



Universidade Federal do Pampa
CAMPUS TECNOLÓGICO DE ALEGRETE
ENGENHARIA CIVIL

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso

Caracterização de Argamassas à Base de Cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz Oriunda da Queima com e sem Controle de Temperatura

DÉBORA PEDROSO RIGHI

debora_righi@hotmail.com

Profa Dra Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri
Orientadora

Profa Dra Larissa Degliuomini Kirchhof
Co-orientadora

Alegrete 2012.

DÉBORA PEDROSO RIGHI

**Caracterização de Argamassas à Base de Cimento Portland e
Cinza de Casca de Arroz Oriunda da Queima com e sem
Controle de Temperatura**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte das atividades para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil na
Universidade Federal do Pampa.

Profa Dra Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri
Orientadora

Profa Dra Larissa Degliuomini Kirchhof
Co-orientadora

Alegrete

2012

DÉBORA PEDROSO RIGHI

Caracterização de Argamassas à Base de Cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz Oriunda da Queima com e sem Controle de Temperatura

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pampa.

Trabalho apresentado e aprovado em: 19 de outubro de 2012.

Banca examinadora:

Profa. Dra Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri
Orientadora - Engenharia Civil – UNIPAMPA

Profa. Dra Larissa Degliuomini Kirchof
Co-orientadora - Engenharia Civil – UFSM

Profa. Dra Monica Garcez
Engenharia Civil – UFPel

Prof. Dr. Gihad Mohamad
Engenharia Civil – UFSM

Prof. Dr. Ederli Marangon
Engenharia Civil – UNIPAMPA

*Dedico esse trabalho a minha mãe Zeneida
Perroni pelo amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por nascer em uma boa família, acompanhado sempre de bons amigos e pelas ótimas oportunidades que Ele me proporcionou para um crescimento maior.

Agradeço aos meus pais, João Antônio Righi e Zeneida Perroni Pedroso, e ao meu segundo pai Samuel Neves dos Santos por todos esses anos de dedicação, incentivo e apoio aos meus planos e sonhos.

Agradeço a minha Orientadora Professora Elizabete Yukiko Nakanishi por todo o apoio que deu na realização desse trabalho e pela amizade que conquistamos durante esse período de aprendizado.

Agradeço a minha Co-Orientadora Larissa Degliuomini Kirchhof (UFSM) também pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho, da dedicação para a realização de vários ensaios e também pela amizade que construímos juntas.

Agradeço a Professora Mônica Garcez (UFPel) pelo total apoio nos ensaios de caracterização de vários materiais.

Agradeço ao Professor Luiz Carlos da Silva Pinto Filho (UFRGS) pelas orientações externas na realização desse trabalho, pelo carinho que sempre me demonstrou e pelos incentivos morais que sempre fez.

Agradeço ao Professor Ederli Marangon (Unipampa) pela ajuda no Laboratório de Engenharia Civil para a realização de alguns ensaios, o que veio a contribuir muito com este trabalho.

Agradeço ao Professor Fladimir Fernandes dos Santos (Unipampa) pelas valiosas correções gramaticais e pelas sugestões para o melhoramento desse trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Civil Marcelo Dias pela ajuda em todos os ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Unipampa.

Agradeço aos meus amigos e companheiros, Andréa Perobelli, Eduardo Pachla, Paulo Rogério, Pedro Jucá, Raphael Martins, Thiago Victor e Vinicius Bordoli pela ajuda nas atividades deste trabalho e pela paciência e incentivo quando, muitas vezes, o andamento deste não saía como planejado.

Agradeço em especial ao Lucas Köhler pela convivência, paciência e principalmente pelo incentivo durante toda a graduação, pois tivemos a oportunidade de juntos vivenciarmos grandes realizações e que ao vencermos tantas dificuldades nos tornamos muito mais que grandes amigos.

Agradeço a equipe do LEME (UFRGS) pela disponibilidade de tempo, acesso na utilização dos equipamentos para a realização de alguns ensaios e principalmente pelo carinho que sempre foi concebido a mim.

Agradeço a Empresa PILLECO NOBRE (Alegrete/RS) pela doação da cinza da casca de arroz, bem como de materiais e alguns equipamentos para a melhoria deste trabalho.

