dependendo do teor da adição, estudos como de Isaia et al., (2010) indicam que a CCA pode ser

utilizada até 15% sem moagem e 25% com moagem. Outros trabalhos realizados pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) da UFSM, (COPETTI, 2019; DUART, 2008; FELTRIN, 2017; HOPPE, 2005; JÚNIOR, 2010; LIMA, 2018; MAZZA, 2015; MEIRA, 2009; SANTOS, 2017; SOKOLOVICZ, 2013; TRINDADE, 2012); corroboram os benefícios da utilização de CCA tanto sem moagem como com moagem, dentre eles destacam-se:

- 1- Considera-se como valor limite de 15% a adição de CCA sem moagem;
- 2- Considera-se como valor limite de 25% a adição de CCA com moagem;
- 3- Os estudos demonstram um bom desempenho da CCA com moagem no que concerne a resistência à compressão, permeabilidade ao oxigênio, absorção de água e resistividade elétrica;
- 4- Para CCA sem moagem em concretos expostos à agentes agressivos faz-se necessário a verificação da reação álcali-sílica. No caso de CCA com moagem a verificação nem sempre é necessária;
- 5- Para CCA tanto com moagem como sem moagem constatou-se um adequado desempenho no quesito penetração de cloretos;
- 6- Entretanto no caso da carbonatação independentemente da CCA com moagem ou sem moagem, constatou-se uma diminuição do desempenho devido a diminuição dos teores de hidróxido de cálcio devido as reações pozolânicas;
- 7- Levando-se em consideração a sustentabilidade a utilização de pozolanas é favorável nos resultados dos impactos causados, tendo em vista que, propicia uma diminuição da utilização de cimento nas misturas, além de melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos.

2.1.2 Fíler calcário

Fíler é um material finamente moído, aproximadamente da mesma finura do cimento Portland, que, graças as suas propriedades físicas, exerce um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência a fissuração. Os fíleres são, em geral, quase quimicamente inertes, mas isso não é uma desvantagem, caso eles possuam algumas características hidráulicas ou reajam de maneira não prejudicial com os produtos da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

Os filers calcários encontram-se sob a forma de: a) *calcita*, carbonato de cálcio, com moléculas arranjadas com geometria cristalina trigonal-romboédrica, b) *dolomita*, carbonato de cálcio e magnésio, com sistema predominante de cristais romboédricos; c) *aragonita*, carbonato de cálcio sob a forma de cristais ortorrômnicos metaestáveis. Os mais utilizados são os dois primeiros, sendo que, para uso como adição mineral seja com o cimento ou em substituição ao mesmo, estudos revelam que a calcita é a que apresenta melhor desempenho, seguida da dolomita, nas características reológicas e propriedades mecânicas produzidas com pastas, argamassas ou concretos (SAMPAIO; ALMEIDA, 2008).

A produção mundial de calcário em 2014 foi de 331 milhões de toneladas e, no Brasil, 34 milhões de toneladas de reservas lavráveis (5,1 milhões no Rio Grande do Sul), sendo a indústria do cimento e a agricultura os maiores destinos deste mineral moído sob a forma de fíler. Os municípios no RS que possuem maior quantidade de reservas comercializadas são Caçapava do Sul (3,6 milhões de toneladas), Pinheiro Machado (1,0 milhão de toneladas) e Candiota (0,59 milhões de toneladas) (DNPM, 2016). Observa-se que a localização das jazidas se encontra na zona central e campanha do RS onde se situam a maioria das lavouras agrícolas e as duas fábricas de cimento do estado, no município de Pinheiro Machado.

As rochas calcárias são, entre as sedimentares, as mais abundantes na crosta terrestre, que ocorrem com mais frequência entre as latitudes 30°N e 30°S, nas Américas, Europa, Índia, Rússia, Japão, entre outras regiões (WORLDDATLAS, 2017). O fíler calcário (FC) é um material carbonático obtido após moagem da rocha calcária. Segundo Sampaio e Almeida (2016) talvez não haja outras rochas com uma variedade de usos tão ampla quanto o calcário e o dolomito, usadas para a produção do cimento Portland, cal para argamassas, vários produtos para a construção civil à base de fíleres, concretos adensáveis, com fibras, pavimento de asfaltos, corretivo de solos, entre outras aplicações. A produção mundial é 350 Mt sendo a China, a Índia e os Estados Unidos os principais produtores, com 75% da mineração mundial, a maioria sob a forma de fíler calcário (USGS, 2017).

Estudos apontam para o papel da granulometria do fíler por ocasião da sua substituição no clínquer Kumar et al. (2013) e Sun et al. (2013) indicando que a medida que a finura do fíler aumenta, melhoram as propriedades do concreto. No entanto outros estudos indicam que este ganho ocorre na faixa de 5% a 10% de adição e em idades precoces (TSIVILIS et al., 1999).

O efeito físico apresenta-se como função da granulometria, ou seja, à medida que a área específica aumenta a contribuição nas propriedades do concreto também aumentam (SOROKA; SETTER, 1977).

Ensaio de Lothenbach et al. (2008), demonstraram a contribuição do efeito químico do fíler na resistência do concreto através da diminuição da porosidade. Conforme os autores, a maior presença de calcário (fíler) contribui para a formação de monocarbonatos que vem a estabilizar a etringita. Com a estabilização da etringita, na presença de calcário, ocorre um aumento de volume das fases hidratadas levando a redução da porosidade como um todo.

Ainda no campo da contribuição do fíler para a resistência à compressão do concreto, vários estudos apontam nesta direção. Soroka e Setter (1977) em seu estudo apontaram um incremento da resistência à compressão mesmo com o aumento da substituição de fíler na massa de cimento. Os autores indicam que o ganho de resistência ocorreu, preponderantemente, por efeito físico, ou seja, por diminuição das dimensões da estrutura dos poros.

Outra pesquisa que aponta para a contribuição do fíler no aumento da resistência de concretos e argamassas foi realizada por Daminieli (2013). Neste caso foram utilizados 15 tipos diferentes de fíleres com dois tipos de cimentos sem adições, em argamassas para uma mesma relação água/aglomerante de 0,5. A substituição dos fíleres foi de 50% em relação a massa de cimento. Tendo em vista a importância da granulometria do fíler quanto ao efeito físico, foi levado em conta por Daminieli o princípio do empacotamento de partículas, sendo estudados diferentes agregados com diversas faixas granulométricas. O estudo chegou à conclusão de que todas as adições de fíler resultaram em resistências superiores as argamassas de referência.

Feltrin, (2016) estudou substituições de 10, 15 e 20% de fíler calcário em relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65, mantendo-se a trabalhabilidade constante, considerando que à medida que a relação a/ag diminuiu a resistência à compressão aumentou.

A adição de fíler calcário desponta como uma importante prática na mitigação do CO₂, no processo de fabricação do cimento já que evita a descarbonatação, reduz a emissão relativa aos combustíveis, ao mesmo tempo que, por apresentar mobilidade inferior à do clínquer, reduz o consumo de energia elétrica nas operações de moagem. Quando adicionado ao concreto proporciona mais trabalhabilidade (BATAGGIN, A. F.; SILVA, 2019).

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

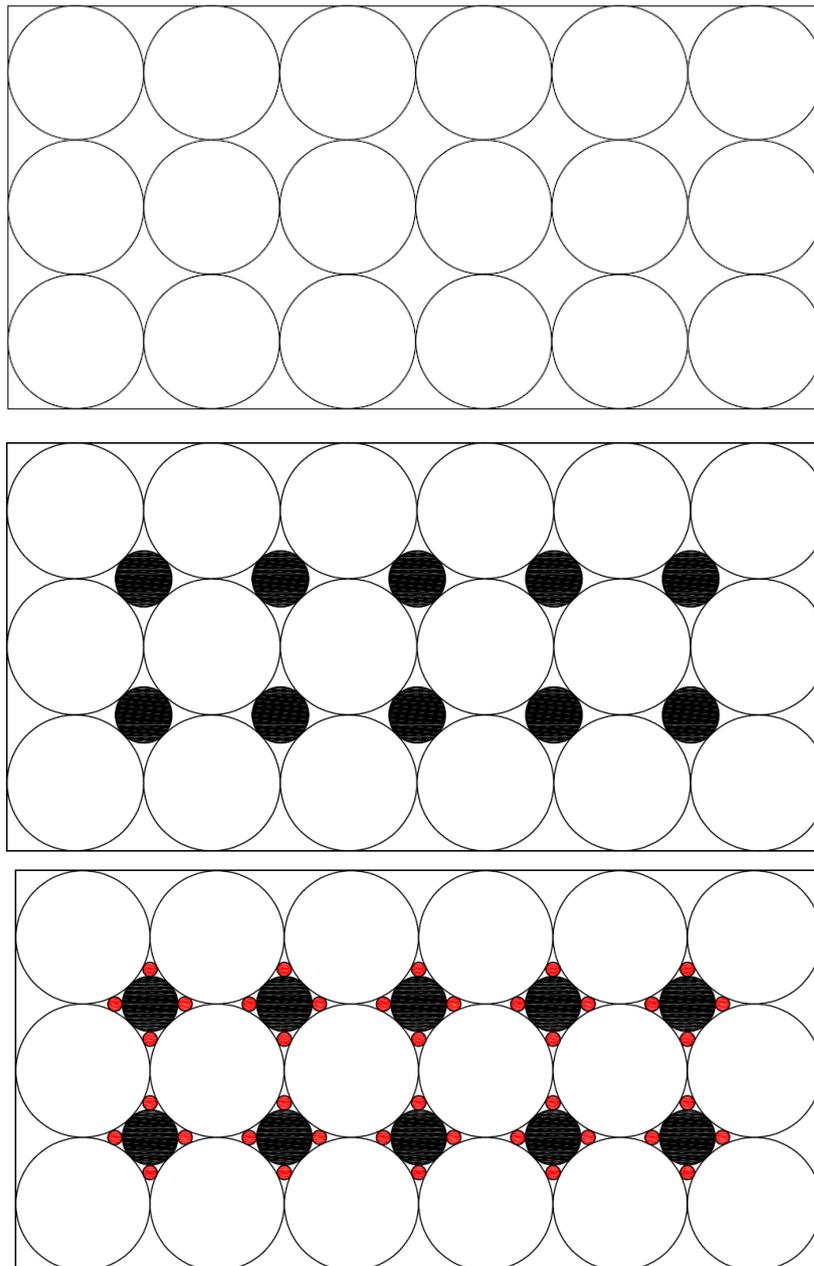
O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como:

O problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas

menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (MCGEARY, 1961).

A Figura 2 representa o efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência do empacotamento, ou seja, os vazios deixados pelas partículas maiores são preenchidos pela presença de partículas menores, e assim, sucessivamente.

Figura 2 – Empacotamento de partículas



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado (MCGEARY, 1961).

2.2.1 Teorias de empacotamento

Os estudos teóricos e experimentais, relacionados ao empacotamento de partículas geraram duas abordagens básicas, uma discreta, que considera as partículas individualmente tendo Furnas, Westman e Hugill como expoente e outra contínua, proposta por Andreasen, que trata as partículas com distribuição contínua (OLIVEIRA et al., 2000).

Entre os modelos de empacotamento de partículas esféricas para otimização dos espaços interparticulares, o de Andreasen Modificado Funk, J. e Dinger (1992) é um dos mais empregados, sendo resultado do aperfeiçoamento dos modelos de Furnas e de Andreasen, porque apresenta otimização a partir da composição de partículas intermodais discretas.

O modelo de Andreasen modificado é representado pela Equação 1.

Equação 1 - Modelo de Andreasen.

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

Onde:

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

d = tamanho da partícula;

d_m = menor tamanho de partícula da distribuição;

D = maior tamanho da partícula da distribuição;

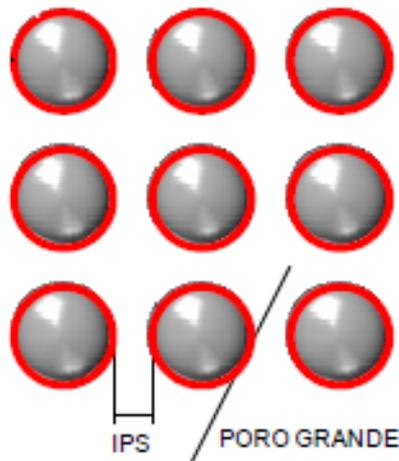
q = coeficiente de distribuição;

Fazendo uma síntese da abordagem tradicional Oliveira et al. (2000), concluíram que distribuições granulométricas descontínuas podem propiciar alta fluidez desde que sejam projetadas para criar um elevado afastamento entre as partículas maiores, quando o expoente “q” da fração grossa for igual a 0,21, por exemplo, sendo os interstícios preenchidos por uma matriz de baixa viscosidade, com “q” da matriz igual a 0,37. Dessa maneira é possível utilizar as condições ótimas de fluidez dos dois domínios de forças envolvidos, superficiais e gravitacionais.

Para um bom projeto de empacotamento que vise alta eficiência dos materiais cimentícios é necessário o cálculo dos vazios entre as partículas, ou seja, o cálculo da porosidade intergranular, que indica o mínimo teor de fluido necessário para preencher os vazios. Oliveira et al. (2000), mostram que a distância entre as partículas do concreto pode ser calculada por dois indicadores: (a) IPS (Inter Particle Spacing): mede a distância entre os finos, a qual é determinada pelo teor de água, o fluido que os afasta e também pelas

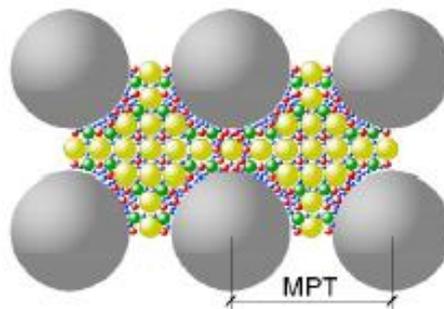
características físicas dos finos, como a área superficial (Figura 3); (b) MPT (Maximum Paste Thickness): mede a distância entre os agregados e é determinado diretamente pelo teor de pasta, já que é o fluido que afasta os agregados (Figura 4).

Figura 3 – Espaço entre partículas da pasta – Inter Particle Spacing (IPS)



Fonte: Elaborada pela Autora, Adaptado (DAMINELI, 2013).

Figura 4 – Distância entre os agregados - Maximum Paste Thickness (MPT)



Fonte: Elaborada pela Autora, Adaptado (DAMINELI, 2013).

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

formados a partir da sua estrutura atômico-molecular, para formar matriz mais compacta e homogênea.

Conforme Damireli (2013), um projeto de empacotamento precisa diminuir os vazios ao máximo possível, para tanto:

1. Diminuir os vazios intergranulares da pasta através da combinação de finos de diversas distribuições granulométricas visando conseguir alto IPS, mesmo com pouca água, condição onde a fluidez é aumentada ao mesmo tempo em que a resistência à compressão é a maior possível devido ao baixo teor de água;
2. Otimizar o esqueleto granular dos agregados para conseguir alto MPT com pouca pasta o que implica em otimização do teor de ligantes para a mesma resistência.

Nestas condições, segundo o autor, a otimização da pasta dá-se pela substituição de finos inertes (filers) permitindo criar distribuições empacotadas que consomem pouca água e também tem diminuídos os teores de ligantes o que aumenta a eficiência do seu uso.

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

2.2.2 Software de empacotamento EMMA

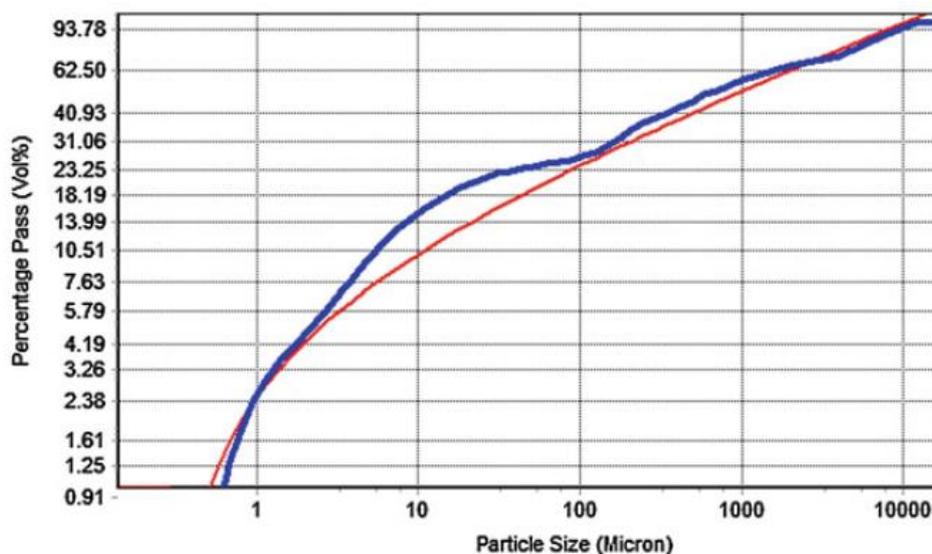
EMMA (Elkem Materials Mixture Analyzer) é um software livre, que calcula e apresenta a distribuição do tamanho de partículas de uma mistura de componentes, foi desenvolvido pela empresa Elkem Materials. A Elkem é uma empresa que se destaca na produção de produtos ambientalmente sustentáveis. Em seu portfólio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

O EMMA constitui-se em um programa que avalia o empacotamento de partículas. Desenvolvido originalmente para a criação de composições moldáveis de refratários auto fluídos (EMMA, 2019). O programa utiliza o modelo de Andreassen e Andreassen Modificado para o empacotamento de partículas calculando a distribuição do tamanho de

partícula do composto. Através de extensos testes de laboratório e documentação a empresa fornece a base para confecção de concretos auto adensáveis, de ultra alto desempenho entre outros (GUERRA, 2014).

Com uma interface de fácil manipulação, o programa calcula, a partir das proporções prévias de cada material, com base nos dados informados, a curva da mistura e a curva de Andersen. Desta forma, por meio da mudança na proporção entre os diferentes materiais de uma mistura (concreto, por exemplo) é possível buscar a aproximação da curva da mistura com a curva de Andreasen (ou Andreasen Modificado). Contudo o programa não calcula as proporções de materiais a partir de suas curvas granulométricas. A Figura 5 exemplifica a curva de distribuição do programa, em vermelho a curva padrão e em azul a curva desejada.

Figura 5 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica



Fonte: (NANTHAGOPALAN, P.; DESAI, 2013).

2.2.3 Misturas binárias de fíler com moagem separada

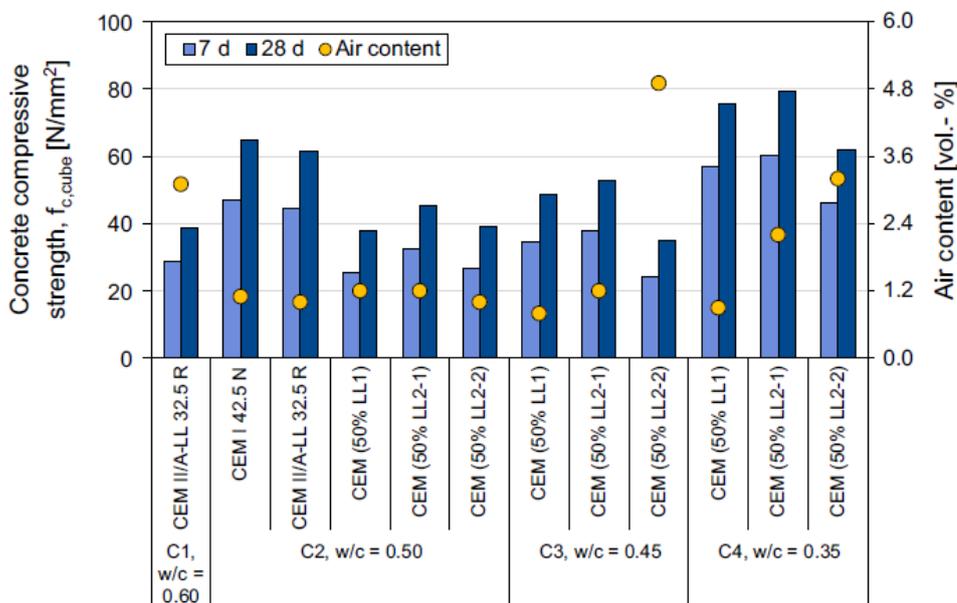
Há a possibilidade de fazer a moagem separada do fíler quando a moagem se realiza em laboratório, o que pode resultar em partículas mais finas que as do cimento, dependendo do tempo de moagem. Quando a substituição é em igualdade de massa, há pequeno aumento no volume de pasta devido a maior massa específica do cimento, melhorando o seu comportamento reológico, o que permite reduzir em parte a relação água/ligante e, por meio do efeito de nucleação, aumentar o teor de hidratação nas idades iniciais (JOHN et al., 2018).

Estudos realizados nas últimas três décadas para investigar o desempenho dos fíleres calcários no cimento Portland mostram que os teores de substituição estão aumentando, entretanto, ainda existem controvérsias com respeito ao comportamento reológico, mecânico e à durabilidade, com resultados discrepantes (LOLLINI; REDAELLI; BERTOLINI, 2014).

À medida que o teor de fíler aumenta na pasta de cimento, sem controle granulométrico e quantidade de água, as relações a/c aumentam e o desempenho diminui. Para melhorar esse comportamento é preciso diminuir a água, aumentar a mobilidade das misturas com superplasticantes e, principalmente, controlar arranjo entre partículas para diminuir os vazios pelo aumento da compactidade entre os grãos de cimento e de fíler, ou da pasta com os agregados. Segundo Fennis e Walraven (2012) é possível conceber concreto com baixa emissão de CO₂, no qual 50% do cimento é substituído por adições minerais, usando tecnologia de empacotamento de partículas na otimização das misturas.

Palm et al. (2016), analisou o desempenho de misturas binárias de cimento com altos níveis de calcário, na faixa de 50% e fatores a/c variando de 0,35 a 0,60. A Figura 6 apresenta os resultados de resistência a compressão.

Figura 6 – Efeito do calcário em relação a resistência à compressão



Fonte: Palm et al. (2016).

Além de benefícios satisfatórios em relação a compressão axial, Palm observou melhoria em relação a durabilidade, como em relação a carbonatação e penetração de íons cloretos, assim como o módulo de elasticidade e uma redução de 25% na emissão de CO₂.