Agradeço a Empresa CAAL (Alegrete/RS) pela disponibilidade da cinza da casca de arroz.

Agradeço a todos os demais amigos e familiares, que de alguma forma colaboraram para a minha formação e crescimento pessoal.

Muito Obrigada!

*"Nem tão longe que eu não possa ver.
Nem tão perto que eu possa tocar.
Nem tão longe que eu não possa crer
que um dia chego lá.
Nem tão perto que eu possa acreditar
que o dia já chegou."*

(Engenheiros do Hawaii)

RESUMO

A utilização de resíduos, como materiais alternativos, tem se mostrado satisfatória de acordo com algumas pesquisas realizadas. A cinza da casca do arroz (CCA) é um resíduo vegetal que causa impacto ambiental, sendo considerado um material que apresenta grande potencial para ser utilizado no setor da construção civil, na produção de argamassas e concretos, por apresentar elevado teor de sílica (SiO_2) amorfa, podendo ser empregada como pozolana.

O município de Alegrete/RS tem como principal atividade econômica o plantio de arroz, que acaba por gerar grandes quantidades de volumes de resíduos da cinza da casca de arroz, oriundo, do próprio processo de beneficiamento. A fim de contribuir para a diminuição do depósito desse resíduo no meio ambiente, este trabalho verificou a viabilidade da incorporação da Cinza da Casca de Arroz (CCA) como substituta parcial do cimento, na produção de argamassas. Foram utilizadas CCA com controle de queima, produzidas em escala industrial por uma empresa instalada na cidade, e residual, oriunda de uma beneficiadora de arroz da cidade, sem qualquer controle de queima. A caracterização da CCA foi realizada por meio de ensaio de perda ao fogo, granulometria a laser, difração de raio X, espectrometria por fluorescência de raio X, massa específica e índice de atividade pozolânica para a verificação de materiais pozolânicos segundo a NBR 12653/1992. Para análise das argamassas no estado fresco foi utilizado o ensaio de índice de consistência e no estado térmico foi construída curva de liberação de calor de hidratação. Já para o estado endurecido das argamassas foram realizados os ensaios de resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção, índice de vazios e microscopia eletrônica de varredura. Para a confecção dos corpos de prova, adotou-se o traço 1:3 como referência, relação água/aglomerante de 0,51, com substituição parcial do cimento de 10%, 15% e 20% por 2 tipos CCA e 1 tipo de sílica ativa. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios quanto ao desempenho mecânico das argamassas, concluindo-se que a utilização da CCA para esta aplicação é viável tecnicamente, contribuindo, também, no sentido de dar uma destinação final ao resíduo menos agressiva ao meio ambiente.

Palavras-Chave: Cinza de casca de arroz, argamassas, resíduo.

ABSTRACT

Using the wastes as alternative materials has proved satisfactory according to some surveys. The Rice Husk Ash (RHA) is a plant residue that causes environmental impact, being a material that has great potential to be used in the construction industry in the production of mortar and concrete by presenting high content of silica (SiO_2) amorphous that can be used as pozzolan. The municipality of Alegrete/RS has as main economic activity the rice planting, which generates large amounts of waste volumes from rice husk ash, coming to own beneficiation process. In order to contribute for reducing this waste in the environment, this paper seeks to verify the feasibility of incorporating the Rice Husk Ash (RHA) as a partial replacement of cement in mortar production. RHA was used with controlled burning, industrially produced by a company based in town, and residual, coming from a rice processing company in town, without any burn controls. The characterization of the RHA was performed by testing loss on ignition test, laser granulometric analysis, X-ray diffraction analysis, X-ray fluorescence spectrometry, density and pozzolanic activity index, according to NBR 12653/1992. To analyze the mortars in the fresh state, it were used consistency index and heat release curve of hydration tests. For the hardened state of mortars were performed tests like compressive strength, mercury intrusion porosimetry, absorption, voids and scanning electron microscopy. To prepare the samples, the ratio of 1:3 was adopted as a reference; the water / binder of 0.51 by replacing cement in proportions of 10%, 15% and 20% for 2 types of RHA and 1 type of silica. The results obtained were satisfactory in the mechanical performance of mortars, concluding that the use of RHA for this application is technically feasible, also contributing to provide a less aggressive final destination to the waste in the environment.