As alterações na hidratação do sistema cimentício, decorrente da presença dos fíleres calcários usuais, são amplamente estudadas. A cinética e o calor de hidratação nas primeiras horas são alterados, atribuindo-se o fenômeno à nucleação de novas fases de C-S-H na superfície dos finos adicionados, principalmente do fíler calcário. Além disso, a formação de fases de carboaluminatos é evidenciada na presença do calcário, influenciando positivamente a microestruturas do concreto (NASCIMENTO et al., 2019).

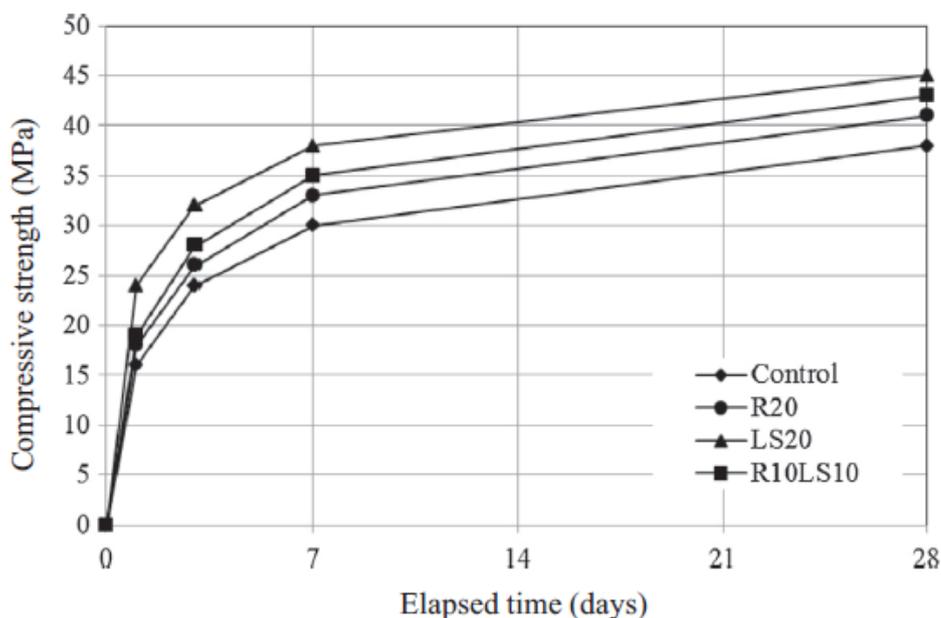
2.2.4 Misturas ternárias de fíleres e cinza de casca de arroz

No emprego de misturas ternárias existem interações físico-químicas que exercem sinergia sobre nano/microestrutura das pastas cimentícia, tornando-as mais densas e compactas do que somente as misturas binárias. Quando se utiliza uma adição inerte como o fíler calcário, com outra reativa como a CCA, ocorre efeito sinérgico por meio de ação física de nucleação de novos locais de hidratação e, em consequência, obstrução dos poros e, adicionalmente, o efeito pozolânico pela reatividade química com o hidróxido cálcio que proporciona a formação de C-S-H secundário, com aumento de compostos cimentícios e diminuição da porosidade da pasta (FELTRIN, 2019).

Nos países produtores de arroz, a CCA é uma fonte alternativa para o uso de misturas ternárias com o cimento, mesma que sua reatividade não seja alta quando queimada sem controle de temperatura, porque ainda apresenta bom desempenho sobre as propriedades do concreto como atestam as teses de Isaia (1995), Pouey (2006) e Rêgo (2004), entre outros.

Sua-iam, Sokrai e Makul (2016), realizou análise em misturas ternárias de calcário e cinza de casca de arroz a fim de melhorar as propriedades mecânicas de concretos no estado fresco e endurecido. A porcentagem de substituição em relação ao cimento foi de 10% para cinza de casca de arroz assim como para o calcário. Os resultados obtidos em relação a resistência a compressão axial estão demonstrados na Figura 7.

Figura 7 – Resistência à compressão de misturas ternárias de calcário e cinza de casca de arroz

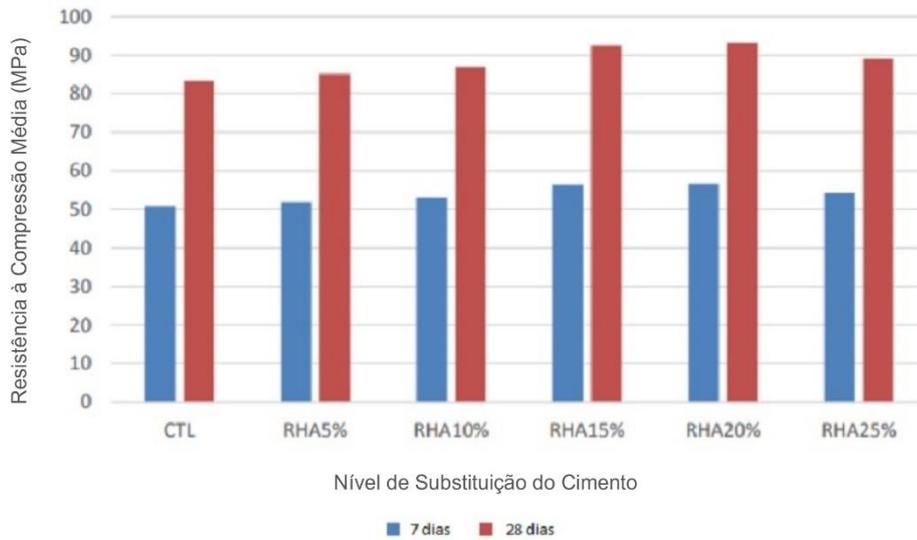


Fonte: Sua-iam et al. (2016).

Evidencia-se através da Figura 7 os efeitos benéficos da adição de fíler calcário assim como a combinação de fíler calcário e cinza de casca de arroz nas idades consideradas por Sua-iam et al. (2016). Identificaram também uma melhora nas propriedades do concreto fresco, especialmente a trabalhabilidade foi beneficiada, em virtude da presença do fíler calcário.

Zareei et al. (2017), analisou misturas com substituições de cimento por cinza de casca de arroz em teores variando de 5 a 25% em conjunto com 10% de sílica ativa, apresentando resultados satisfatórios aos 7 e 28 dias como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Resistência à compressão de mistura ternária de SA e CCA



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado Zareei et al. (2017).

Pode-se observar através da Figura 8 que a substituição de 15% de CCA potencializou as reações, promovendo um aumento de 20% da resistência à compressão axial. Zareei et al. (2017), identificaram também a redução da penetração de íons cloretos com a substituição de 25% da composição inicial, assim como a redução das proporções de absorção de água.

2.2.5 Ativação química de misturas com filer calcário e cinza de casca de arroz

A substituição parcial do clínquer por pozolanas apresenta inegáveis vantagens técnicas, econômicas e ambientais, pois reduz a emissão de CO₂ para a atmosfera. Por essa razão, existe interesse prático para a produção de cimentos e concretos com teores cada vez menores de clínquer (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2017).

A ativação alcalina vem sendo muito explorada recentemente no desenvolvimento de materiais para os mais variados setores tecnológicos, com destaque para a indústria da construção civil e na reciclagem de resíduos industriais e minerais. O ucraniano Glukhovsky foi o principal impulsionador dos estudos no desenvolvimento de um material sílico-aluminoso ativado alcalinamente, na qual dependendo da seleção das matérias primas e condições de processamento podem exibir uma grande variedade de propriedades e características, incluindo elevada resistência à compressão, baixa retração, cura rápida ou lenta, resistência a ácidos, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica (SEVERO et al., 2013).

O uso de ativadores químicos é uma alternativa para potencializar os benefícios do uso de adições minerais em substituição ao cimento, principalmente nas idades iniciais. Um dos mecanismos de atuação dos ativadores químicos é o aumento da alcalinidade do meio solúvel, que favorece a dissolução dos aluminossilicatos, considerada uma das etapas críticas da reação pozolânica. Nesse caso, a concentração de íons OH^- do ativador é um parâmetro importante em função da influência do ambiente alcalino na desintegração da camada de aluminossilicatos da argila (HAGEMANN, 2018).

Dentro dos principais compostos que objetivam melhorar a utilização das adições minerais encontra-se o sulfato de cálcio, (ADU-AMANKWAH et al., 2018; FERREIRO; HERFORT; DAMTOFT, 2017) e o hidróxido de cálcio (ALONSO; PALOMO, 2001; MCCARTER; TRAN, 1996), entre outros.

A adição de cal hidratada (hidróxido de cálcio - portlandita) à mistura, contendo elevados teores de adição, tem a finalidade de manter o pH e aumentar o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, permitindo reduzir-se ainda mais o teor de clínquer (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2017).

A utilização de cal aumenta a quantidade de finos no concreto, o que demanda maior quantidade de aditivo dispersante para obtenção da trabalhabilidade desejada (HOPPE FILHO, 2002).

A adição de cal hidratada acelera a atividade pozolânica, ou seja, quanto maior a disponibilidade de hidróxido de cálcio, maior o seu consumo para a formação de hidratos (HOPPE FILHO; CINCOTTO, 2006).

A eficiência do ativador está relacionada em grande parte à composição química da adição mineral. Grande parte dos estudos que avaliam a ativação química de materiais com alto teor de cálcio em sua composição (como a escória de alto-forno) utiliza ativadores à base de hidróxidos e silicatos alcalinos, sendo que o principal produto de hidratação resultante é um gel C-S-H similar ao produzido na hidratação do cimento Portland (PALOMO et al., 2014).

Embora os ativadores à base de hidróxidos alcalinos sejam utilizados em virtude do baixo custo e alta disponibilidade, os ativadores a base de sulfatos também constituem uma alternativa de ativação química de materiais aluminossilicatos, devido à habilidade do sulfato em reagir com o óxido de alumínio presente na adição mineral para formar etringita (PALOU et al., 2017).

Jung et al. (2018), avaliou o desempenho de diferentes teores de cinza de casca de arroz e hidróxido de cálcio (cal) em diferentes misturas, identificou que a adição de 10% de

cinza de casca de arroz e 10% de hidróxido de cálcio, colaborou com incremento de resistência e diminuição de vazios obtidos pela formação de C-S-H através da reação pozolânica.

Krishnan; Emmanuel; Bishnoi, (2019), investigou os benefícios da adição de Sulfato de Calcio (gesso) em misturas de argila calcinada e calcário e identificou alterações nas fases finais AFt/AFm, uma microestrutura densa e refinada foi observada no sistema C-S-H, no entanto, resultou na redução da hidratação do clínquer, assim refletindo no ganho de resistência a compressão axial após os 28 dias.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, detalha-se o roteiro metodológico seguido para a realização da presente pesquisa. Na sequência, apresentam-se os critérios de projeto considerados e os materiais empregados para o estudo de dosagem experimental em laboratório, com os respectivos traços unitários de concreto resultantes.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

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

3.1.1 Variáveis independentes

Estão elencados com os materiais que compõem o concreto, e que tem a capacidade de determinar o seu grau de compacidade, que são:

- ✓ Relação água/materiais cimentícios: adotada a relação 0,25 para todas as misturas;
- ✓ Idade de ensaio: resistência à compressão axial aos 07, 28 e 91 dias; tração por compressão diametral aos 28 e 91 dias e módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias, e retração total aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias de exposição em temperatura ambiente;
- ✓ Consistência pelo abatimento do tronco de cone com intervalo entre 100 e 120 mm.

3.1.2 Variáveis intervenientes

São as variáveis que possuem a capacidade de modificar as variáveis independentes, e consequentemente influenciam nos resultados das variáveis dependentes, que são:

- ✓ Porcentagem de substituição de pozolana: foram adotadas as substituições parciais do cimento CPV-ARI, em volume, por 50%, 60% e 70% de FC em misturas binárias e 50% de FC e 10% CCA nas misturas ternárias.

Os teores de substituição foram dosados em função dos resultados preliminares obtidos através do programa experimental desenvolvido em argamassa, a fim de avaliar o

desenvolvimento de resistência das amostras contendo fíler calcário (FC) e da cinza de casca de arroz (CCA), bem como da adição de sulfato e hidróxido de cálcio em algumas misturas como potencializadores das reações (ativadores).

3.1.3 Variáveis dependentes

Dependem diretamente das variáveis independentes, interferindo nos resultados do concreto, como à resistência à compressão axial; resistência a tração por compressão diametral; módulo de elasticidade e retração total.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Os materiais utilizados e suas respectivas caracterizações, bem como os princípios de dosagem empregados estão descritos a seguir.

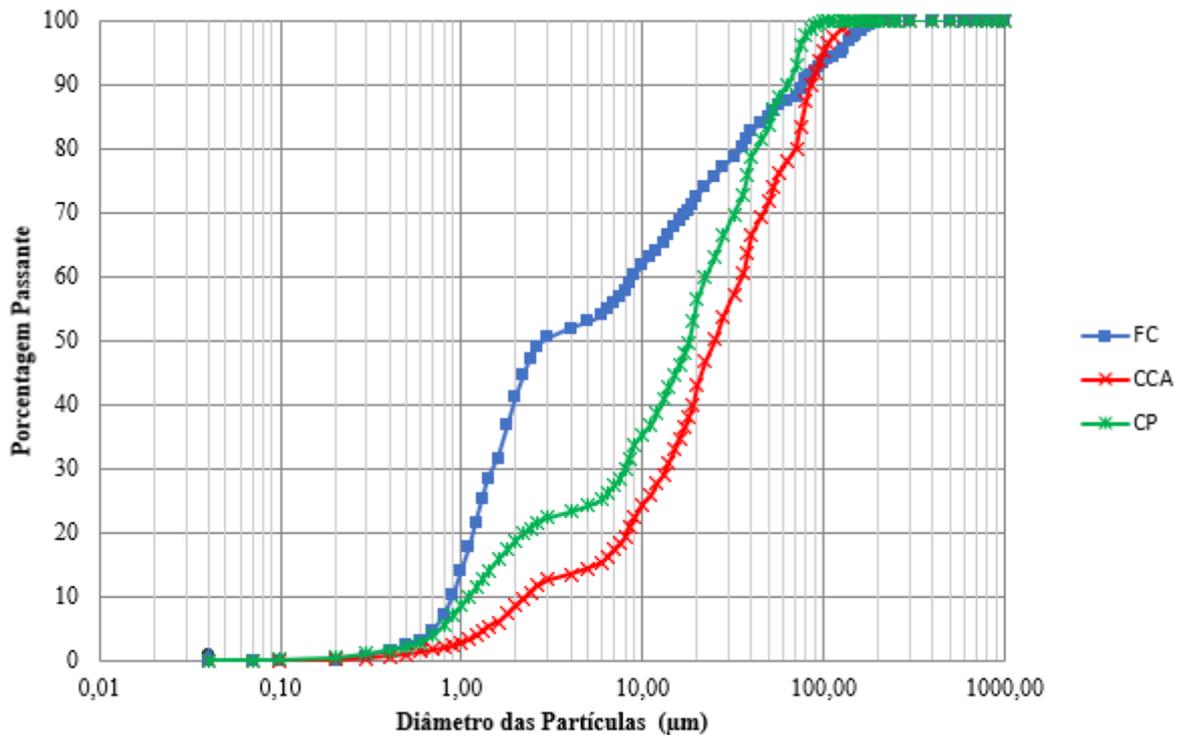
3.2.1 Aglomerantes e ativadores

O cimento utilizado foi o Portland CPV-ARI, de alta resistência inicial porque é o tipo que se encontra no mercado brasileiro e regional com menor teor de fíler, com teor máximo de 10%, conforme ABNT NBR 16697:2018.

O fíler calcário (FC) escolhido foi proveniente da extração de jazidas, originário de rocha calcítica, O calcário foi moído em moinho de bolas (capacidade 50 L) em três diferentes tempos de moagem 60, 120 e 180 minutos, sendo utilizado apenas o fíler calcário com 3 horas de moagem, em razão da aproximação da curva de distribuição granulométrica com as demais adições da pesquisa, (Figura 9).

A cinza de casca de arroz (CCA) foi proveniente do processo industrial por combustão, para secagem do arroz e/ou sua parboilização, deste modo, a queima foi realizada sem controle de temperatura. A CCA também foi moída em dois diferentes tempos de moagem, 60 e 120 minutos, para determinação da granulometria mais próxima das outras adições, sendo que foi selecionada a CCA com 1 hora de moagem.

Figura 9 – Curvas granulométricas cimento (CP), fíler calcário (FC) e cinza de casca de arroz (CCA)



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

Com o intuito de potencializar o uso das adições minerais em substituição ao cimento foi adicionado Sulfato de Cálcio Dihidratado P. A. ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e Hidróxido de Cálcio (CaOH_2), proveniente de jazidas de origem calcítica, em São José da Lapa e Pains, em Minas Gerais (Ical, 2019), como ativadores.

Os seguintes ensaios de caracterização foram realizados:

- a) Massa específica (ABNT NBR 16605, 2017);
- b) Finura por peneiramento (ABNT NBR 11579, 2013);
- c) Composição granulométrica por difração a laser (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland);
- d) Composição química (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland; LAPAM – Laboratório de Processos Ambientais);
- e) Difração de Raio – X (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland; LAPAM – Laboratório de Processos Ambientais);
- f) Superfície específica BET (LAPAM – Laboratório de Processos Ambientais; LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos);

- g) Determinação da água de consistência normal (ABNT NBR 16606, 2018);
- h) Determinação do início e fim de pega pelo aparelho de Vicat (ABNT NBR 16607, 2018);
- i) Resistência mecânica a compressão axial com argamassa normal a 3, 7 e 28 dias (ABNT NBR 7215, 2019);
- j) Análise termodiferencial TG-DTG (LAPAM – Laboratório de Processos Ambientais);
- k) Microscopia eletrônica de varredura com aumento de pelo menos 200 vezes (LME – Laboratório de Microscopia Eletrônica Engenharia Mecânica);
- l) Determinação do teor de gesso e de fíler no cimento (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland).

3.2.1.1 Cimento

A Tabela 3 apresenta a composição química do CPV-ARI.

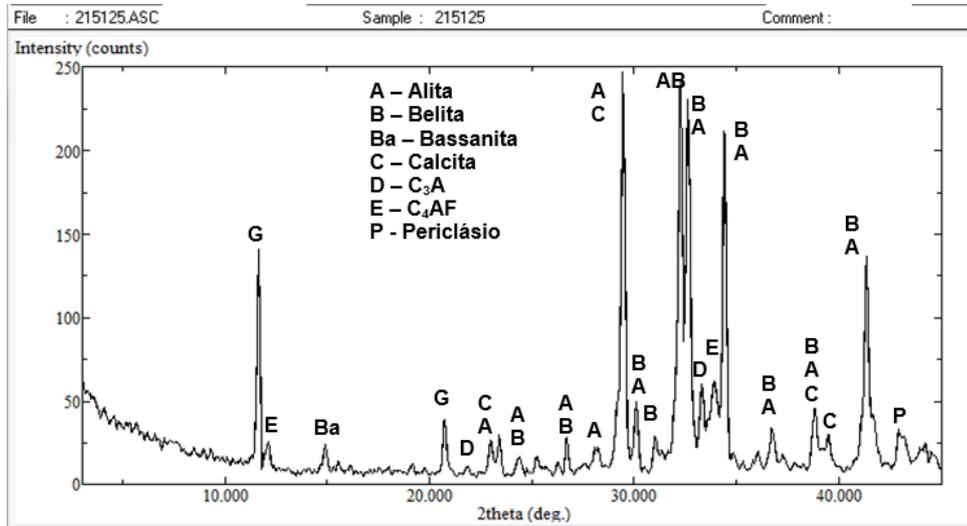
Tabela 3 – Composição química do cimento CPV-ARI

Composição química	Teor (% em massa)
Óxido de Cálcio (CaO)	60,18
Dióxido de Silício (SiO ₂)	19,89
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	4,87
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,83
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	3,45
Óxido de Magnésio (MgO)	3,40
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,04
Óxido de Titânio (TiO ₂)	0,30
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,22
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,16
Óxido de Manganês (MnO)	0,04
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	-
Perda ao Fogo (PF)	3,98

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A Figura 10 apresenta o difratograma do cimento evidenciando a caracterização mineralógica na qual possui em sua composição os minerais de clínquer (alita, belita, C₃A, C₄AF e periclásio), por compostos de gesso (gipsita e bassanita) e por calcita relacionada à adição de fíler calcário.

Figura 10 – Difratoograma do cimento



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

As características físicas e mecânicas do cimento podem ser observadas na Tabela 2.

Um parâmetro definidor da dimensão dos grãos é a superfície específica BET. De acordo com Neville, (2016) o método de adsorção de nitrogênio (método BET) informa uma medida absoluta da superfície específica, a área “interna” das partículas também é acessada pelas moléculas de nitrogênio, diferentemente do que os demais métodos de permeabilidade ao ar. Devido a isso, o valor da superfície específica medida é significativamente maior do que os determinados nos outros métodos (Blaine e Wagner, por exemplo).

Tabela 2 – Caracterização físicas do cimento

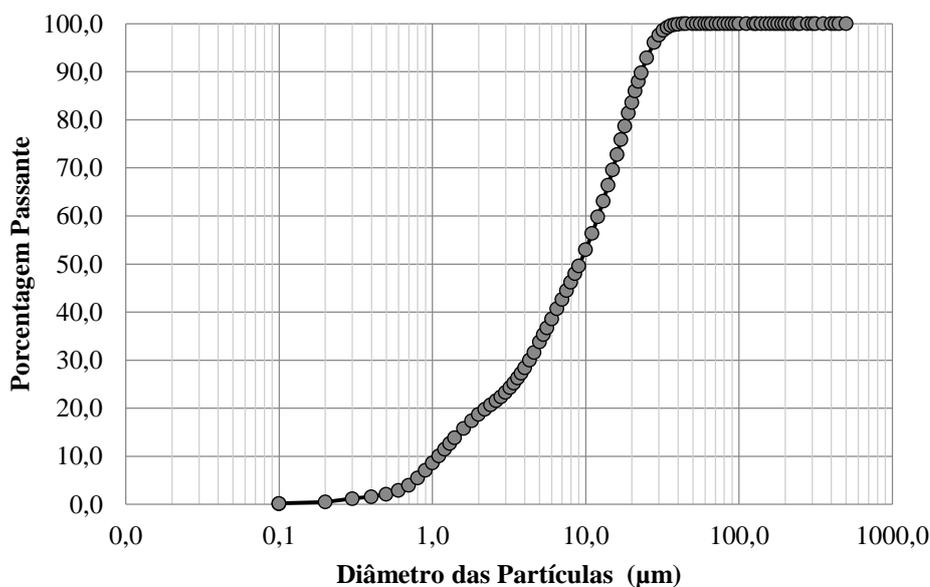
Características físicas	CPV - ARI	
Massa específica (g/cm ³)	3,03	
Superfície específica BET (m ² /g)	1,71	
Material retido na # 75 µm (%)	0,54	
Tamanho médio dos grãos (µm)	9,11	
Início de pega (h)	3h:25min	
Fim de pega (h)	4h:15min	
Consistência normal (%)	30,4	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	36,7 MPa
	7 dias	46,8 MPa
	28 dias	53,3 MPa

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado Superfície específica BET (LAPAM), tamanho médio dos grãos (ABCP) (2018).