Keywords: Rice Husk Ash, mortar, wastes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da Pesquisa	19
Figura 2 - Cinza de Casca de Arroz (CCA) após moagem.....	28
Figura 3 - Resultado do ensaio de Difração de Raio-x CCA cristalina	29
Figura 4 - Resultado do ensaio de Difração de Raio-x CCA amorfa.	29
Figura 5 – Esquema do Programa Experimental.	33
Figura 6 - Cinza de Casca de Arroz com Queima Controlada.....	37
Figura 7 - Cinza de Casca de Arroz obtida do processo de queima sem controle.....	37
Figura 8 - Equipamento de Abrasão Los Angeles	38
Figura 9 - Amostras das Cinzas de Casca de Arroz.....	40
Figura 10 - Ensaio de Consistência de Argamassa.....	41
Figura 11 – Cinza de Casca de Arroz no frasco de Le Chatelier	42
Figura 12 - Argamassa com 10% CCQ depois da retirada do molde tronco-cônico.....	44
Figura 13 – Execução do Ensaio de Avaliação da Curva de Calor de Hidratação.....	45
Figura 14 - Corpos de Prova Cilíndricos Moldados.	47
Figura 15 – Moldagem dos Corpos de Prova Prismáticos	48
Figura 16 – Ensaio de Resistência das Argamassas	50
Figura 17 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	51
Figura 18 - Amostras dispostas sobre o adesivo para serem analisadas.....	52
Figura 19 - Amostras imersas em éter.....	52
Figura 20 - Ensaio de absorção por imersão	54
Figura 21 - Etringita nas pastas de cimento com 10% SA com três dias de cura	72
Figura 22 - Traço Referência - Amostra com ampliação de 1,000x.....	72
Figura 23 - Traço 10% CCQ - Ampliação de 1,000x	73
Figura 24 – Traço 15% CCQ - Amostra com ampliação de 1,000x	74
Figura 25 – Traço 20% CCQ – Ampliação de 1,000x.....	74
Figura 26 – Traço 10% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x.....	75
Figura 27 – Traço 15% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x.....	76
Figura 28 – Traço 20% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x.....	76
Figura 29 – Traço 10% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x.....	77
Figura 30 – Traço 15% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x.....	78
Figura 31 – Traço 20% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x.....	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Calor de Hidratação da pasta de cimento de referência (0%) em relação as pastas com adição de 5%; 15% e 25% de aciaria elétrica ao longo do tempo (horas).....	46
Gráfico 2 - Difratoograma da CCA com controle de queima.....	55
Gráfico 3 - Difratoograma da CCA sem controle de queima.....	56
Gráfico 4 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA com controle de temperatura na queima.....	59
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA sem Controle de Queima.....	60
Gráfico 6 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA.....	60
Gráfico 7 - Curvas de Calor de Hidratação nas porcentagens de 10%	62
Gráfico 8 - Curva de Liberação de Calor nas porcentagens de 15%	63
Gráfico 9 - Avaliação da Curva de Liberação de Calor na porcentagem de 20%.....	64
Gráfico 10 – Resistência à Compressão Simples.....	66
Gráfico 11 - Resistência à Compressão Simples- Porcentagens	68
Gráfico 12 - Resistência à Tração na Flexão.....	69
Gráfico 13 - Gráficos de Resistência à Compressão – CPs Prismáticos.....	71
Gráfico 14 - Gráficos de Resistência à Compressão – CPs Cilíndricos.....	71
Gráfico 15 - Volume de intrusão de Mercúrio em função da distribuição de tamanho de poros.....	79
Gráfico 16 - Absorção de água após imersão e após imersão e fervura.....	80
Gráfico 17 - Índice de Vazios após imersão e após imersão e fervura.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências Químicas da NBR 12653/1992.....	23
Tabela 2 - Composição do Cimento CP V	34
Tabela 3 - Composição Granulométrica da Areia e Massa Específica.....	35
Tabela 4 - Características da Sílica Ativa	36
Tabela 5 -Traços das argamassas.....	43
Tabela 6 - Programa experimental para realização do ensaio para determinação da Resistência à compressão simples	47
Tabela 7 - Programa experimental para realização do ensaio para determinação da Resistência à tração na Flexão e à Compressão.....	49
Tabela 8 - Condições de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	53
Tabela 9 - Espectrometria de Raio X da CCA (com e sem controle).....	57
Tabela 10 - Perda ao Fogo da CCA (com e sem controle de queima)	57
Tabela 11 - Índice de atividade pozolânica da CCA (com e sem controle).....	58
Tabela 12 - Massa específica da CCA (com e sem controle)	59
Tabela 13 - Relação água /aglomerante e Índice de Consistência	61