Em relação à superfície específica BET do cimento verifica-se que o valor de 1,71 m²/g está no intervalo esperado, considerando-se que o cimento utilizado é um material fino.

Na Figura 11, apresenta-se a curva granulométrica obtida por granulometria a laser. Logo a seguir pode ser visualizada a Tabela 6 com os diâmetros médios do respectivo material.

Figura 11 – Distribuição do tamanho das partículas do cimento



Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

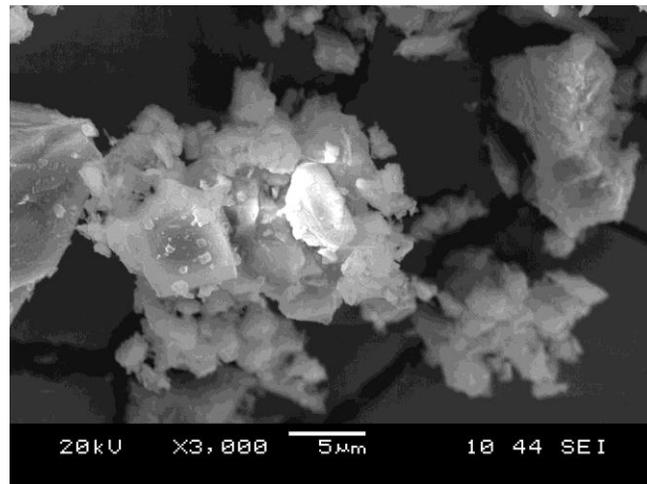
Tabela 3 – Diâmetros médios das adições minerais

Identificação da amostra	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)
Cimento CPV-ARI	9,11	1,09	23,12

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A Figura 12 apresenta a micrografia do cimento, demonstrando melhores detalhes numa amplitude de 3000 vezes.

Figura 12 – Micrografia cimento



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFSM, 2018).

A análise termogravimétrica determina as diferenças de temperatura entre um padrão e a amostra quando aquecidos simultaneamente até a temperatura de 1000°C, a uma taxa de 20°C/mim. Assim é possível verificar quais foram às reações ocorridas na amostra durante o aquecimento. As reações identificadas na amostra de cimento são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização por análise termodiferencial e termogravimétrica

Temperatura do pico (°C)	Natureza da reação	Interpretação
110	Endotérmica	Desidratação do gesso
250	Endotérmica	Decomposição dos aluminatos cálcicos hidratados
450	Endotérmica	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH) ₂)
700	Endotérmica	Descarbonatação da calcita (CaCO ₃)

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

O equipamento também é dotado de uma micro balança que registra todas as variações de massa da amostra ocorridas durante o ensaio, sendo possível identificar todas as perdas de massa relacionadas a cada reação ocorrida. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Perdas de massa e teores de portlandita e calcário

Identificação da Amostra	Perda de Massa (%)				Teor (% em massa)	
	20-150°C (Gesso)	150-400°C (W_k)	400-500°C (Ca(OH)_2)	500-800°C (CaCO_3)	Ca(OH)_2	CaCO_3
Cimento	0,56	0,07	0,36	3,16	1,5	7,2

• W_k representa uma medida de pré-hidratação do cimento e compreende a porcentagem em massa que a amostra perde ao ser aquecida até 500°C, excluindo-se as perdas referentes à desidratação do gesso e à desidroxilação do Ca(OH)_2 , ou seja, é a porcentagem de água combinada com os minerais do clínquer

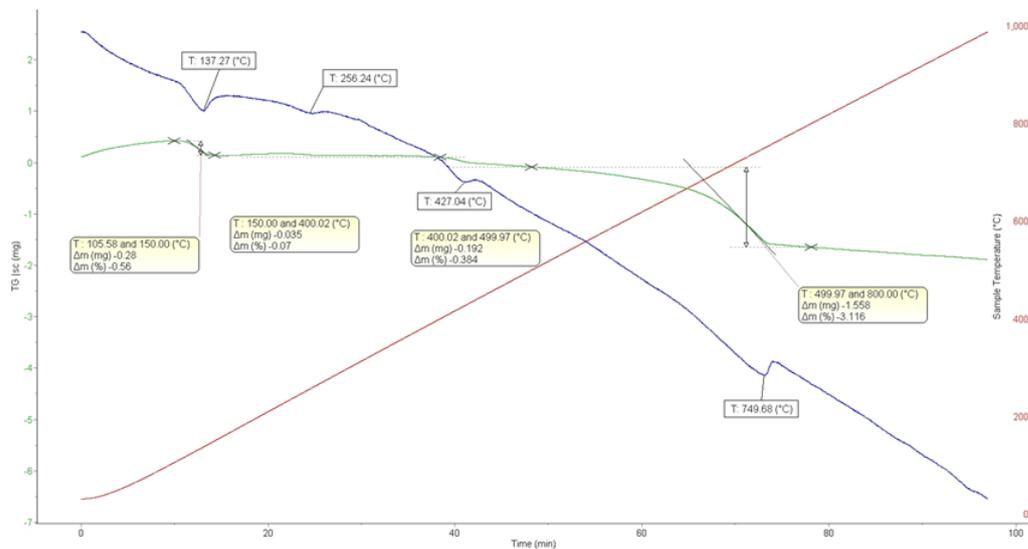
NOTA S:

- Os teores de carbonato correspondem à somatória do CaCO_3 (calcita) do calcário de adição acrescido do CaCO_3 proveniente de uma carbonatação incipiente das amostras (Para os cálculos, considerou-se a perda de massa teórica da calcita (44%))
- Os teores de portlandita foram calculados com base na perda de massa teórica desse mineral: 24,32%

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptada ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland (2018)).

A Figura 13 apresenta, respectivamente, as curvas de análise térmica diferencial (TG/DTA) do cimento CPV-ARI.

Figura 13 – Curva termogravimétrica do cimento CPV-ARI



Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A análise termodiferencial e termogravimétrica revela que o cimento possui teores de calcita e portlandita de, respectivamente 7,2% e 1,5%, sendo assim o teor de clínquer deve estar por volta de 90%.

3.2.1.2 Cinza de casca de arroz

O resumo da composição química da cinza de casca de arroz encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química da CCA

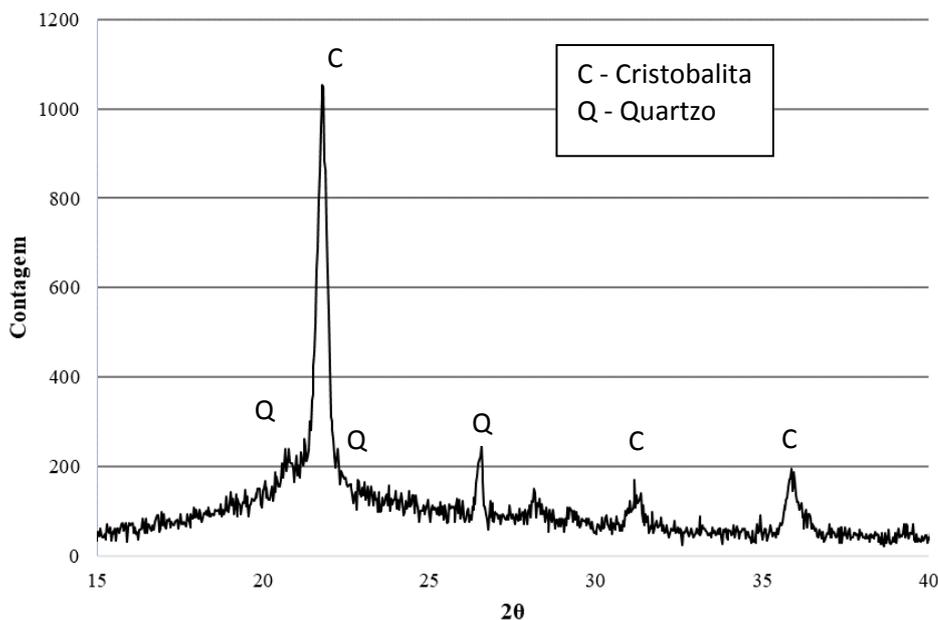
Composição química	Teor (% em massa)
Óxido de Cálcio (CaO)	2,19
Dióxido de Silício (SiO ₂)	87,72
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,46
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,41
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	0,01
Óxido de Magnésio (MgO)	0,53
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,60
Óxido de Titânio (TiO ₂)	-
Óxido de Estrôncio (SrO)	-
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	-
Óxido de Manganês (MnO)	-
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,04
Perda ao Fogo (PF)	4,96

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

Analisando-se os resultados obtidos na Tabela 6, pode-se observar que a CCA atende as especificações da ABNT NBR 12653, (2014) de Materiais pozolânicos, classificada como pozolana Classe E.

A Figura 14 apresenta o difratograma da CCA, mostrando poucos picos cristalinos de cristobalita, o óxido predominante é o de silício (sílica), pode-se identificar ainda que a CCA foi queimada sem controle de temperatura.

Figura 14 – Difratoograma da cinza de casca de arroz



Fonte: Adaptado, Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM – UFSM)

As características físicas da CCA podem ser observadas na Tabela 7.

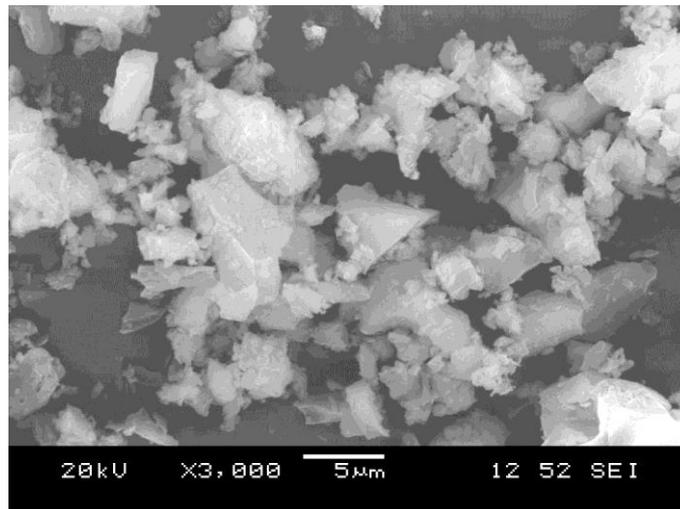
Tabela 7 – Caracterização físicas da CCA

Características físicas	CCA
Massa específica (g/cm ³)	2,07
Superfície específica BET (m ² /g)	21,38
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ID) (%)	95,77
Material retido na # 75 μm (%)	0,18
Tamanho médio dos grãos (μm)	11,95

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptada Superfície específica BET (LAPAM), tamanho médio dos grãos (ABCP) (2018).

A CCA, constata-se o valor elevado de superfície específica BET, de 21,38 m²/g, refletindo a sua estrutura interna altamente porosa e de grande superfície específica devido a presença de múltiplos vazios, fato que causa maior demanda de água (ou aditivo), quando da substituição parcial de cimento por essa adição mineral, ao concreto, conforme exemplificado na Figura 15.

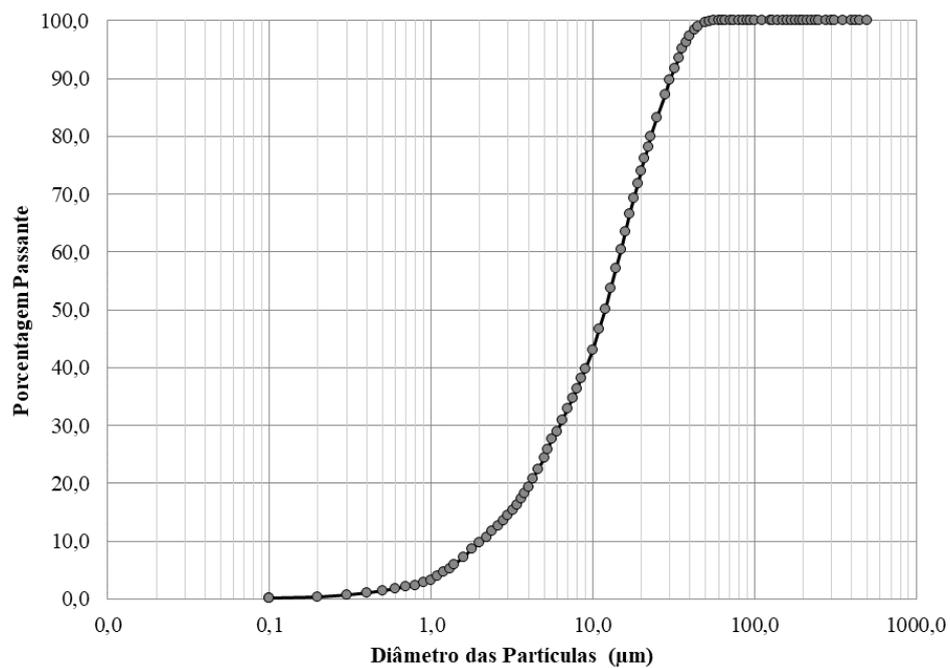
Figura 15 – Micrografia CCA



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFSM, 2018).

Na Figura 16, apresenta-se a curva granulométrica obtida por granulometria a laser. Logo a seguir pode ser visualizada a Tabela 8 com os diâmetros médios do respectivo material.

Figura 16 – Distribuição do tamanho das partículas da CCA



Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018)

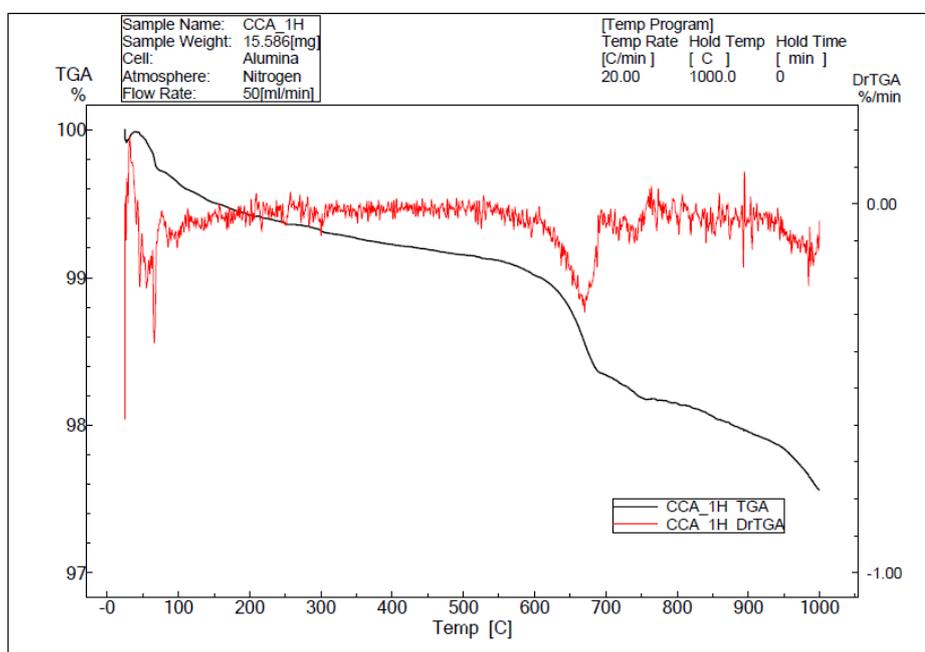
Tabela 8 – Diâmetro médio da CCA

Identificação das amostras	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)
Cinza de Casca de Arroz	11,95	2,06	30,28

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A Figura 17 apresenta a análise termogravimétrica da cinza de casca de arroz.

Figura 17 – Curva termogravimétrica da CCA



Fonte: Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM – UFSM, 2018).

Analisando-se a curva, a perda de massa total da cinza de casca de arroz foi de 2,44%. O pico acentuado foi entre 24°C e 77°C relativo à perda de água corresponde a 0,28% do total de perda de massa.

No ID da cinza de casca de arroz, observa-se que obteve índice de 95,77%, indicando boa atividade química por meio das reações pozolânicas.

3.2.1.3 Fíler calcário

A composição química do FC pode ser vista na Tabela 9.

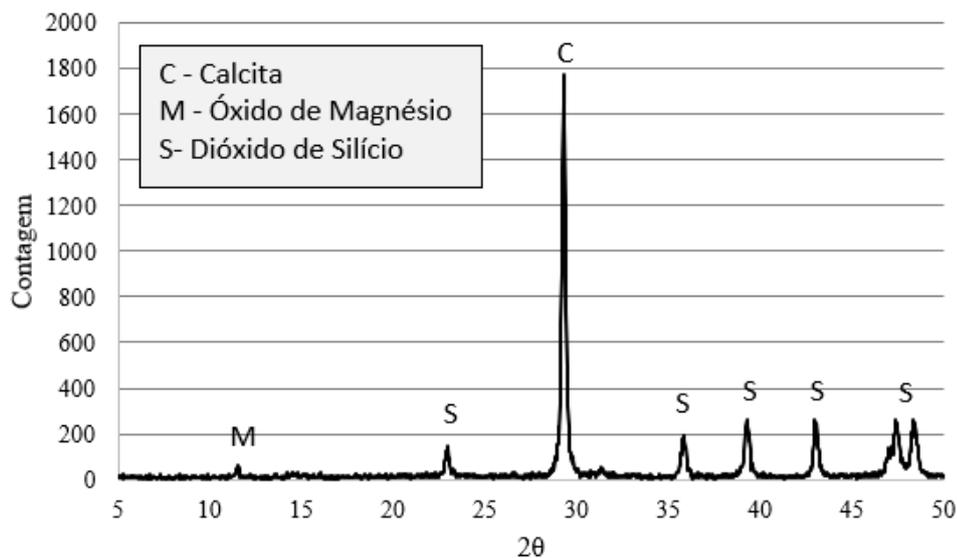
Tabela 9 – Composição química do FC

Composição química	Teor (% em massa)
Óxido de Cálcio (CaO)	53,60
Dióxido de Silício (SiO ₂)	1,04
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,20
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,27
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	1,14
Óxido de Magnésio (MgO)	0,31
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,02
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,82
Perda ao Fogo (PF)	41,41

Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A Figura 18 apresenta o difratograma do FC, com grandes picos de calcita, conforme indicou também a análise da composição química na Tabela 10.

Figura 18 – Difratograma do fíler calcário



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM – UFSM, 2018).

As características físicas do FC podem ser observadas na Tabela 10.

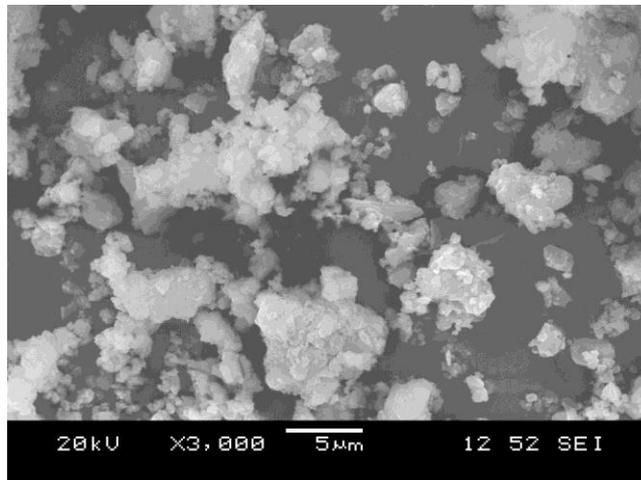
Tabela 10 – Caracterização físicas do FC

Características físicas	Fíler calcário
Massa específica (g/cm ³)	2,69
Superfície específica BET (m ² /g)	8,22
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ID) (%)	92,39
Material retido na # 75 µm (%)	12,74
Tamanho médio dos grãos (µm)	2,09

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptada Superfície específica BET (LAPAM), tamanho médio dos grãos (ABCP) (2018).

Em relação à superfície específica BET do FC, apresenta-se intermediário ao cimento e a cinza de casca de arroz na análise.

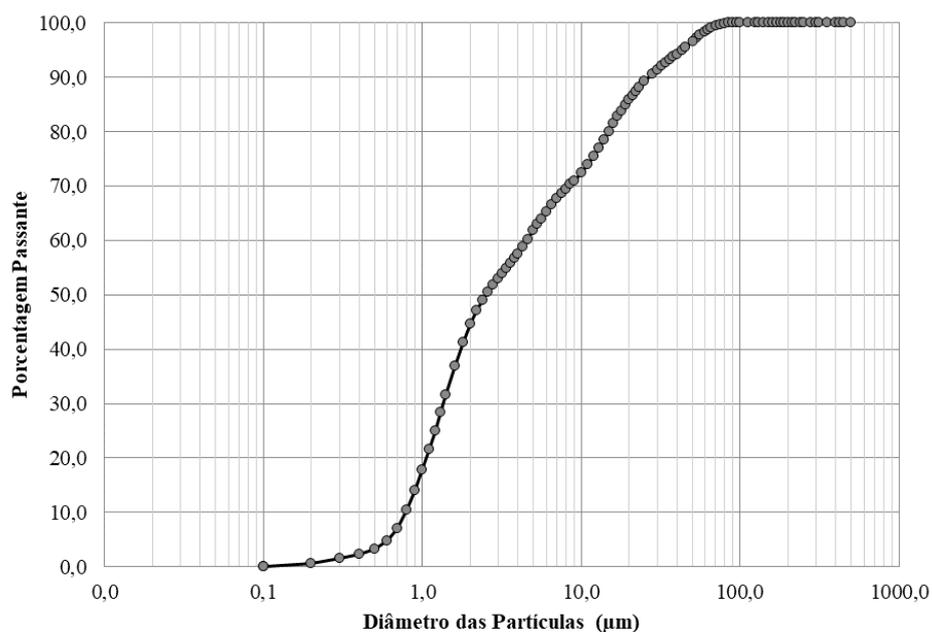
Figura 19 – Micrografia grãos do FC



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFSM, 2018).

A Figura 20, apresenta a curva granulométrica do FC obtida por granulometria a laser. Logo a seguir pode ser visualizada a Tabela 11 com os diâmetros médios do respectivo material.

Figura 20 – Distribuição do tamanho das partículas do FC



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

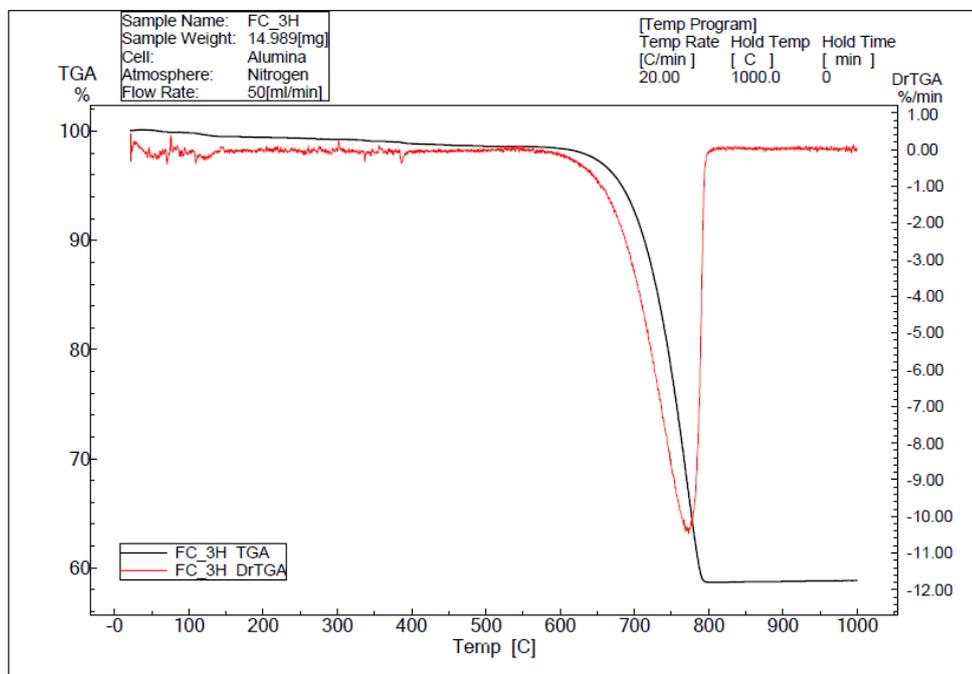
Tabela 11 – Diâmetro médio do fíler calcário

Identificação das amostras	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)
Fíler Calcário	2,09	0,73	19,42

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018).

A Figura 21 apresenta a análise termogravimétrica FC.

Figura 21 – Curva termogravimétrica do FC



Fonte: Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM – UFSM, 2018).

Analisando-se a curva do calcário nota-se um decréscimo entre 0°C e 600°C, correspondente à perda de umidade, medida em torno de 0,173mg. Também se percebe uma perda significativa de massa entre 600°C a 800°C, correspondente à decomposição da calcita (CaCO_3), representando uma perda de 39,68%. Acima de 800°C manteve-se constante. A perda de massa total do calcário foi de 41,46%.

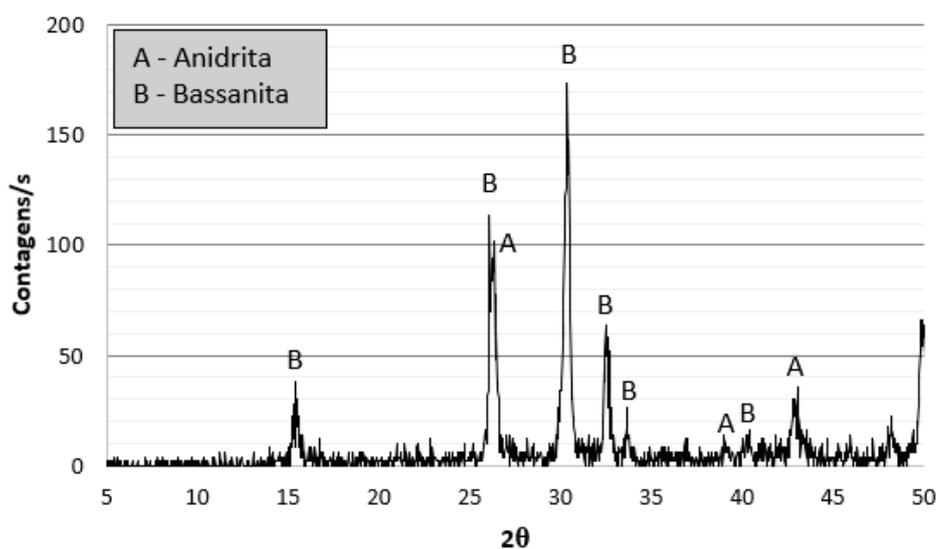
Em relação ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ID) (Tabela 13), executado com argamassas conforme ABNT NBR 5752, (2014), observa-se que o fíler calcário com 3 horas de moagem apresentou ID de 92,39% (maior de 90% estabelecido

pela ABNT NBR 12653, (2014), índice considerado muito bom já que o material é um fino inerte.

3.2.1.4 Sulfato de cálcio dihidratado

A identificação das fases cristalinas presentes, foram determinadas por difração de raios X (DRX), com as seguintes condições de ensaio: radiação de Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA. Os difratogramas foram obtidos em um Difratorômetro de raios X de pó da marca *Rigaku*, modelo *Miniflex 300*, operando em modo *Step*, com *Scan speed* de 0,5 s e *Scan step* de 0,03°, em ângulos de 5 a 100°. Este equipamento possui radiação de Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA. A Figura 22 apresenta o difratograma do GS (gesso).

Figura 22 – Difratoograma do GS



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM – UFSM, 2019).

As características físicas do GS podem ser observadas na Tabela 12.

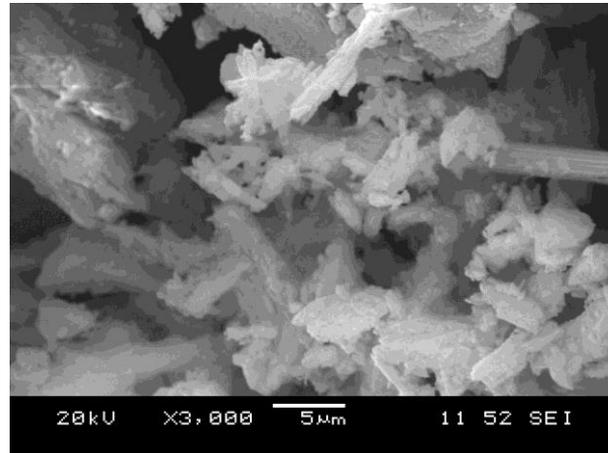
Tabela 12 – Caracterização físicas do GS

Características físicas	CaSO ₄
Massa específica (g/cm ³)	2,56
Superfície específica BET (m ² /g)	4,19
Material retido na # 75 μm (%)	16,4
Tamanho médio dos grãos (μm)	22,78

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptada Superfície específica BET e tamanho médio dos grãos (LACER) (2019).

Na Figura 23, apresenta-se a micrografia do GS.

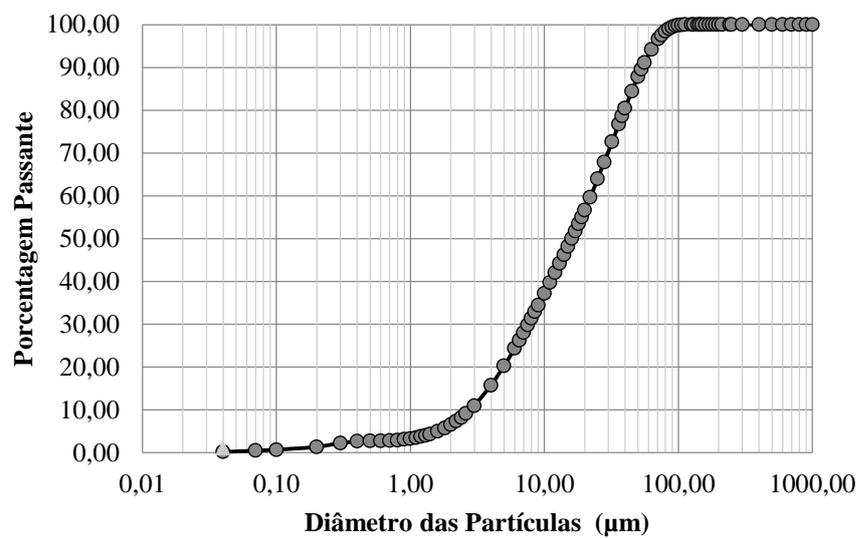
Figura 23 – Micrografia grãos do GS



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFSM, 2019).

A Figura 24, apresenta a curva granulométrica do GS obtida por granulometria a laser. Logo a seguir pode ser visualizada a Tabela 13 com os diâmetros médios do respectivo material.

Figura 24 – Distribuição do tamanho das partículas do Sulfato de cálcio dihidratado (GS)



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos UFRGS, 2019).

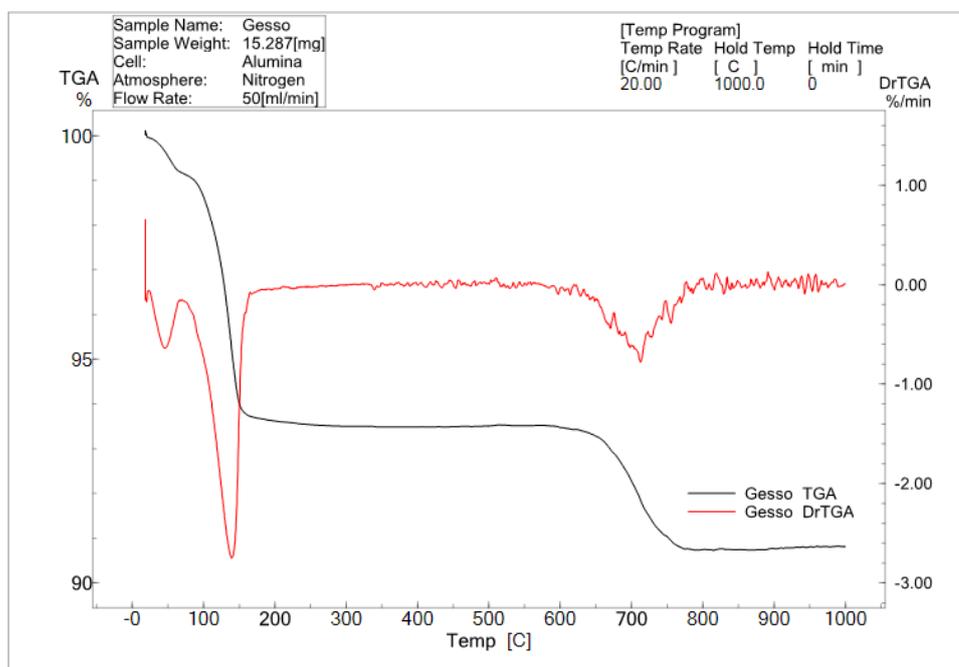
Tabela 13 – Diâmetros médios do GS

Identificação das amostras	DIMENSÃO média (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)
GS	22,78	2,79	53,76

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2019).

A Figura 25 apresenta a análise termogravimétrica do GS.

Figura 25 – Curva termogravimétrica do GS



Fonte: LAPAM (Laboratório de Processos Ambientais, UFSM, 2019).

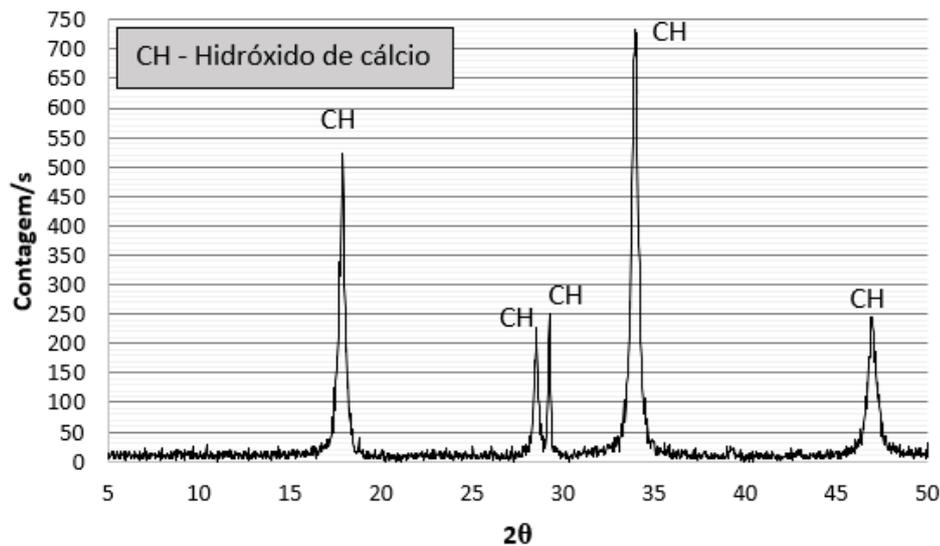
Analisando-se a Figura 25, do sulfato de cálcio (GS) nota-se um decréscimo entre 0°C e 68°C, correspondente à perda de umidade, medida em torno de 0,127mg. Também se percebe uma perda significativa de massa entre 68°C a 168°C, representando uma perda de 0,835%. Acima de 200°C manteve-se constante até 785°C, onde obteve-se uma perda de 0,410 mg. A perda de massa total foi de 1,405mg, 9,19%.

3.2.1.5 Hidróxido de cálcio

A identificação das fases cristalinas presentes do hidróxido de cálcio, foram determinadas por difração de raios X (DRX), com as seguintes condições de ensaio: radiação

de Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA. Os difratogramas foram obtidos em um Difratorômetro de raios X de pó da marca *Rigaku*, modelo *Miniflex 300*, operando em modo *Step*, com *Scan speed* de 0,5 s e *Scan step* de 0,03°, em ângulos de 5 a 100°. Este equipamento possui radiação de Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA. A Figura 26 apresenta o difratograma da CHI.

Figura 26 – Difratorograma da CH I.



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado LAPAM (Laboratório de Processos Ambientais, UFSM, 2019).

As características físicas do CH I podem ser observadas na Tabela 14.

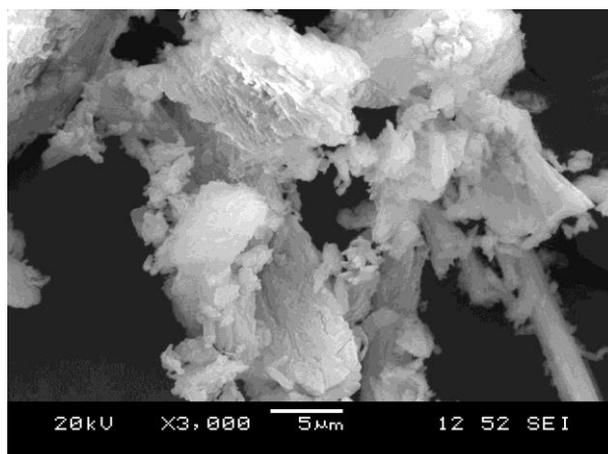
Tabela 14 – Caracterização físicas do CH I

Características físicas	Ca(OH) ₂
Massa específica (g/cm ³)	2,30
Superfície específica BET (m ² /g)	10,25
Material retido na # 75 μm (%)	1,36
Tamanho médio dos grãos (μm)	8,02

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado Superfície específica BET e tamanho médio dos grãos (LACER) (2019).

Observa-se na Figura 27 a micrografia da CH I.

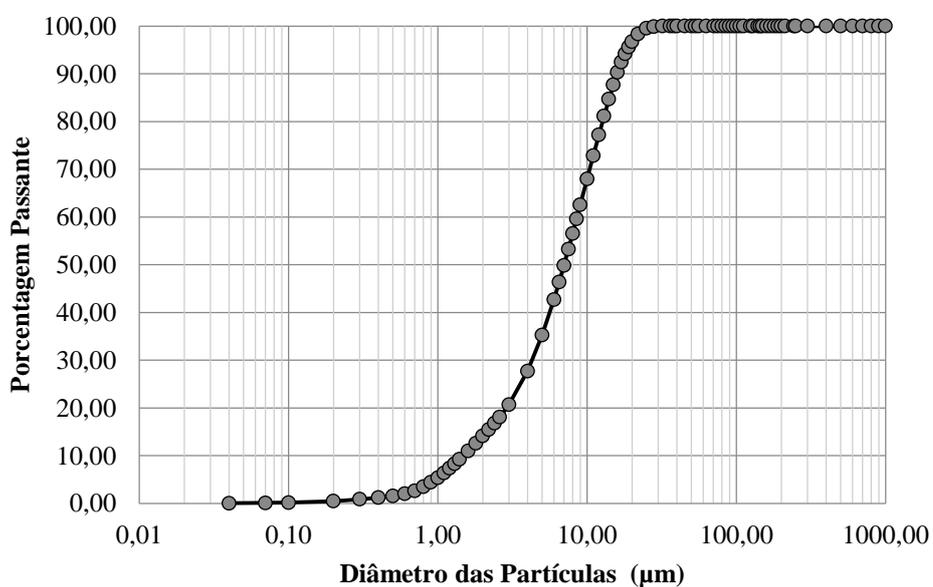
Figura 27 – Micrografia grãos do CH I



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFSM, 2019).

A Figura 28, apresenta a curva granulométrica do CH I obtida por granulometria a laser. Logo a seguir pode ser visualizada a Tabela 18 com os diâmetros médios do respectivo material.

Figura 28 – Distribuição do tamanho das partículas do Hidróxido de cálcio



Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado LACER (Associação Brasileira de Cimento Portland) (2018).

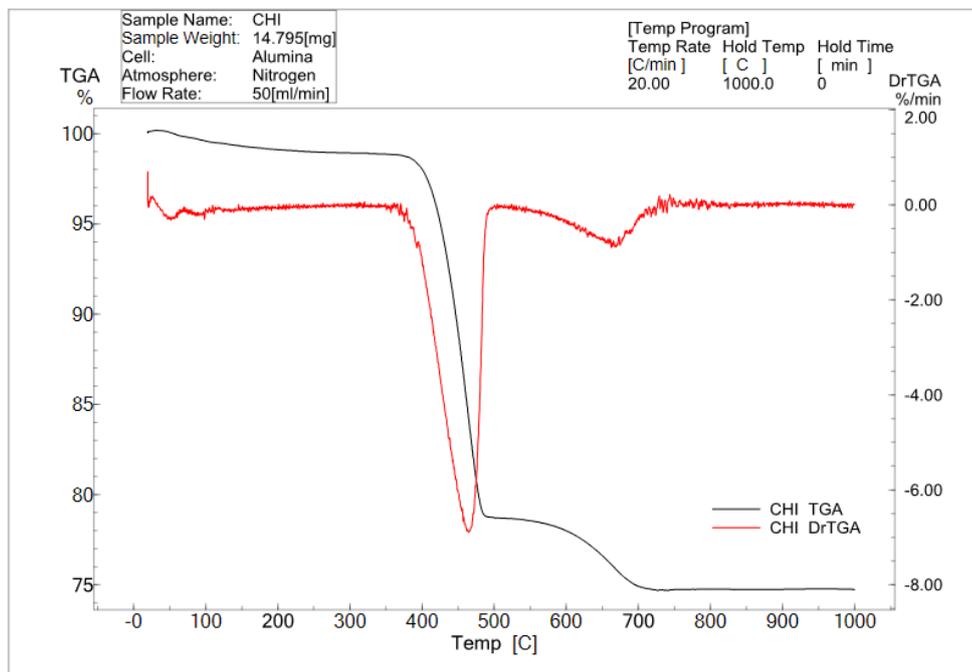
Tabela 15 – Diâmetros médios da CH I

Identificação das amostras	DIMENSÃO média (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm)
CH I	8,02	1,48	15,88

Fonte: Elaborada pela Autora, adaptado LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos UFRGS) (2018).

A Figura 29 apresenta a análise termogravimétrica da CH I.

Figura 29 – Curva termogravimétrica do CH I



Fonte: LAPAM (Laboratório de Processos Ambientais – UFSM, 2019).

Analisando-se a Figura 29 da curva da CH I, nota-se um decréscimo entre 0°C e 360°C, correspondente à perda de umidade, medida em torno de 0,176mg. Também se percebe uma perda significativa de massa entre 360°C a 495°C, representando uma perda de 20,08%. Acima de 495°C manteve-se praticamente constante. A perda de massa total foi de 25,27%.

3.2.2 Agregados

Tendo em vista um melhor empacotamento de partículas foram utilizadas duas areias provenientes das jazidas do Arenal em Santa Maria, classificadas como fina ($D_{máx} < 1,2$

mm) e média ($D_{\text{máx}} < 2,4$ mm), a fim de fornecer grãos de dimensões que possibilitem a melhor transição dos grãos finos do cimento e adições com o agregado graúdo, atendendo as especificações da ABNT NBR 7211, (2009) Agregados para concreto – Especificação.

Agregado graúdo britado é oriundo da Pedreira Pinhal, do município de Itaara de origem diabásica (plagioclásio e piroxênios), classificadas como brita 0 ($D_{\text{máx}} \leq 12,5$ mm), atendendo as especificações da ABNT NBR 7211, (2009) – Especificações. os ensaios realizados para caracterização desses materiais estão apresentados a seguir:

- a) Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248, 2003);
- b) Determinação da massa específica e da massa aparente do agregado miúdo (ABNT NBR NM 52, 2009);
- c) Determinação da massa específica e massa aparente do agregado graúdo (ABNT NBR NM 53, 2009);
- d) Determinação da massa unitária e volume de vazios dos agregados (ABNT NBR NM 45, 2006);
- e) Abrasão Los Angeles do agregado graúdo (ABNT NBR NM 51, 2001);
- f) Absorção de água do agregado miúdo (ABNT NBR NM 30, 2001);
- g) Absorção de água do agregado graúdo (ABNT NBR NM 53, 2009);
- h) Índice de forma do agregado graúdo (ABNT NBR 7809, 2019);

A Tabela 16 demonstra as características físicas dos agregados miúdos e graúdos.