LISTA DE ABREVIATURAS

A-C-H - Aluminatos de Cálcio Hidratados

CA(OH)₂ - Hidróxido de cálcio

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CME - Centro de Microscopia Eletrônica

CP V-ARI – Cimento Portland V – Ari, alta resistência inicial

C-S-H - Silicatos de Cálcio Hidratados

DRX - Difração de Raios-x

EDX - Espectrometria de Raio x

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

LACER - Laboratório de Materiais Cerâmicos

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

S-A-C-H - Silicoaluminatos de Cálcio Hidratados

SiO₂ - Dióxido de silício

UFRGS – Universidade Federal do Pampa

UFPEL – Universidade Federal de Pelotas

USP – Universidade de São Paulo

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 DELINEAMENTO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	21
2.2 DEFINIÇÃO DAS POZOLANAS.....	22
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS	22
2.4 CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DAS POZOLANAS EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND.....	23
2.5 SÍLICA ATIVA.....	25
2.6 CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	25
2.7 O USO DA CCA COMO CO-PRODUTO	26
2.8 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA.....	27
2.9 INFLUÊNCIA DO GRAU DE MOAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA	29
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	32
3.1 MATERIAIS.....	34
3.1.1 Cimento Portland.....	34
3.1.2 Água de Amassamento	34
3.1.3 Agregado Miúdo.....	35
3.1.4 Sílica Ativa	35
3.1.5 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima com Temperatura Controlada.....	36
3.1.6 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima Sem Controle de Temperatura	37
3.2 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ	38
3.2.1 Difração de Raios-X (DRX).....	38
3.2.2 Espectrometria de Raio X (EDX)	39
3.2.3 Perda ao Fogo	39
3.2.4 Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland	40
3.2.5 Massa específica	41
3.2.6 Distribuição Granulométrica.....	42
3.3 DOSAGEM DA ARGAMASSA.....	43
3.4 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	44

3.4.1 Consistência	44
3.5 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO TÉRMICO	44
3.5.1 Avaliação da Curva de Liberação de Calor de Hidratação.....	44
3.6 ENSAIOS DA ARGAMASSA No ESTADO ENDURECIDO.....	46
3.6.1 Resistência à compressão axial.....	46
3.6.2 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão – NBR 13279/2005.....	48
3.6.3 Investigação da microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	50
3.6.4 Porosidade por Intrusão de Mercúrio.....	52
3.6.5 Absorção e índice de vazios.....	53
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	55
4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	55
4.2 ESPECTROMETRIA DE RAIOS X (EDX).....	56
4.3 PERDA AO FOGO.....	57
4.4 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND....	57
4.5 MASSA ESPECÍFICA	58
4.6 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	59
4.7 ENSAIOS NA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	61
4.7.1 Índice de Consistência.....	61
4.8 ENSAIOS NA ARGAMASSA NO ESTADO TÉRMICO	62
4.8.1 Avaliação da Curva de Liberação de Calor de Hidratação.....	62
4.9 Ensaios na Argamassa no Estado Endurecido	64
4.9.1 Resistência à compressão simples	64
4.9.2 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão.....	69
4.9.3 Investigação da microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	71
4.9.4 Porosidade por Intrusão de Mercúrio.....	79
4.9.5 Absorção e índice de vazios.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.0 CONCLUSÕES	82
5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	85
REFERÊNCIAS.....	87
ANEXO 1 – Resultados de resistência à compressão – NBR 7215/1996.....	93
ANEXO 2 – Resultados de Resistência à Tração na Flexão e Compressão - NBR 13279/2005.....	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A reciclagem de resíduos é uma maneira de se diversificar a oferta de matéria-prima para a utilização como material de construção, viabilizando reduções de custo. A reciclagem de materiais, tais como entulhos, resíduos agrícolas, resíduos industriais e resíduos de mineração, entre outros, contribui para a preservação ambiental (LIMA, 2008).