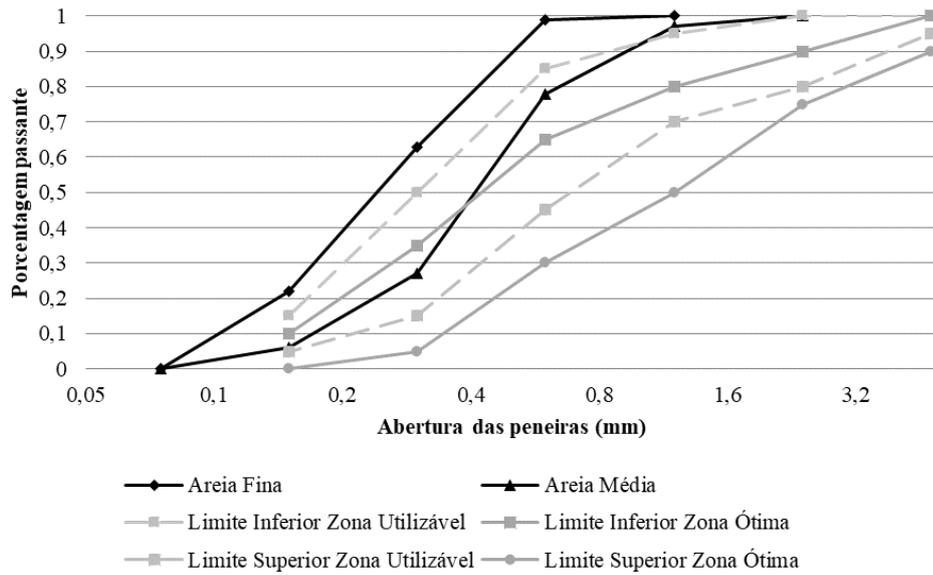
Tabela 16 – Características físicas dos agregados miúdos e graúdos

Propriedades	Areia fina	Areia média	Brita 0
Módulo de finura	1,16	1,92	3,23
Diâmetro máximo característico (mm)	0,6	1,20	9,50
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,62	2,46
Massa unitária (g/cm ³)	1,68	1,65	1,22
Volume de Vazios (%)	36,34	36,77	50,40
Perda de massa por abrasão Los Angeles (%)	-	-	11,07
Índice de forma	-	-	2,09
Absorção de água (%)	0,31	0,33	3,17

Fonte: Elaborada pela Autora (2018).

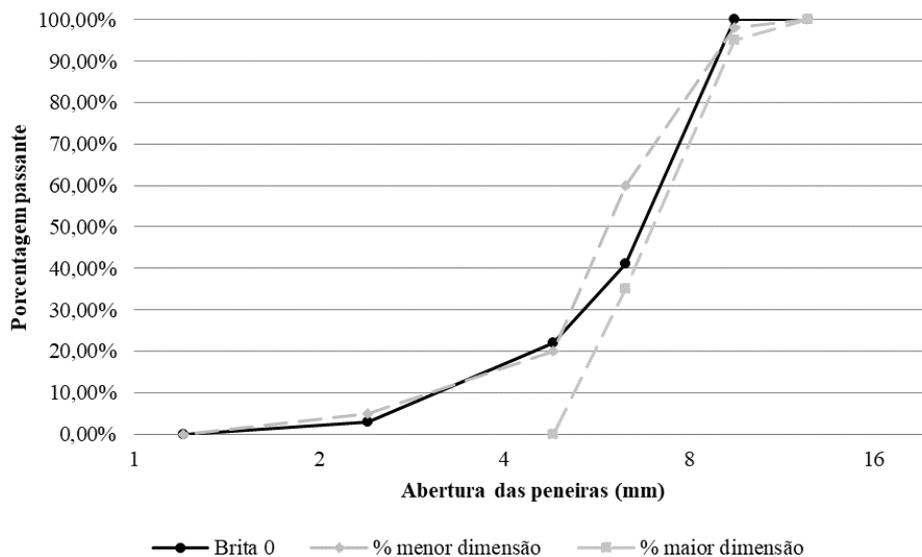
A análise da composição granulométrica dos agregados selecionados, determinada de acordo com a (ABNT NBR NM 248, 2003), é apresentada nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Distribuição do tamanho das partículas dos agregados miúdos



Fonte: Elaborada pela Autora (2018).

Figura 31 – Distribuição do tamanho das partículas do agregado graúdo



Fonte: Elaborada pela Autora (2018).

De acordo com a ABNT NBR 7211:2009 os agregados miúdos devem enquadrar-se dentro dos limites de distribuição granulométrica. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90, da utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20, assim como da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50. A areia fina, mesmo não estando dentro das faixas da norma, também será utilizada tendo-se em vista que o teor de vazios entre as partículas tende a diminuir com o aumento do empacotamento granulométrico e a areia média encontra-se dentro da zona inferior

utilizável. Em relação ao agregado graúdo, o índice de forma dos grãos não deve ser superior a 3, e o índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” deve ser inferior a 50% em massa do material, sendo assim o agregado graúdo da pesquisa atende aos parâmetros estabelecidos pela norma.

3.2.3 Aditivo químico

Com o intuito de atingir um considerável empacotamento das partículas e consequentemente um efetivo ganho de resistência faz-se necessário dispersar, as partículas finas da pasta com a utilização de aditivos superplastificantes em quantidades compatíveis com as necessidades do presente trabalho. Para tanto foi realizado o ensaio de Marsh com o objetivo de verificar o teor ideal de aditivo. A opção pela escolha do ensaio de Marsh deu-se pela facilidade de execução do mesmo, pela sua rapidez e capacidade de reprodução. Para este estudo foram utilizados três diferentes tipos de aditivos: o plastificante MasterPolyheed 38; o superplastificante MasterRheobuild 1000; e o MasterGlenium 54.

Um resumo das características físicas e químicas dos aditivos selecionados é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Características dos aditivos

Propriedades	Masterpolyheed 38	Masterrheobuild 1000	Masterglenium 54
pH	8 a 10	8 a 10	5 a 7
Teor de sólidos	14,8 a 38,5	39,5 a 43,5	38 a 42
Densidade (g/cm ³)	1,18	1,21	1,10
Base química	Lignosulfonatos	Naftaleno Sulfonato	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido Castanho Escuro	Líquido Castanho	Líquido Branco Turvo

Fonte: Elaborada pela Autora, Adaptado Feltrin (2017).

3.2.3.1 Verificação da compatibilidade entre cimento e aditivos pelo método Marsh

No presente trabalho, baseou-se nos resultados obtidos por Feltrin, 2017, na qual a compatibilidade se deu com o cimento escolhido (CPV-ARI) e o aditivo Master Glenium 54, quando comparados os três tipos de aditivo, levando-se em consideração o que apresentou menor teor de adição em relação aos demais. O fator água cimento escolhido foi de 0,3 tendo em vista que serão estudados concretos com fator água cimento entre 0,3 e 0,65, sendo as relações a/ag mais baixas as que necessitam de maior quantidade de aditivo. Iniciou-se os ensaios com um teor de 0,2% com sucessivos acréscimos de 0,2% até 50% do teor recomendado pelo fabricante. Os tempos de escoamento foram determinados após 5 e 60

min das misturas. Foram preparadas as misturas de 1,2 L de pasta e mediu-se o tempo de escoamento de 800 ml de pasta. Os equipamentos utilizados neste ensaio foram: liquidificador, cone de Marsh e cronômetro (Figura 32).

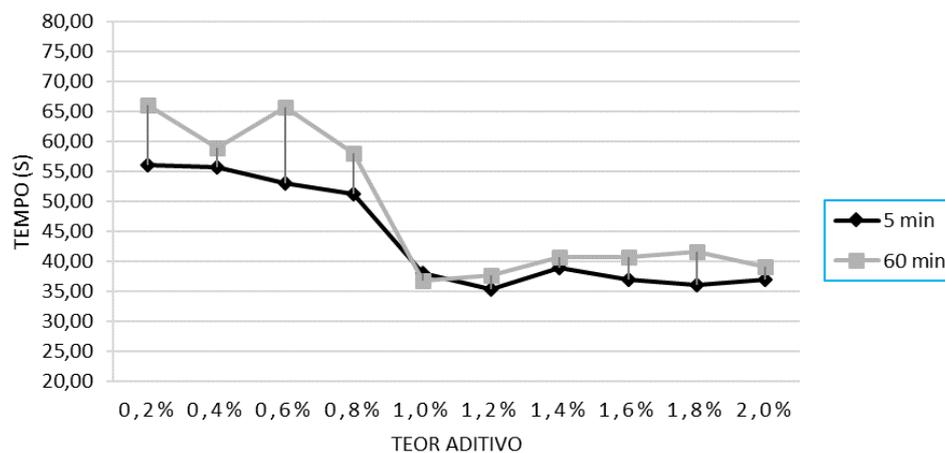
Figura 32 – Equipamentos utilizados no ensaio Marsh. Da esquerda para a direita: misturador mecânico, funil Marsh e cronômetro



Fonte: Feltrin (2017).

Os resultados da Figura 33 revelam que há compatibilidade do cimento com o aditivo hiperplastificante MasterGlenium 54, e que o teor ótimo de aditivo é de 1,0%. Observa-se que o incremento de aditivo não tem influência na viscosidade da pasta, gerando desperdício do mesmo.

Figura 33 – Compatibilidade do cimento com o aditivo plastificante MasterGlenium 54



Fonte: Elaborada pela Autora (2018).

O aditivo químico a ser utilizado para esta pesquisa foi o Master Glenium 54. Segundo BASF (2019) ele é um aditivo hiperplastificante a base de policarboxilatos que atua como dispersante do material aglomerante propiciando elevada redução de água e alta trabalhabilidade.

3.2.4 Água

A água utilizada foi potável, disponível no campus da Universidade Federal de Santa Maria.

3.3 DOSAGEM E EMPACOTAMENTO

Primeiramente, levando em consideração manter uma similaridade nos traços desenvolvidos em pesquisas anteriores no GEPECON, adotou-se teor ideal de argamassa do concreto por meio de ensaios de trabalhabilidade. O procedimento seguiu o recomendado por Helene, P. R. e Terzian (1992), sendo que foi encontrado o teor ideal de 51% para os materiais empregados.

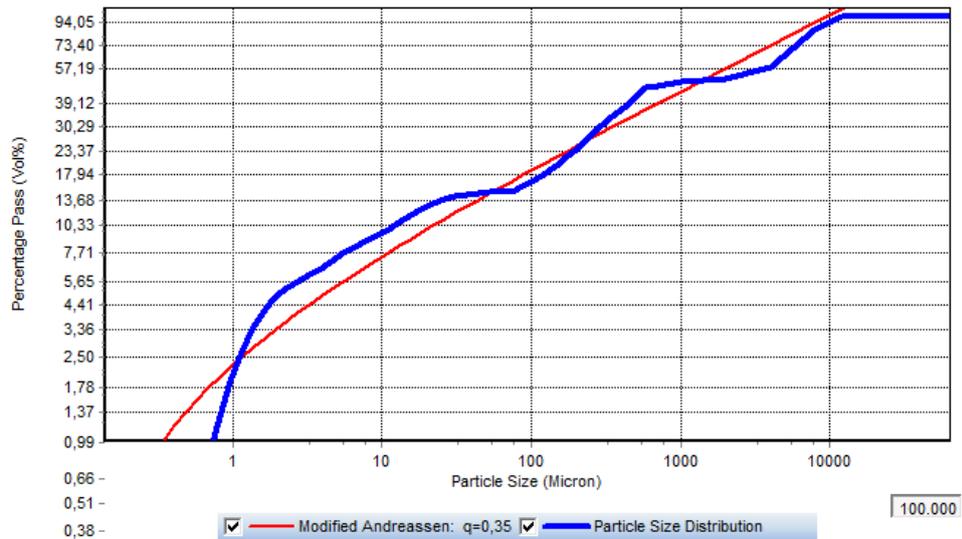
Tendo-se preparado os materiais, e fixados o teor de argamassa, a relação a/ag de 0,25, e o teor de substituição de cimento, buscou-se a melhor composição entre os agregados que apresenta a menor quantidade de vazios, por meio da análise do empacotamento de partículas dos materiais constituintes do concreto.

Para a determinação dos teores de substituição em volume de FC e CCA nas misturas binárias e ternárias, realizou-se um programa experimental prévio, investigando o comportamento mecânico em relação a compressão axial, com teores de substituição variando de 60%FC nas binárias e 50%FC+10%CCA, 60%FC+10%CCA para as ternárias.

O estudo do empacotamento das partículas de cimento, fíler, cinza de casca de arroz, areias e brita foi realizado por meio do método de Andreasen Modificado (FUNK, J.; DINGER, 1992; OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, 2000). A partir das curvas granulométricas determinadas por granulometria a laser (dos materiais finos) ou por peneiramento (dos agregados) foram testadas alternativas para o coeficiente de distribuição q entre 0,25 e 0,37, aproximadamente, para a obtenção do menor teor de vazios entre as partículas. Adotou-se o melhor resultado, ou seja, a curva real com os materiais testados que mais se aproximou da curva ideal para cada uma das misturas estudadas, a partir das análises realizadas com o software (EMMA, 2019).

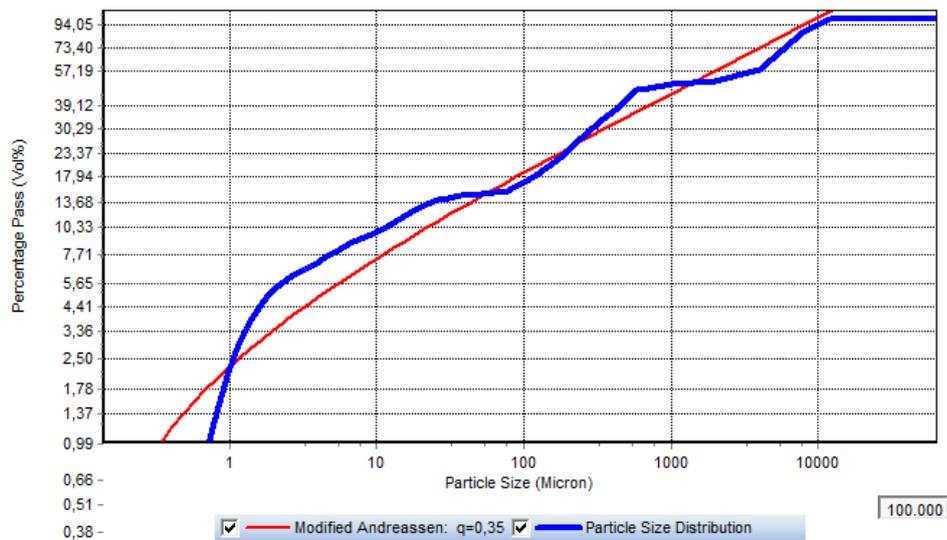
No total, estudou-se o empacotamento de cinco diferentes misturas de concreto previamente definidas, todas com teor total de substituição em relação ao volume do cimento. Na Figura 34, 35, 36, 37 e 38, é possível observar a distribuição do diâmetro de partículas no programa EMMA para $q = 0,35$.

Figura 34 – Mistura com 50% de cimento e 50% de fíler calcário (50FC)



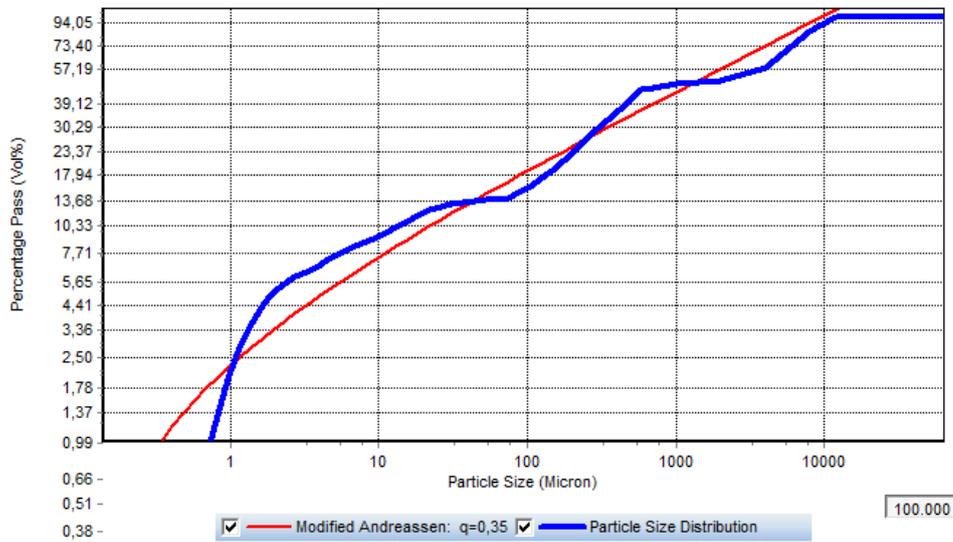
Elaborada pela Autora (2019).

Figura 35 – Mistura com 40% de cimento e 60% de fíler calcário (60FC)



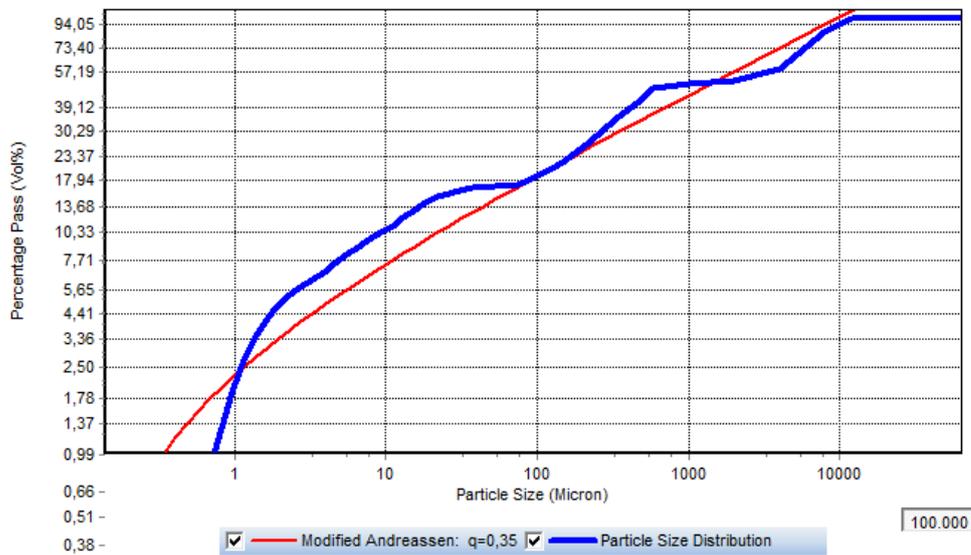
Elaborada pela Autora (2019).

Figura 36 – Mistura com 30% de cimento, 70% de fíler calcário e 5% de sulfato de cálcio (70FC5GS)



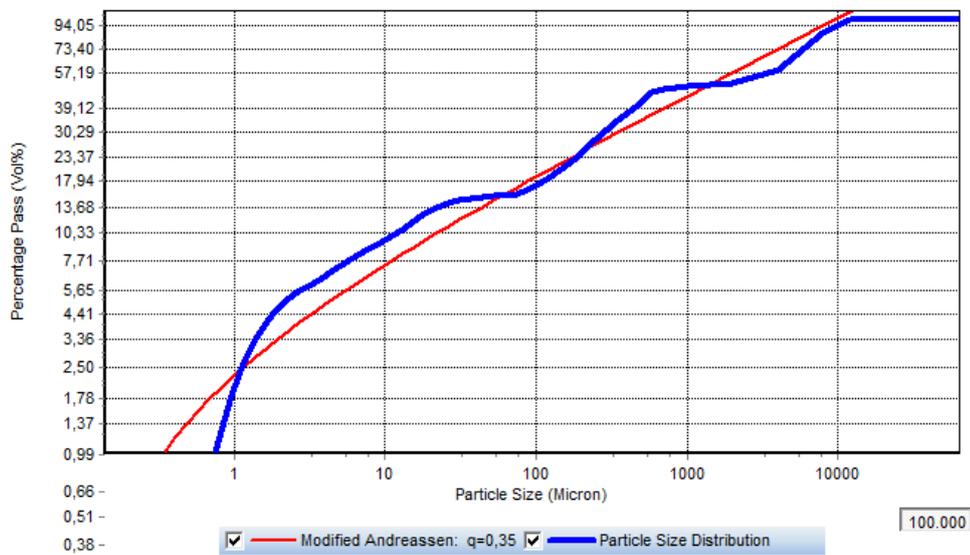
Elaborada pela Autora (2019).

Figura 37 – Mistura com 40% de cimento, 50% de fíler calcário, 10% de cinza de casca de arroz e 10% de hidróxido de cálcio (50FC10CCA10CHI)



Elaborada pela Autora (2019).

Figura 38 – Mistura com 40% de cimento, 50% de fíler calcário, 10% de cinza de casca de arroz e 5% de sulfato de cálcio (50FC10CCA5GS)



Elaborada pela Autora (2019).

Através das equações próprias para dosagem do concreto, e as massas específicas dos materiais utilizados nesta pesquisa, foram determinados os traços unitários representados na Tabela 18. O consumo de materiais por m³ de concreto de cada traço estão expostos na Tabela 19.

Tabela 18 – Traços unitários dos concretos em massa

Misturas	a/ag	CIM	FC3H	CCA1H	CH I	GS	AF	AM	B0	AD
REF	0,25	1	-	-	-	-	1,09	1,09	2,82	0,022 (2,20%)
50FC	0,25	0,5	0,43	-	-	-	1,09	1,09	2,82	0,020 (2,00%)
60 FC	0,25	0,4	0,53	-	-	-	1,09	1,09	2,82	0,020 (2,00%)
70FC5GS	0,25	0,3	0,63	-	-	0,025	1,09	1,09	2,82	0,022 (2,20%)
50FC10CCA10CH I	0,25	0,4	0,43	0,1	0,1	-	1,09	1,09	2,82	0,028 (2,80%)
50FC10CCA5GS	0,25	0,4	0,43	0,1	-	0,025	1,09	1,09	2,82	0,028 (2,80%)

Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 19 – Consumo de materiais por m³ de concreto. Aditivo em l/m³ e demais materiais em kg/m³

Misturas	CIM	FC3H	CCA1H	CHI	GS	AF	AM	B0	AD	H ₂ O
REF	505,00	-	-	-	-	550,45	550,45	1424,10	10,10	119,58
50FC	255,57	194,22	-	-	-	550,45	550,45	1424,10	9,18	120,19
60FC	204,45	239,60	-	-	-	550,45	550,45	1424,10	9,18	120,19
70FC5GS	153,34	284,97	-	-	10,75	550,45	550,45	1424,10	10,1	119,58
50FC10CCA10CHI	204,45	194,22	34,92	38,16	-	550,45	550,45	1424,10	12,85	117,77
50FC10CCA5GS	204,45	194,22	34,92	-	10,75	550,45	550,45	1424,10	12,85	117,77

Elaborada pela Autora (2019).

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

3.4.1 Estado fresco

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

A fim de avaliar o comportamento das misturas no estado fresco realizou os seguintes ensaios:

- a) Massa específica (ABNT NBR 9833, 2008);
- b) Teor de ar incorporado pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833, 2008);
- c) Rendimento (ABNT NBR 9833, 2008);
- d) Temperatura interna e externa;
- e) Consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998).

3.4.1.1 Massa específica, rendimento e teor de ar incorporado

Após a realização da homogeneização dos materiais constituintes do concreto foi realizado o ensaio de Massa específica pelo método gravimétrico, de acordo com a (ABNT NBR 9833, 2008) e determinadas as demais propriedades como: rendimento e o teor de ar incorporado.

3.4.1.2 Temperatura interna e externa

A temperatura externa (ambiente) foi monitorada com termômetro digital de bancada e a interna da mistura com um termômetro digital de haste.

3.4.1.3 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

A consistência foi determinada pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a (ABNT NBR NM 67:1998) mantida constante em todas as misturas no intervalo entre 100 e 120mm.

3.4.2 Estado endurecido

Os ensaios para análise do comportamento do concreto no estado endurecido, foram os seguintes:

- a) Resistência à compressão axial (NBR 5739 - 2018);
- b) Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222 - 2011);
- c) Módulo de elasticidade (NBR 8522 - 2017);
- d) Retração por secagem (ASTM C157/C157M, 2014) e ASTM C490/C490M, 2011).

3.4.2.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A determinação da resistência a compressão axial foi determinada aos 7, 28 e 91 dias, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior foi usada a média entre dois valores ou o resultado de maior valor. Foram ensaiados quatro corpos-de-prova para cada idade, sendo o valor de resistência adotado a média. Todos os ensaios foram realizados com os corpos-de-prova no estado úmido, a fim de padronizar a pior condição – quanto mais úmido, menor a resistência. Os mesmos, permaneceram em cura imersa com água e cal até as respectivas idades de ensaio. A regularização da superfície dos corpos-de-prova foi realizada em retífica. O ensaio de rompimento foi realizado em prensa INSTRON com capacidade de 100,000 psi (690 MPa), Modelo 1500HDX-C4-G7B. Os procedimentos de ensaio seguiram a norma ABNT NBR 5739:2018. A Figura 39 apresenta a o ensaio de compressão axial.

Figura 39 – Compressão axial



Fonte: Acervo da Autora (2019).

3.4.2.2 Ensaio de resistência à compressão diametral

A resistência a compressão diametral foi determinada aos 28 e 91 dias. Para a realização do ensaio, o corpo-de-prova cilíndrico 10cm x 20cm foi submetido a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas. A carga foi aplicada continuamente, sem choque, num crescimento constante dentro da faixa de resistência a tração por compressão diametral até a ruptura conforme recomenda a ABNT NBR 7222:2011. As Figuras 40 e 41 demonstram o ensaio sendo realizado e o corpo-de-prova após a ruptura.

Figura 40 – Tração por compressão diametral



Fonte: Acervo da Autora (2019).

Figura 41 – Corpo de prova após ruptura



Fonte: Acervo da Autora (2019).

3.4.2.3 Módulo de elasticidade

Para estudo desta propriedade do concreto, foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos 10x20 cm para cada um dos traços, ensaiado para a idade de 28 e 91 dias. Os procedimentos para a realização do ensaio foram orientados pela (ABNT NBR 8522:2017), em que foi utilizada a determinação através do módulo tangente inicial.

Os corpos de prova foram fixados por meio de um extensômetro eletrônico composto por quatro sensores independentes, e para obter a deformação o equipamento emite uma média através da leitura de cada sensor, sendo que esta leitura é fornecida diretamente para o software integrado da INSTRON.

A prensa utilizada para ensaio de módulo de elasticidade é a mesma utilizada para os outros ensaios mecânicos, inicialmente é aplicado um carregamento básico de 0,5 MPa (σ_a) e aumentado a carga até a tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (σ_b).

Essa tensão é mantida por 60 segundos e depois reduzida à tensão básica à mesma velocidade.

Deve-se realizar mais dois ciclos de cargas para no último ciclo de pré-carga e, no período de 60 segundos sob a tensão σ_a onde são registradas as deformações específicas (ϵ_a).

Após a realização de todas as leituras, o corpo de prova é levado à ruptura. Se a resistência efetiva (f_{cef}) à compressão diferir de f_c em mais de 20% os resultados dos corpos de prova são descartados.

O módulo de elasticidade, E_{ci} , em giga pascal, é dado pela Equação 2:

Equação 2 - Módulo de elasticidade

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\Delta\sigma_a - \Delta\sigma_b}{\Delta\epsilon_a - \Delta\epsilon_b} \cdot 10^{-3}$$

Onde:

$\sigma_a = 0,3 f_c$ é a tensão maior (Mpa).

$\sigma_b = 0,5$ Mpa, é a tensão básica (Mpa).

ϵ_a = deformação específica média dos corpos de provas ensaiados sob tensão maior.

ϵ_b = deformação específica média dos corpos de provas ensaiados sob tensão básica.

A cada duas determinações é feita uma média de cada traço, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizado o resultado de maior valor. A Figura 42 demonstra o ensaio de módulo de elasticidade sendo realizado.

Figura 42 – Módulo de elasticidade



Fonte: Acervo da Autora (2019).

3.4.2.4 Retração por secagem

O ensaio para a análise da retração por secagem, foi realizado de acordo com as normas da ASTM C157/C157M (2014) e ASTM C490/C490M (2011). A moldagem foi executada em fôrmas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 285 mm, inserindo-se um pino com 22,5 mm de comprimento no centro de cada uma das duas extremidades do prisma, de modo que a distância entre os pinos, dentro do corpo de prova, fosse de 250 mm. A Figura 43 apresenta a forma prismática utilizada.

Figura 43 – Fôrma prismática



Fonte: Acervo da Autora (2019).

Após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e conservados em câmara úmida até seus 7 dias. Nessas idades, em 2 corpos de prova de cada traço foi realizada a primeira leitura de seus comprimentos (dia zero). Na sequência, os corpos de prova foram condicionados em sala com temperatura ambiente do laboratório (de $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 10\%$), de maneira a ficarem com todas as faces ventiladas para garantir uma uniformidade de circulação do ar em todas as suas extremidades até as datas de ensaios de 07, 14, 28 e 56 dias (Figura 44).

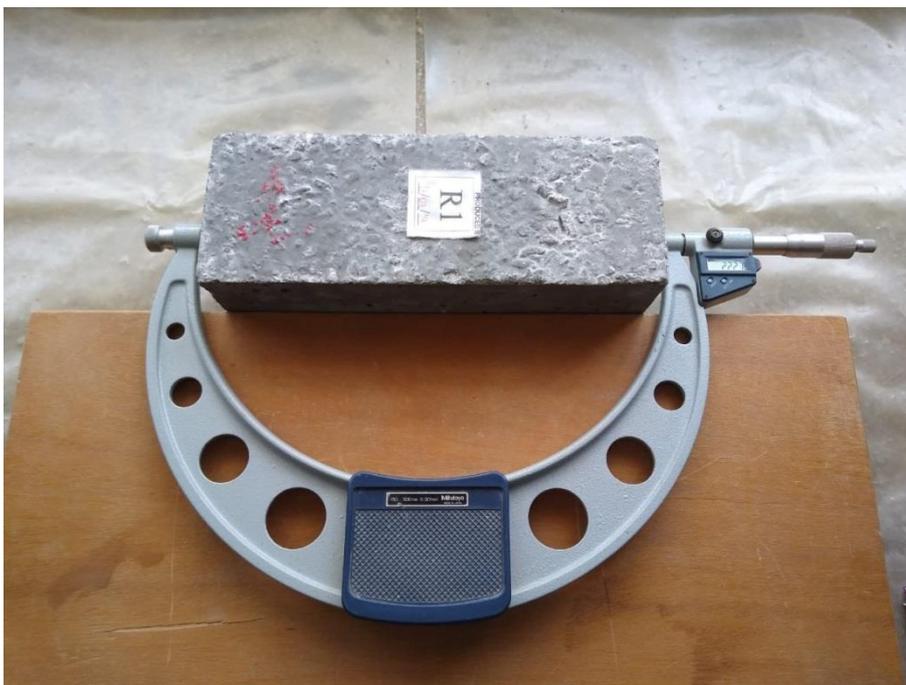
Figura 44 – Ambiente de cura dos corpos de prova de retração



Fonte: Acervo da Autora (2019).

Foi utilizado um comparador de expansibilidade, onde a retração foi medida com barra padrão e relógio comparador digital, sensível a 0,001mm. A Figura 45 demonstra a execução do ensaio.

Figura 45 – Comparador de expansibilidade



Fonte: Acervo da Autora (2019).

Os resultados de retração (L) são dados em porcentagem e calculados pela Equação 3.

Equação 3 - Retração

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \cdot 100$$

Onde:

L é a retração na idade do ensaio (%)

L_x é a leitura medida na data do ensaio (mm)

L_i é a leitura inicial, medida aos 7 dias (mm)

G é distância interna entre os pinos, igual a 250 mm

3.4.2.5 Análise estatística e tratamento de dados

Os dados coletados nos ensaios foram filtrados com o intuito de eliminar os valores espúrios das amostras. Foram considerados suspeitos quando o valor da resposta subtraído da média de suas repetições, era menor que o desvio padrão. Uma vez identificados, foram calculadas novas médias e novos desvios padrões, sem considerar esses valores atípicos.

Após o tratamento dos dados amostrados, os mesmos foram analisados pelo método estatístico. A partir da análise de variância dos ensaios realizados é possível verificar se existem diferenças significativas entre os tratamentos. Foram analisados por estatística descritiva e análise de variância (ANOVA), de forma que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95 %. Também foi realizado o Teste de Tukey para se ter conhecimento quais traços tiveram resultados mais significantes.

O valor de “F crítico” (F_{crit}) é um parâmetro de escala para o valor F. Se $F > F_{crit}$, o fator exerce um efeito estatístico significativo sobre o parâmetro, sendo que, quanto maior for a diferença entre os valores F e F_{crit} , maior a influência do fator sobre este parâmetro. A coluna com o “valor-P” (nível de significância) expressa a probabilidade de que qualquer correlação entre a variável explicada (misturas) e o fator (relação a/c e tempo) seja ao acaso. Quando o valor-P < erro do experimento (neste caso, 1%), existem indicativos de que o fator exerça influência estatística significativa sobre o parâmetro, uma vez que, quanto menor este valor, maiores os indicativos de que a correlação entre o fator e a variável explicada não sejam ao acaso.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais. Foram feitas análises em função do teor de substituição do cimento pelo FC e CCA em função do tempo, comparados dados pertinentes à análise das propriedades mecânicas dos concretos como a resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e retração por secagem no estado fresco e endurecido.

4.1 ESTADO FRESCO

Em virtude do fator a/ag ser de 0,25 para todas as misturas e necessitar de um teor considerável de aditivo hiperplastificante, o comportamento das mesmas foi avaliado durante as moldagens para verificar algumas propriedades do estado fresco do concreto.

A Tabela 20 apresenta as características das misturas no estado fresco.

Tabela 20 – Características das misturas no estado fresco

Misturas	U. R. Amb. (%)	Abatimento (mm)	Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar (%)
REF	61	105,50	2477,33	1,98
50FC	69	102,00	2488,00	3,72
60FC	63	103,50	2493,33	4,15
70FC5GS	70	118,00	2498,67	4,72
50FC10CCA10CH I	61	110,00	2504,00	5,25
50FC10CCA5GS	68	102,00	2437,33	2,08

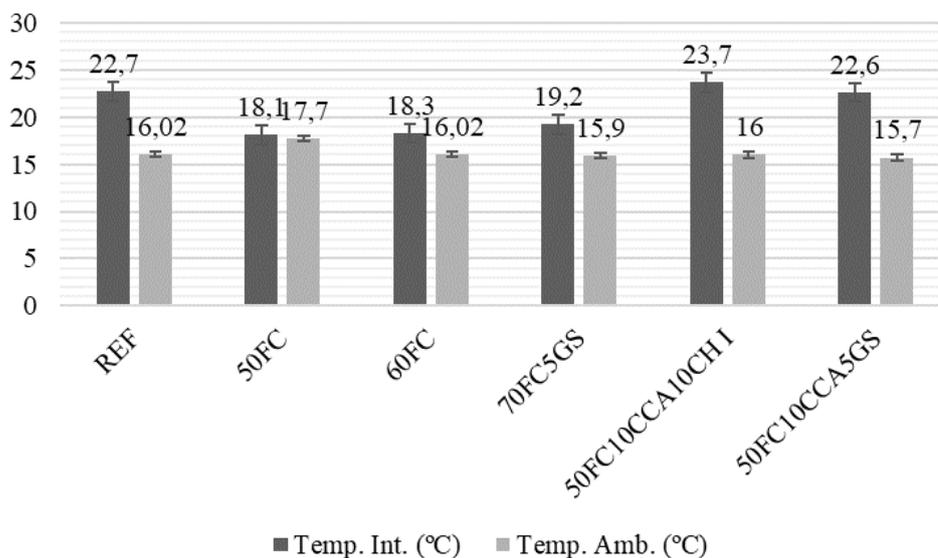
Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Analisando os dados obtidos para o teor de ar incorporado, evidencia-se que a mistura ternária 50FC10CCA10CHI foi a que mais incorporou ar durante o processo de mistura. Pode-se considerar tal comportamento em virtude da quantidade de finos para serem incorporados no processo de mistura.

Observa-se que as misturas ternárias, 50FC10CCA10CHI e 50FC10CCA5GS foram as que apresentaram maior temperatura interna quando comparadas as demais. Em contra partida

a 50FC apresentou a menor temperatura interna, entre as misturas binárias e ternárias (Figura 46).

Figura 46 – Temperatura das misturas no estado fresco



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

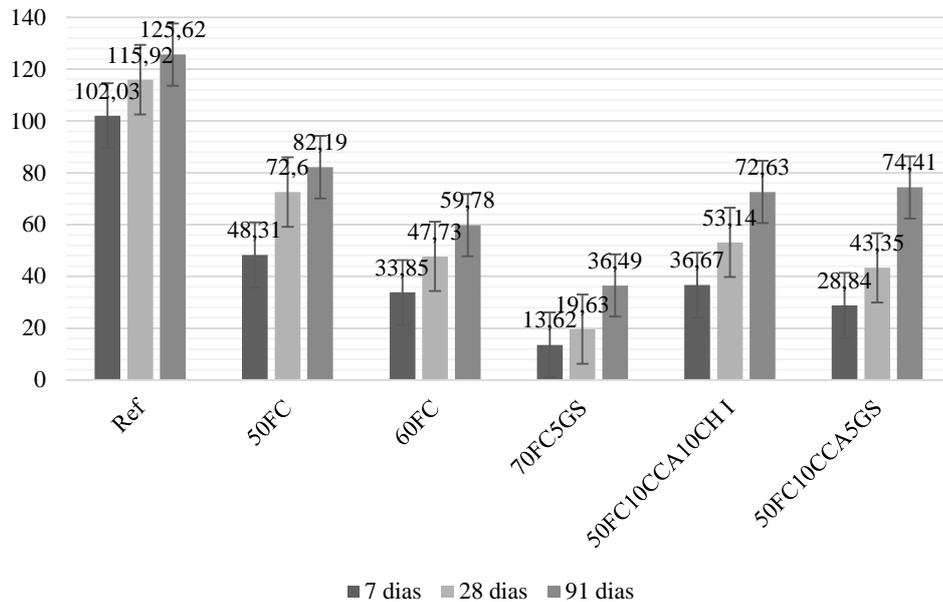
Os dados obtidos para massa específica de cada mistura, não evidenciaram diferenças significativas. De acordo com Neville, (2016) a massa específica de concretos com fíler calcário apresentam diferenças, o que não foi identificado nos dados coletados.

4.2 ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Resistência à compressão axial

A Figura 47 apresenta os resultados obtidos para as respectivas idades de ensaio.

Figura 47 – Resistência à compressão axial



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Observa-se, ganhos de resistências das misturas conforme aumentou a idade de cura. Nenhuma das misturas em questão apresentou resultados superiores a mistura de controle, porém cumpriram com o objetivo, em desenvolver misturas de concretos com fck usuais (20 a 50MPa). Os melhores resultados das misturas binárias aos 7, 28 e 91 dias destaca-se a mistura 50FC e nas ternárias a 50FC10CCA10CHI, com exceção aos 91 dias que a 50FC10CCA5GS apresentou melhor desempenho. A mistura 50FC apresentou resistências a compressão compatíveis com concretos de alto desempenho, a de 60FC com concretos convencionais, assim como as duas misturas ternárias com CH I e GS. Silva e Brito (2016), investigaram o comportamento de misturas binárias e ternárias com 60% e 70% de FC e identificaram aumento na resistência a compressão axial em idades precoces e menor retração.

Acredita-se que o efeito físico do FC tenha colaborado para o desenvolvimento de resistência na mistura 50FC aos 91 dias, pois conforme apresentado na Figura 34, comparando-a com a Figura 36, a uma aproximação da curva real em relação a ideal mais precisa do que a mistura ternária 50FC10CCA10CHI.

4.2.1.1 Evolução da resistência a compressão axial

Os ganhos de resistência a compressão axial verificada nas diferentes misturas, pode ser expressa na forma de porcentagem, como é observada na Tabela 21, onde é realizada uma comparação nos resultados das misturas binárias e ternárias.

Tabela 21 – Variação resistência compressão axial

Mistura	7 dias		28 dias		91 dias	
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
REF	102,03	81,22	13,89	11,06	9,7	7,72
50FC	48,31	58,78	24,29	29,55	9,59	11,67
60FC	33,85	56,62	13,88	23,22	12,05	20,16
70FC5GS	13,62	37,33	6,01	16,47	16,86	46,20
50FC10CCA10CHI	36,67	50,49	16,47	22,68	19,49	26,83
50FC10CCA5GS	28,84	38,76	14,51	19,50	31,06	41,74

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Nota-se pela Tabela 24, que a evolução da resistência a compressão axial nas misturas binárias ocorreu de forma gradativa nas idades de 7 para 28 dias, e na mistura 70FC5GS aos 91 dias houve um incremento de resistência acentuado.

Acredita-se que o GS tenha influenciado nesse comportamento, o que contraria os dados obtidos nos estudos realizados por Zajac et al. (2014), utilizando adição de calcário e gesso, evidenciou que o aumento de adição de sulfato de cálcio resultou em ganhos da resistência nas idades iniciais e uma redução nas idades posteriores, isso se deu pelo fato do teor de sulfato e de uma estabilização maior do volume de etringita, ambos benéficos para as idades precoces.

Nas misturas ternárias o comportamento foi semelhante, mas quando comparadas entre si, observa-se acréscimo considerável de resistência da mistura 50FC10CCA10CHI nas idades de 7 e 28 dias, porém aos 91 dias a 50FC10CCA5GS destacou-se no ganho de resistência. Acredita-se que por possuir adição mineral ativa, teve sua resistência impulsionada pelas reações pozolânicas, assim como a adição do GS, pode ter sido responsável por parcela deste comportamento.

O uso de um indicador de desempenho como unidade funcional permite evitar a distinção entre uma escala de material, onde os impactos são expressos em kg ou m³, e uma escala estrutural, na qual é usado o volume efetivo para fornecer a função. Essa abordagem permite comparar a eficiência dos concretos com performances diferentes que, por sua vez, colabora na busca para um design de mistura ideal. Assim, a intensidade do ligante (bi), que mede a quantidade total de ligante necessária para fornecer uma unidade de um determinado indicador de desempenho, para 1 MPa de resistência (DAMINELI et al., 2010). A equação 4 apresenta essa relação.

Equação 4 - Intensidade do ligante

$$bi = \frac{b}{p}$$

Onde:

bi, intensidade do ligante;

b, consumo total de material cimentício;

p, requisito de desempenho

A Tabela 22 apresenta o consumo de clínquer e a intensidade de ligante para cada uma das misturas.

Tabela 22 – Consumo de clínquer/MPa

Mistura	kg de cimento . m ⁻³	kg de clínquer . m ⁻³	kg de clínquer/MPa		
			7 dias	28 dias	91 dias
REF	505,00	454,50	4,45	3,92	3,62
50FC	257,57	231,81	4,80	3,19	2,82
60FC	204,45	184,01	5,44	3,86	3,08
70FC5GS	153,34	138,01	10,13	7,03	3,78
50FC10CCA10CH I	204,45	184,01	5,02	3,46	2,53
50FC10CCA5GS	204,45	184,01	6,38	4,24	2,47

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tomando-se como parâmetro a idade de 28 dias, por ser indicada na ABNT NBR 5739:2018, identifica-se na Tabela 25 que somente a mistura 70FC5GS apresentou valor superior a 5 kg.m³/MPa. De acordo com Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018) a intensidade mínima de material cimentício atualmente é de 5 kg.m³/MPa, para concretos com resistência à compressão acima de 50 MPa a 28 dias. Para 30 MPa de fc28 a intensidade é ao redor de 8,0 kg.m³/MPa, enquanto a média global para todas as resistências é ao redor de 12 kg.m³/MPa. Os resultados obtidos nessa pesquisa abaixo de 5 kg.m³/MPa indica que é possível fazer concretos com teores muito baixos de clínquer, altos teores fíler calcário, com emissões de CO₂ abaixo de 2 kg de CO₂ por m³ de concreto, segundo os autores acima. A mistura 50FC obteve o menor índice das misturas binárias e a 50FC10CCA10CHI das ternárias.

4.2.1.2 Análise estatística compressão axial

As Tabelas 23, 24 e 25 demonstram os resultados da análise estatística das misturas em relação a compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias respectivamente, assim como o teste Tukey nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 23 – ANOVA fator único compressão axial 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	14086,61631	5	2817,323262	2196,64813	2,47443E-17	3,105875
Dentro dos grupos	15,39066667	12	1,282555556			
Total	14102,00698	17				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 24 – ANOVA fator único compressão axial 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10667,21538	5	2133,443075	1088,764482	8,74657E-09	4,387374
Dentro dos grupos	11,75705	6	1,959508333			
Total	10678,97243	11				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 25 – ANOVA fator único compressão axial 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8514,066167	5	1702,813233	1714,270273	2,24451E-09	4,387374
Dentro dos grupos	5,9599	6	0,993316667			
Total	8520,026067	11				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 26 – Teste tukey compressão axial 7 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CH I	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	82,16		0,00	0,00	0,00	0,00
60FC	104,3	22,12		0,00	0,08	0,00
70FC5GS	135,2	53,05	30,93		0,00	0,00
50FC10CCA10CH I	99,96	17,8	4,318	35,25		0,00
50FC10CCA5GS	111,9	29,77	7,657	23,28	11,98	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 27 – Teste tukey compressão axial 28 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CH I	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	70,98		0,00	0,00	0,00	0,00
60FC	112,00	41,05		0,00	0,00	0,00
70FC5GS	158,4	87,47	46,41		0,00	0,00
50FC10CCA10CH I	103,1	32,13	8,927	55,34		0,00
50FC10CCA5GS	119,3	48,31	7,254	39,16	16,18	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 28 – Teste tukey compressão axial 91 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CH I	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	80		0,00	0,00	0,00	0,00
60FC	121,6	41,61		0,00	0,00	0,00
70FC5GS	164,8	84,85	43,24		0,00	0,00
50FC10CCA10CH I	97,75	17,75	23,86	67,09		0,25
50FC10CCA5GS	94,47	14,47	27,14	70,38	3,286	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Através da avaliação dos resultados da Análise de Variância contida nas Tabelas 26 a 28, pode-se perceber que o valor de F, foi muito superior ao F crítico, para todas as misturas analisadas, o que indica que a variável idade tem uma significativa influência estatística nos dados. Além disso, os baixos resultados obtidos para o valor-P (menores que 0,01), em todas as misturas indicando que há significância entre as misturas e as idades, com 95% de confiança.

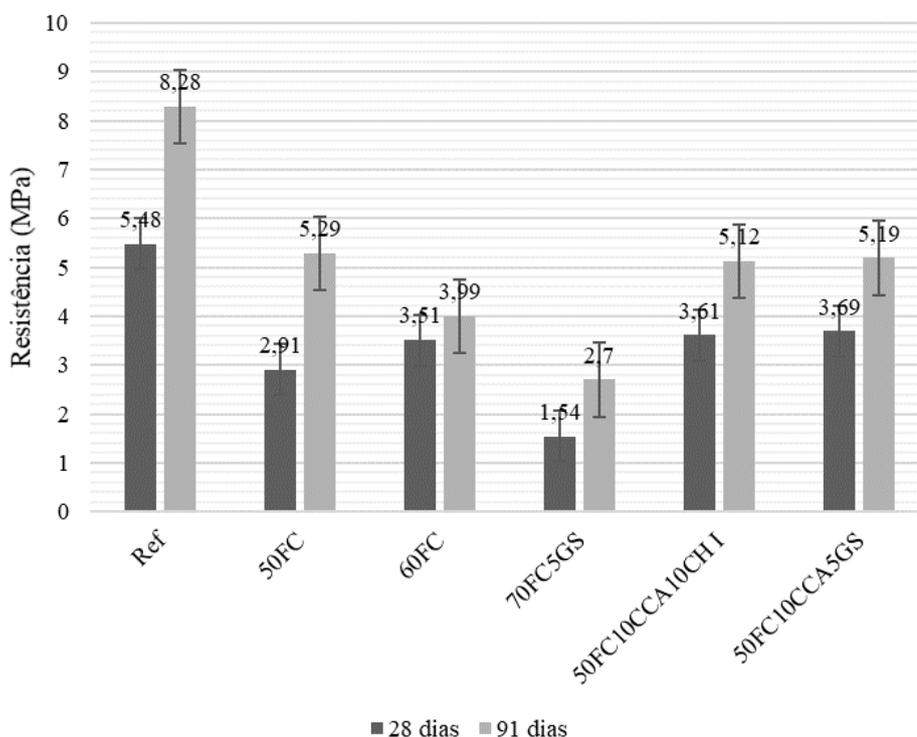
Os resultados do Teste de Tukey confirmam que a substituição do cimento por adições minerais em misturas binárias e ternárias de fíler calcário e cinza de casca de arroz pode resultar em variações significativas de resistência.

Quando realizada ANOVA (Tabela 26) evidenciou diferenças significativas entre as misturas. Aos 7 dias (Tabela 29) somente a mistura 50FC10CCA10CHI e 50FC não apresentaram diferenças significativas, aos 28 dias (Tabela 30) nenhuma mistura apresentou diferença significativa e aos 91 dias (Tabela 31) somente as misturas 50FC10CCA5GS e 50FC10CCA10CHI não apresentaram diferenças significativas através do teste Tukey.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os valores de resistência a tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Resistência a tração por compressão diametral



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Observa-se pela Figura 48, que nenhuma das misturas binárias e ternárias superaram a mistura de referência. O comportamento foi semelhante a compressão axial em ambas as idades.

Destaca-se as misturas ternárias 50FC10CCA10CHI e 50FC10CCA5GS aos 91 dias que obtiveram desempenho semelhante a 50FC, evidenciando o efeito pozolânico da CCA e potencializador das reações do CHI e GS.

Dal Molin (2005), relata que as adições minerais causam uma redução na porosidade da matriz e da zona de transição. Esse fato leva a uma melhora geral na resistência à compressão e à tração do concreto, mas, aparentemente, as magnitudes do aumento na resistência à tração se mantêm relativamente pequenas até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada, ou seja, a resistência à tração do concreto com uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local.

Procurou-se avaliar o desempenho de resistência a tração por compressão diametral entre as misturas nas diferentes idades. A Tabela 32 apresenta a variação de resistência a tração por compressão axial nas respectivas idades de ensaio.

Tabela 32 – Variação resistência a tração por compressão diametral

Misturas	28 dias (%)	91 dias (%)	28-91 (MPa)
REF	66,18	33,82	2,80
50FC	55,01	44,99	2,38
60FC	87,97	12,03	0,48
70FC5GS	57,04	42,96	1,16
50FC10CCA10CH I	70,51	29,49	1,51
50FC10CCA5GS	71,10	28,90	1,50

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Conforme a Tabela 32, pode-se dizer que a mistura 60FC apresentou desempenho superior de resistência a compressão diametral aos 28 dias em relação a mistura de controle entre as binárias e a 50FC10CC5GS das ternárias. Aos 91 dias nenhuma apresentou ganho de resistência superior à de controle.

Fazendo uma comparação entre compressão diametral e compressão axial é possível verificar a relação existente entre as duas resistências, Tabela 33.

Tabela 33 – Relação entre compressão diametral e axial

Misturas	28 dias	91 dias
REF	5%	7%
50FC	4%	6%
60FC	7%	7%
70FC5GS	8%	7%
50FC10CCA10CH I	7%	7%
50FC10CCA5GS	9%	7%

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

A resistência a tração é uma fração da resistência a compressão. A ABNT NBR 6118:2014, estima o valor de compressão diametral em função da compressão axial de acordo com a classe de resistência do concreto. Para concretos classe até C50, utiliza-se a equação 5 e para classe C55 até C90 a equação CC.

Equação 5 - Estimativa de compressão diametral C50

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

Equação 6 - Estimativa de compressão diametral C55 a C90

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,12 \cdot f_{ck})$$

Observa-se que pelas equações 5 e 6 da ABNT NBR 6118:2014, pode-se estimar os valores de compressão diametral de cada corpo de prova, a partir dos resultados de resistência a compressão axial como apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados de tração por compressão diametral obtidos conforme a (ABNT NBR 6118, 2014)

Mistura	Ensaiado		NBR 6118, 2014		(ensaiado/NBR6118,2014) * 100	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
REF	5,48	8,28	5,56	5,72	99%	145%
50FC	2,91	5,29	4,65	4,89	63%	108%
60FC	3,51	3,99	3,94	4,29	89%	93%
70FC5GS	1,54	2,70	2,18	3,30	71%	82%
50FC10CCA10CHI	3,61	5,12	4,08	4,66	89%	110%
50FC10CCA5GS	3,69	5,19	3,70	4,70	100%	110%

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Observa-se que os valores obtidos pela ABNT NBR 6118:2014, variam com grande significância quando comparados aos ensaiados superestimando alguns valores, assim como diferenças. Cabe ressaltar que, quando as normas apresentam correlações dessas propriedades mecânicas, se referem a concretos sem adições minerais, mesmo assim, pode-se afirmar que os resultados obtidos em ensaios laboratoriais e os da norma indicam uma previsão coerente.

Comportamento semelhante foi obtido por Meira, (2009), quando avaliou propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem.

4.2.2.1 Análise estatística tração por compressão diametral

As Tabelas 35 e 36 demonstram os resultados da análise estatística dos resultados das misturas em relação a tração por compressão diametral, nas idades de 28 e 91 dias respectivamente, assim como o teste Tukey das Tabelas 37 e 38.

Tabela 35 – ANOVA fator único tração por compressão diametral 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,41191	5	4,882382	35,66386	8,48E-07	3,105875
Dentro dos grupos	1,6428	12	0,1369			
Total	26,05471	17				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 36 – ANOVA fator único tração por compressão diametral 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	51,3238	5	10,26476	56,12225	6,61E-08	3,105875
Dentro dos grupos	2,1948	12	0,1829			
Total	53,5186	17				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 37 – Teste tukey tração por compressão diametral 28 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CHI	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	12,02		0,40	0,00	0,25	0,17
60FC	9,206	2,80		0,00	0,99	0,98
70FC5GS	18,43	6,41	9,22		0,00	0,00
50FC10CCA10CHI	8,707	3,30	0,49	9,72		0,99
50FC10CCA5GS	8,348	3,66	0,85	10,08	0,35	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 38 – Teste tukey tração por compressão diametral 91 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CHI	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	12,23		0,03	0,00	0,99	1,00
60FC	17,37	5,14		0,02	0,05	0,04
70FC5GS	22,57	10,34	5,19		0,00	0,00
50FC10CCA10CHI	12,77	0,54	4,60	9,80		0,99
50FC10CCA5GS	12,49	0,25	4,88	10,08	0,28	

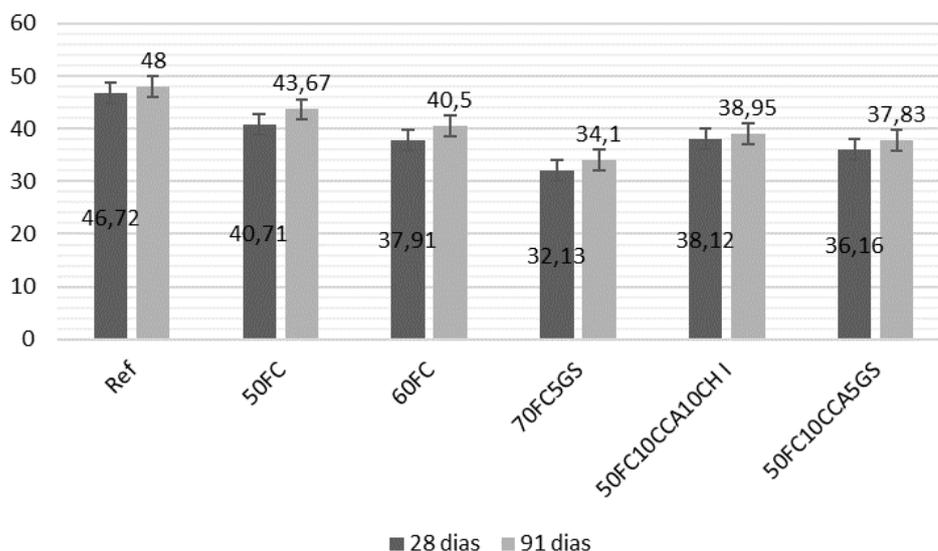
Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

No comportamento a tração por compressão diametral abordado no item 4.2.2, de igual modo a resistência a compressão axial todas as misturas com substituições apresentaram desempenho inferior a mistura de controle em ambas as idades de 28 dias e 91 dias e através da ANOVA (Tabelas 35 e 36) comprovou diferenças significativas entre os dados. Através do teste Tukey identifica-se aos 28 dias (Tabela 37) as misturas: 60FC, 50FC10CCA10CHI, 50FC10CCA5GS com 50FC; 50FC10CCA10CHI, 50FC10CCA5GS com 60FC; e 50FC10CC5GS com 50FC10CCA10CHI as misturas que não apresentaram diferenças significativas. Aos 91 dias (Tabela 38) as misturas que não apresentaram diferenças significativas destacam-se: 50FC10CCA10CHI com 50FC, 60FC e 50FC10CCA5GS e a 50FC10CCA5GC com 50FC e 50FC10CCA10CHI.

4.2.3 Módulo de elasticidade

A Figura 49 apresenta os resultados de módulo de elasticidade.

Figura 49 – Resultados de módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Analisando os resultados da Figura 49, com relação ao módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias, o comportamento apresentado foi semelhante as demais propriedades analisadas anteriormente. Nenhuma das misturas apresentou desempenho superior a mistura de referência em ambas as idades.

As misturas binárias 50FC e 60FC apresentaram desempenho superior as ternárias em ambas as idades.

Quando não é possível efetuar o ensaio de módulo de elasticidade, é possível, através dos resultados de resistência a compressão axial, estimar seus valores.

De acordo com a norma NBR 6118:2014, o valor do módulo de elasticidade do concreto de cimento sem adições, pode ser estimado em função da resistência média a compressão (f_{cj}), pela equação 5 para concretos com f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa e a equação 6 para f_{ck} 55MPa a 90 MPa:

Equação 7 - Estimativa módulo de elasticidade f_{ck} 20 MPa a 50 MPa. ABNT NBR 6118, 2014)

$$E_0 = 5.600 \cdot (F_{cj})^{1/2}$$

Equação 8 - Estimativa módulo de elasticidade f_{ck} 55 MPa a 90 MPa. (ABNT NBR 6118, 2014)

$$E_c = 21,5 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$$

Através das equações 7 e 8 é possível estimar os valores de módulo de elasticidade com os valores de resistência a compressão axial, e fazer a relação entre o valor ensaiado pela ABNT NBR 8522:2017, e o estimado pela ABNT NBR 6118:2014, conforme a Tabela 29.

Tabela 29 – Módulo de elasticidade E_c (GPa) ensaiado e através da (ABNT NBR 6118, 2014)

Misturas	NBR 8522, 2017		NBR 6118, 2014	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
REF	46,72	48,00	60,41	61,90
50FC	40,71	43,67	52,67	54,58
60FC	37,91	40,50	38,68	46,94
70FC5GS	32,13	34,10	24,81	33,82
50FC10CCA10CH I	38,12	38,95	48,30	52,68
50FC10CCA5GS	36,16	37,83	36,87	53,05

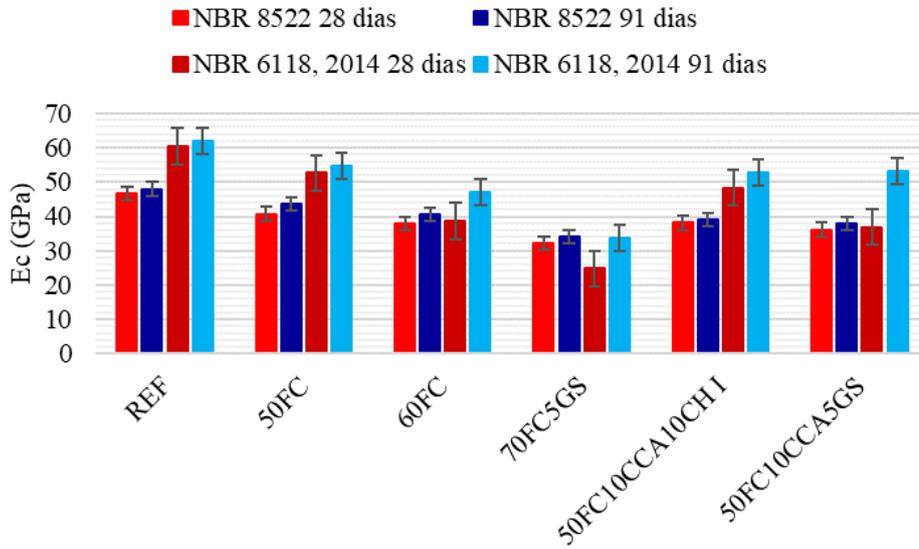
Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

De acordo com a Tabela 39, é possível observar que os valores estimados em algumas misturas estão próximos aos encontrados no ensaio laboratorial, porem em algumas misturas a diferença é considerável.

Girardi (2018), em estudo que avaliou a influência de diferentes parâmetros sobre o módulo de elasticidade, identificou que a estimativa do módulo pode ser feita pela equação teórica da ABNT NBR 6118:2014, porém não existe confiabilidade no modelo proposto, pois há superestimação dos valores, e em outros casos, subestimação. Isso ocorre pois o referido modelo tem como parâmetro de entrada somente a resistência à compressão do concreto.

Com os dados da Tabela 39 foi possível traçar o gráfico comparativo entre os métodos de obtenção do módulo de elasticidade da Figura 50.

Figura 50 – Comparativo E (GPa)

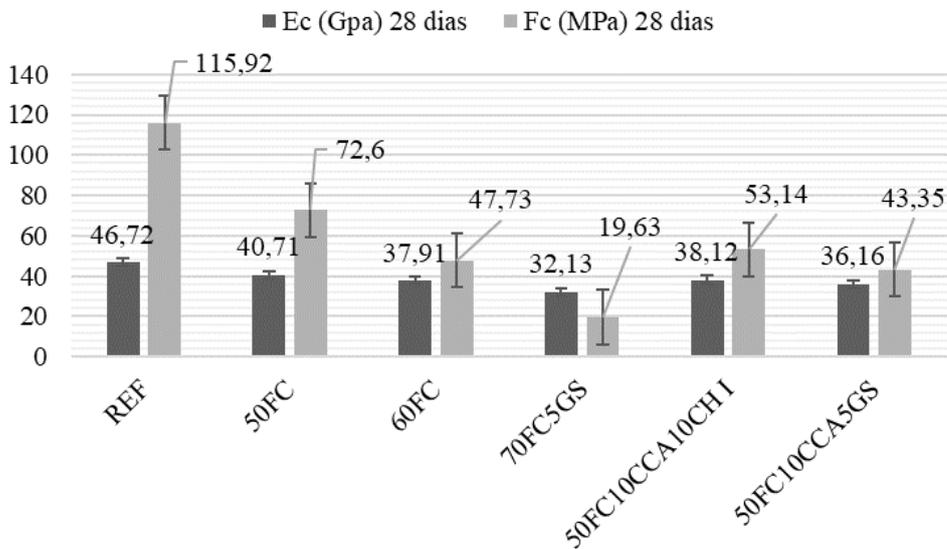


Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Analisando o gráfico da Figura 50, torna mais perceptível a variação nos dados calculados pela ABNT NBR 6118:2014 em relação aos dados obtidos através do ensaio laboratorial. As misturas que apresentaram maior diferença foi a 50FC das misturas binárias e a 50FC10CCA10CHI.

Relacionando-se o módulo de elasticidade com a resistência a compressão axial, obtém-se os gráficos das Figuras 51 e 52.

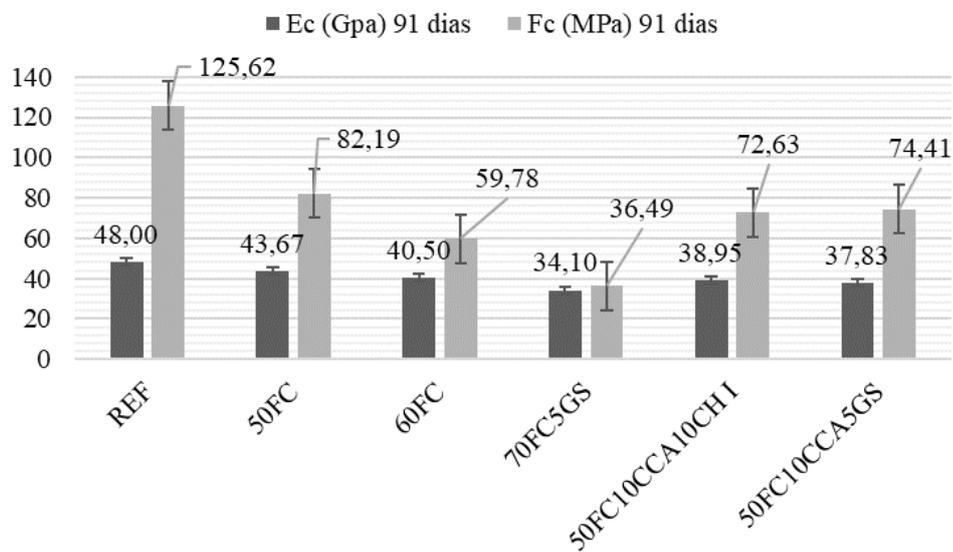
Figura 51 – Resistência por módulo de elasticidade aos 28 dias.



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Analisando o gráfico da Figura 51, pode-se observar que a relação do módulo de elasticidade em relação a resistência a compressão axial aos 28 dias, possui uma variação, pois todas as misturas apresentaram comportamento semelhante, exceto a 70FC5GS em que a resistência à compressão axial foi inferior ao módulo de elasticidade. Já aos 91 dias identifica-se uma uniformidade entre os dados como pode ser observado no gráfico da Figura 52.

Figura 52 – Resistência por módulo de elasticidade aos 91 dias



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

4.2.3.1 Análise estatística módulo de elasticidade.

As Tabelas 30 e 31 demonstram os resultados na análise das misturas em relação ao módulo de elasticidade nas idades de 28 e 91 dias respectivamente, assim como o teste Tukey das Tabelas 32 e 33.

Tabela 30 – ANOVA fator único módulo de elasticidade 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	235,6114	5	47,12229	62,06528	4,38E-05	4,387374
Dentro dos grupos	4,555425	6	0,759238			
Total	240,1669	11				

Fonte Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 31 – ANOVA fator único módulo de elasticidade 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	237,3018	5	47,46035	72,3996	2,79E-05	4,387374
Dentro dos grupos	3,9332	6	0,655533			
Total	241,235	11				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 32 – Teste tukey módulo de elasticidade 28 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CH I	50FC10CCA5GS
REF		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	10,48		0,08	0,00	0,47	0,02
60FC	15,49	5,01		0,00	0,61	0,84
70FC5GS	23,55	13,07	8,05		0,00	0,02
50FC10CCA10CH I	13,18	2,70	2,30	10,36		0,18
50FC10CCA5GS	17,11	6,63	1,61	6,43	3,92	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 33 – Teste tukey módulo de elasticidade 91 dias

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CH I	50FC10CCA5GS
REF		0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
50FC	7,659		0,0	0,00	0,00	0,00
60FC	13,37	5,71		0,00	0,48	0,08
70FC5GS	24,28	16,62	10,91		0,00	0,03
50FC10CCA10CH I	16,03	8,36	2,65	8,253		0,61
50FC10CCA5GS	18,33	10,67	4,96	5,948	2,30	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

4.2.4 Retração por secagem

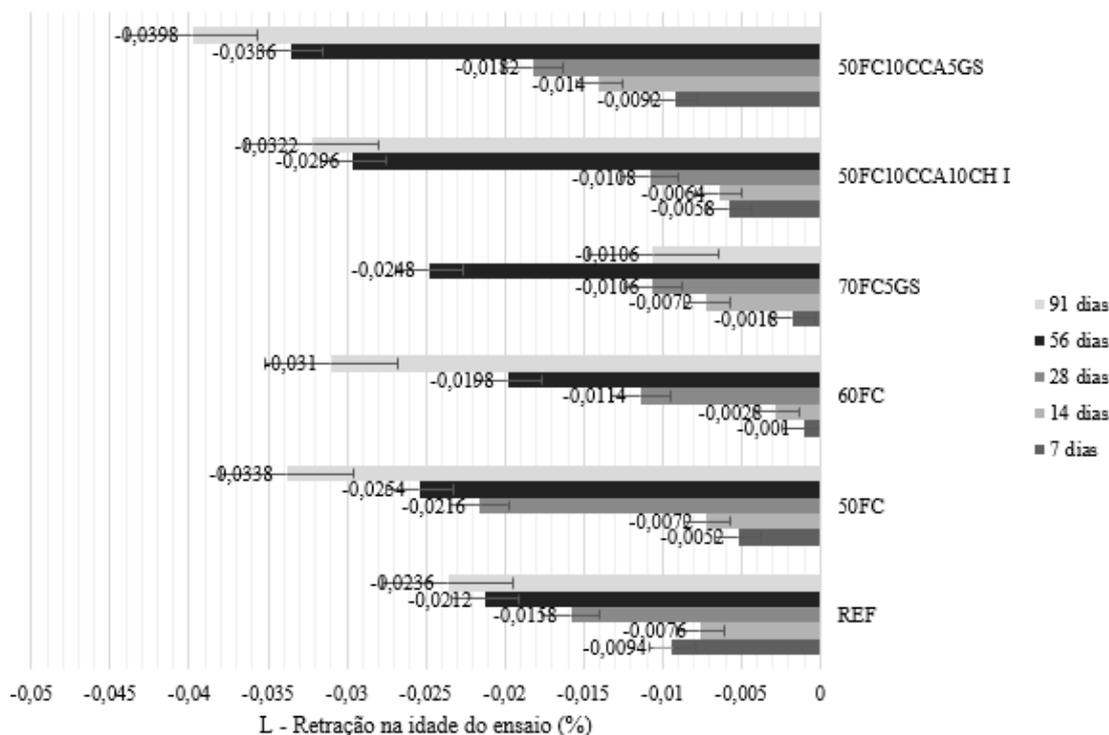
Os valores de retração, realizados de acordo com a ASTM C490/2014, estão apresentados na Tabela 44 e dispostos no gráfico da Figura 53.

Tabela 44 – Valores de retração em porcentagem

Misturas	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
REF	0,0094	0,0076	0,0158	0,0212
50FC	0,0052	0,0072	0,0216	0,0254
60FC	0,001	0,0028	0,0114	0,0198
70FC5GS	0,0018	0,0072	0,0106	0,0248
50FC10CCA10CH I	0,0058	0,0064	0,0108	0,0296
50FC10CCA5GS	0,0092	0,014	0,0182	0,0336

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Figura 53 – Retrações (%)



Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

As misturas onde havia adições minerais apresentaram valores menores de retração com o uso do fíler calcário e da cinza de casca de arroz quando comparado ao referênci de maneira geral, esse fato se deve ao aumento no volume dos poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, aumentando o refinamento e contribuindo para uma menor permeabilidade como já foi abordado por (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Analisando o gráfico da Figura 50 para as misturas binárias identifica-se que a mistura 60FC apresentou retração superior a mistura de referênci e as menores retrações obtidas nas misturas em estudo, destaca-se as misturas ternárias 50FC10CCA10CH I e 50FC10CCA5GS.

Há poucos estudos na bibliografia onde o estudo da retração em concretos com altos teores de substituição do cimento por fíler calcário seja investigado. Valcuende et al., (2012) pesquisou o efeito do fíler calcário na retração do concreto com relação ao tempo e identificou que o FC acelera as reações de hidratação e fornece uma estrutura porosa mais refinada.

Rezvani e Proske (2017), investigaram o comportamento de misturas desenvolvidas com cimento rico em teores de calcário de até 70% em massa comparados com uma mistura de controle e identificaram que a retração é fortemente dependente da quantidade e das propriedades químico-mineralógicas do material, a retração das misturas com teores mais altos de calcários apresentaram retração inferior o semelhante a mistura de controle.

4.2.4.1 Análise estatística retração por secagem

A Tabela 34 demonstra o resultado da análise estatística das misturas em relação a retração por secagem, assim como o teste Tukey na Tabela 35.

Tabela 34 – ANOVA fator único retração por secagem

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00013031	5	2,61E-05	13,86241135	0,00302578	4,387374
Dentro dos grupos	1,128E-05	6	1,88E-06			
Total	0,00014159	11				

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Tabela 35 – Teste Tukey retração por secagem

	REF	50FC	60FC	70FC5GS	50FC10CCA10CHI	50FC10CCA5GS
REF		0,04	0,00	0,01	0,22	1,00
50FC	5,77		0,41	0,69	0,69	0,05
60FC	8,66	2,88		0,98	0,08	0,00
70FC5GS	7,83	2,06	0,82		0,16	0,01
50FC10CCA10CHI	3,71	2,06	4,91	4,12		0,26
50FC10CCA5GS	0,20	5,57	8,48	7,63	3,50	

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

Em relação a retração por secagem também houve diferenças significativas confirmadas através da ANOVA (Tabela 45). Sobressai-se as misturas 60FC com 50FC, 70FC com 50FC e 60FC, 50FC10CCA10CHI com REF, 50FC, 60FC e 70FC5GS assim como 50FC10CCA5GS com REF, 50 FC e 50FC10CCA10CHI conforme o teste Tukey (Tabela 35).

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi verificar o comportamento mecânico de concretos quanto a compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração por secagem de misturas granulometricamente otimizadas, binárias de fíler calcário e ternárias de fíler calcário e cinza de casca de arroz, quando substituído o cimento em altos teores de até 70% comparadas as resistências características usuais (C20 a C50). Do estudo conclui-se:

1 – Assim como foi observado nos ensaios de resistência a compressão axial os teores de substituição do cimento, tanto nas misturas binárias como nas ternárias apresentou desempenho inferior a mistura de referência. Objetivava-se desenvolver misturas com resistências semelhantes aos F_{cks} usuais para concretos estruturais. Assim, exceto a mistura 70FC5GS, não pode ser considerada na classe dos concretos estruturais. Se forem consideradas idades de cura superiores a 28 dias, conclui-se que as quatro misturas estudadas atendem as classes de resistência da ABNT NBR 8953:2015, apresentaram desempenho satisfatório aos 28 dias para concretos convencionais e também de alto desempenho, ou seja, fck de até 65 MPa para 50FC e 40 MPa para as demais misturas, exceto a 70FC5GS a 28 dias.

2 – Identificou-se quando analisados os dados obtidos para a tração por compressão diametral aos 28 dias e 91 dias que o comportamento foi semelhante a compressão axial no desenvolvimento de resistência conforme a idade, nenhuma das misturas superou a mistura de controle. Verificou-se também através das equações para estimar a tração de acordo com ABNT NBR 6118:2014 uma variação significativa entre os dados estimados e os obtidos através de ensaios laboratoriais de acordo com a ABNT NBR 7222:2014.

3 – Verificou-se que o módulo de elasticidade nas idades estudadas seguiu uma tendência assim como a resistência a compressão axial, exceto para a mistura 70FC5GS que o comportamento foi diferente das demais. Constatou-se também significativa variação entre os dados estimados pela ABNT NBR 6118:2014 e os obtidos através dos ensaios laboratoriais regidos pela ABNT NBR 8522:2017.

4 – Observou-se nos resultados de retração por secagem que quanto maior o teor de substituição, menor a retração quando comparados com a mistura de controle. Tal comportamento ocorre devido ao aumento no volume dos poros de gel e diminuição dos poros capilares, aumentando o refinamento dos poros conforme descrito por (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

5 – Através da ferramenta ANOVA foi possível identificar se havia ou não significância nos conjuntos de dados obtidos e o teste Tukey qual misturas apresentaram significância. Assim pode-se induzir que as misturas binárias 50FC e 60FC apresentaram bom desempenho frente aos objetivos específicos pré-estabelecidos assim como as ternárias 50FC10CCA10CHI e 50FC10CCA5GS, considerando a resistência característica de 40MPa, por exemplo.

6 – Com a presente pesquisa foi possível analisar que para as características estudadas utilizou-se de FC em altos teores em misturas binárias é viável nas misturas 50FC e 60FC (mais do que o dobro recomendado pela ABNT NBR 16697:2018, assim como para as ternárias de fíler calcário com cinza de casca de arroz, desde que haja CCA disponível. Supõe-se colaborar para a redução nos impactos ambientais causados pelo clínquer, composto principal da fabricação do cimento.

5.1 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros sugere-se o estudo microestrutural de concretos com até 70% de substituição de cimento por fíler calcário e cinza de casca de arroz, bem como as propriedades de durabilidades necessitam ser investigadas. Outro fator importante a ser evidenciado é o estudo do ciclo de vida das estruturas com as misturas abordadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001^a.
- _____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- _____. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de Abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001b.
- _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001c.
- _____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- _____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- _____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003a.
- _____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014a.
- _____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014b.
- _____. **NBR 6502:** Solos e Rochas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.
- _____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- _____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- _____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- _____. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008a.
- _____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- _____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 nm (nº 200)**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013a.

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1992.

_____. **NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 16606: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 16607: Cimento portland - Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 16697: Cimento portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

ADU-AMANKWAH, S. et al. Effect of sulfate additions on hydration and performance of ternary slag-limestone composite cements. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 451–462, 2018.

ALONSO, S.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio. **Materials Letters**, v. 47, n. 1–2, p. 55–62, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157/C157M: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete**, 2014. 7p.

_____. **ASTM C490/C490M: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete**, 2011. 5p.

AGOPYAN V. Construção civil consome até 75% da matéria-prima do planeta. Globo Ciência. Disponível em <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>. Acesso em 05.nov. 2018.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo Blucher, 2011 (Série Sustentabilidade, 5).

ANDERSON, S.; NEWELL, R. Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies. **Annu. Rev. Environ. Resour.**, n. 29, p. 109-142, 2004.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1579-1589, 2012.

BATAGGIN, A. F.; SILVA, M. G. Por que os cimentos com adições vieram pra ficar? **Concreto & Construções**, p. 33–39, 2019.

BATAGGIN, A. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. p. 761-792.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 185-232, 2011.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 2, p. 1583-1622, 2017.

CEPEA. **Arroz/CEPEA**: colheita deve pressionar valor no 1º semestre, mas estoque pode sustentar no 2º. Disponível em: www.cepea.esalq.usp.br/arroz/. Acesso em: 26 dez. 2017.

COPETTI, M. M. **Estudo de viabilidade de concreto estrutural com areia de descarte de fundição e adições minerais: propriedades mecânicas e análise de ciclo de vida**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2019.

CORNERSTONE. **The rise and potential peak of cement demand in the urbanized world**. Disponível em: <http://cornerstonemag.net/the-rise-and-potential-peak-of-cement-demand-in-the-urbanized-world/>. Acesso em: 10 abr. 2018.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. D. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, p. 983-92, 2009.

CINCOTTO et al, Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. p. 719.

DAL MOLIN, D. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. In: [s.l.] Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON., 2005. p. 345–378.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes**: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.

DE NAZARÉ, L. et al. **Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld Analysis of potential pozzolanic ash from rice husk (CCA) using the technique of Rietveld refinement**. p. 150-158, 2014.

DNPM. **Sumário Mineral-2015**. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 23 de dez. 2018.

DUART, M. A. Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual e sem beneficiamento. 2008. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/gepecon/diss/6a44cd5439d376019e026fc4611b71e6.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2018.

EMMA. **Elkem Materials Mixture analyser**. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2015/07/empacotamento-com-software-da-elkem-emma.html>. Acesso em: 05 nov. 2018.

ERYANTO, T.; AMRINA, E. Determination of optimal clinker factor in cement production by chemical grinding aids addition. **Applied Mechanics and Materials**, v. 776, p. 223-228, 2015.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/economic/ess/ess-home/en/>. Acesso em: 21 out. 2017.

FELTRIN, C. S. et al. Empacotamento de partículas com fíler calcário em concretos: um estudo das propriedades e sustentabilidade. **Anais... CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 58., 2016, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: IBRACON, 2016.

FENNIS, A. A. A. M.; WALRAVEN, J. C. **Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design**. *Heron*, v. 57, n. 2, p. 73-101, 2012.

FERREIRO, S.; HERFORT, D.; DAMTOFT, J. S. Effect of raw clay type, fineness, water-to-cement ratio and fly ash addition on workability and strength performance of calcined clay – Limestone Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 101, n. August, p. 1–12, 2017.

FUNK, J.; DINGER, D. **Particle packing, part III: discrete versus continuous particles sizes**. *Interceram*, n. 41, p. 332-334, 1992.

GIRARDI, R. **Avaliação da influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto de cimento portland**. 2018, Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2018.

GITHACHURI, K.; ALEXANDER, M. G. Durability performance potential and strength of blended Portland limestone cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 115-121, 2013.

GUERRA, R. S. **Clube do Concreto**. Empacotamento (8) software Elkem. 2014. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2014/01/empacotamento-8-software-elkem.html>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

HAGEMANN, S. E. **Aglomerantes a base de cimento, cinza de lodo de eta e calcário: influência na hidratação, resistência à compressão e estrutura de poros**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2018.

HELENE, P. R.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1992.

HOENIG, V.; HOPPE, H.; EMBERGER, B. Carbon Capture Technology – Options and Potentials for the Cement Industry. PCA R&D Serial no. 3022 (Technical Report). **European Cement Research Academy**, Germany, 2007. 98p.

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

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safras>. Acesso em: 22 dez. 2017.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão da Armadura.** 1995. Tese (Doutorado)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

ISAIA, G. C. et al. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural.** Parte I: propriedades mecânicas e durabilidade. *Ambiente Construído*, v. 10, p. 121-137, jan./mar. 2010.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 69-76, 2003.

ISMAIL, M. S.; WALIUDDIN, A. Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Materials**, n. 10, p. 521-6, 1996.

JOHN, M. V. et al. Fillers in cementitious materials – experience, recent advances and future potential. **Cement Concrete Research**, 2018.

JOHN, V. M. Personalidade Entrevistada. **Revista Concreto & Construções**, p. 16-25, 2019.

JUNG, S. H. et al. Microstructure Characteristics of Fly Ash Concrete with Rice Husk Ash and Lime Stone Powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

JÚNIOR, L. A. M. **Carbonatação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2010.

KJELLSSEN, K. O.; GUIMARAES, M.; NILSON, A. (Nordic Innovation Center), **The CO2 balance of concrete in a life cycle perspective.** Norway, 2005. (ISBN 87-7756-758-7)

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 64-72, 2019.

KUMAR, A. et al. Simple methods to estimate the influence of limestone fillers on reaction and property evolution in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 20-29, 2013.

LIMA, C. J. F. **Sustentabilidade de concretos com misturas binárias de pozolanas e resíduos de demolição de concreto com ênfase na avaliação e custo do ciclo de vida.** 2018. 219 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2018. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.xhtml?popup=true&id_trabalho=6428297. Acesso em: 12 nov. 2018.

LOLLIINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 46, p. 32-40, 2014.

- LOTHENBACH, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, p. 848-60, 2008.
- MANGULKAR, M.; JAMKAR, S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 4 (Issue 5), p. 143-8, 2013.
- MATOS, L. W. de. Análise Dos Métodos De Redução De Emissão De Co2 Em Uma Indústria De Cimento. **Anais... CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO**, Rio de Janeiro, 2015.
- MATSCHEI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. The role of calcium carbonate in cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 551-558, 2007.
- MAZZA, R. **Cabonatação acelerada de concretos com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2015. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7875/MAZZA%2c%20ROGER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12. nov. 2018
- MCCARTER, W. J.; TRAN, D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 3, p. 179–184, 1996.
- McGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, p. 513-522, 1961.
- MEHTA, P. K. Rice Hush Ash-A unique supplementary cementing material. **Advances in concrete technology**, 1992.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.
- MEIRA, L. R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. 2009. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7726/MEIRA%2c%20LETICIA%20RIBEIRO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12. nov. 2018.
- MOLIN, D. D. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. In: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005. p. 345-378.
- NANTHAGOPALAN, P.; DESAI, D. Potential use of industrial by-products for developing high strength concrete undernormal curing conditions. **CIEC**, p. 215-223, 2013.
- NASCIMENTO, J. E. F. et al. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 85-91, 2019.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Bookman, São Paulo, 2016.
- OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte Editorial, 2000, 224p.

ONU. United Nations. **World population prospects, 2017 revision. Key findings and advance tables.** Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

ONU. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.** Disponível em: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Acesso em: 22. dez. 2017.

PALM, S. et al. Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 308-318, 2016.

PALOMO, A. et al. A review on alkaline activation: new analytical perspectives ; Activación alcalina: Revisión y nuevas perspectivas de análisis. **Materiales de construcción**, v. 64, n. 315, p. 22, 2014.

PALOU, M. et al. The effect of metakaolin upon the formation of ettringite in metakaolin–lime–gypsum ternary systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, n. 1, p. 77-86, 2017.

PENNA, P. C. **Cimento menos cinza, mais verde.** Saneamento Ambiental, 2019.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento de cinza de casca de arroz residual com vista a produção de cimento composto ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, RS, 2006.

RAMEZANIANPOUR, A. M.; HOOTON, R. D. A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 1-13, ago. 2014

REGO, J. H. S. **As Cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – Aspectos da microestrutura das pastas.** 2004. 274 p. Tese. (Doutorado)–PECC-UnB, Brasília, 2004.

RÊGO, J. H. S. et al. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 56-68, 2015.

REZVANI, M.; PROSKE, T. Influence of chemical-mineralogical properties of limestone on the shrinkage behaviour of cement paste and concrete made of limestone-rich cements. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 818-828, 2017.

ROADMAP. **ROADMAP Tecnológico.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. **Capítulo 16 - Calcário e Dolomito.** Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/agrominerais/teste/livros/16-agromineraiscalcario-dolomito.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2017.

SANTOS, C. C. **Concretos com misturas de agregados residual de construção e demolição (RCD) e pozolanas, com ênfase na carbonatação.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2017. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=5249362. Acesso em: 12. nov.2018.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. March, p. 2–26, 2018.

SENSALE, G. R. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 718-725, 2010.

SEVERO, C. G. S. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 82, p. 55–67, 2013.

SILVA, P. R.; BRITO, J. Durability performance of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Materials and Structures**, v. 49, p. 2749-2766, 2016.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção de cimento por regiões e estados**, 2016. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1513362481.pdf>. Acesso em: 31. dez. 2017.

SOKOLOVICZ, B. C. **Microestrutura e durabilidade a cloretos de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem prévia**. 2013. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7811/SOKOLOVICZ%2c%20BORIS%20CASANOVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12. nov. 2018.

SOROKA, I.; SETTER, N. The effect of fillers on strength of cement mortars, **Cement and Concrete Research**, v. 7, n. 4, p. 449-456, 1977.

SUA-IAM, G.; SOKRAI, P.; MAKUL, N. Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1028-1034, 2016.

SUN, H. et al. Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. **Cement Concr Comp.**, v. 44, p. 41-49, 2013.

TRINDADE, F. M. O. **Propriedades mecânicas de concretos com diferentes cimentos portland e com cinza de casca de arroz natural e moída**. 2012. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7789/TRINDADE%2c%20FABIO%20MACIEL%20DE%20LIVEIRA%20DA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12. nov. 2018.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos**. 2011. 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7764/TRINDADE%2c%20GUILHERME%20HOEHR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12. nov. 2018.

TSIVILIS, S. et al. An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. **Cem. Concr. Comp.**, v. 24, n. 3-4, p. 371-378, 2002.

UNEP. **Sustainable Buildings and Climate Initiative: Why buildings?** Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp>>. Acesso em: 25 set. 2017.

USGS. Mineral Commodity Summaries 2017. **World lime and limestone production**, p. 98-99. Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>. Acesso em: 18. dez. 2017.

VALCUENDE, M. et al. Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 4, p. 583-592, 2012.

VARES, S.; HAKKINEN, T. Environmental burdens of concrete and concrete products. **Nordic concrete Research publication**, v. 21, n. 1, p. 98, jun. 1998. Disponível em: www.itn.is/ncr/publications/dos-21-10.pdf. Acesso em: 15 mai.2008.

VISEDO, G.; PECHIO, M.; BATTAGIN, A. Bases para o lançamento do Mapeamento Tecnológico do Cimento - Brasil 2050. **Concreto & Construções**, p. 26-32, 2019.

WBCSD. World Business Council For Sustainable Development. **The Cement Sustainability Initiative (CSI)**, 2007. 8 p. (CSI Report). Disponível em: <http://wbcSD.org>. Acesso em: 14 nov. 2018.

WORLDTLAS. **What is limestone**. Disponível em: <https://www.worldatlas.com/articles/limestone-facts-geology-of-the-world.html>. Acesso em: 18 dez. 2017.

WORLDOMETERS. **WORLDOMETERS**. Disponível em: <<https://www.worldometers.info/co2-emissions/>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

ZAJAC, M. et al. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 99-108, 2014.

ZAREEI, S. A. et al. Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. **Cases studies in construction materials**, 2017.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. **Cement and Concrete Composites**, n. 65, p. 19-28, 2016.