A agroindústria é um dos setores de maior relevância no Brasil e, devido a sua expressiva produção, gera grandes quantidades de resíduos. A disposição final destes tem causado preocupação, pois vem desencadeando diversos problemas ambientais, como a poluição do solo, da água e do ar. O setor da construção civil é um dos mais “abrangentes”, ou seja, possibilita a reintrodução dos rejeitos industriais na composição, por exemplo, resíduo da construção e demolição (RCD) em concreto e argamassa, bem como, a incorporação das várias adições minerais, todos os rejeitos industriais, que tem como função principal modificar as propriedades dos concretos ou das argamassas, como a trabalhabilidade, resistência (física e/ou mecânica), durabilidade entre outros. Além disso, a introdução desses resíduos oferece, sem dúvida, uma destinação final mais nobre e adequada para os mesmos.

Para que sejam utilizados na construção civil, os novos materiais devem atender às exigências físicas e mecânicas, de acordo com as normatizações vigentes, tais como resistência, durabilidade, trabalhabilidade, entre outras características desejáveis, para que sejam superiores ou similares aos produtos já existentes no mercado (GHAVAMI; MARINHO, 2005; BARBOZA et al., 2008; LIMA; ROSSIGNOLO, 2010). Assim, é importante que essas exigências sejam alcançadas, visto que o setor da construção civil deve ofertar materiais que tenham boa qualidade e uma vida útil prolongada.

Dentre os diversos tipos de resíduos, oriundos de diferentes atividades agroindustriais, as cinzas minerais ganham destaque, por apresentarem altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo, então, ser utilizadas como pozolanas (PAULA et al., 2009).

Uma dessas pozolanas, que vem sendo empregadas, é a cinza de casca de arroz (CCA), resíduo oriundo do setor agroindustrial que, nos últimos anos, tem sido objeto de estudo de alguns pesquisadores (DELLA, 2001; ISAIA et al., 2010; MENEZES et al., 2009; CORDEIRO 2009; POUEY, 2006), os quais observam que esta cinza apresenta bons resultados, em diversas aplicações, como por exemplo, em argamassas e concretos.

O aproveitamento da CCA, na construção civil, é importante para preservar o meio ambiente, uma vez que, muitas vezes, seu descarte pode ocorrer em áreas livres e impróprias, provocando contaminação do ambiente local, por apresentar, em sua constituição, certa quantidade de carbono residual. A cinza é considerada prejudicial à saúde humana, devido ao elevado teor de sílica que pode conter, quando de sua exposição, uma afecção pulmonar conhecida como “silicose”.

Neste sentido, este trabalho visa caracterizar e avaliar o desempenho dessas duas cinzas de casca de arroz quando introduzidas em argamassas utilizando dois tipos de cinza de casca de arroz, a primeira com controle de temperatura de queima e a segunda sem esse controle.

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme Aitcin (2000), o concreto é o material mais utilizado na construção civil e, o segundo mais consumido no Mundo, só perdendo para a água. Além disso, estima-se que a produção mundial de cimento Portland, no ano de 2010, foi da ordem de 2.188,6 milhões de toneladas (OFICIMEN, 2010). No Brasil, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, foram produzidos 59,12 milhões de toneladas de cimento Portland no ano de 2010 (SNIC, 2010).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 5% da emissão de gás carbônico do Mundo, sendo esta, uma das principais responsáveis pelo efeito estufa. Com isso, cientistas, pesquisadores e tecnólogos estão na busca de alternativas ecologicamente corretas para a fabricação do cimento Portland, com o intuito de prolongar a vida útil das jazidas de argila e calcário, que são matérias primas para a produção do clínquer.

Sabe-se que a utilização de materiais pozolânicos interfere nas propriedades

físicos/mecânicas de argamassas e concretos, contribuindo, principalmente, com o aumento da resistência à compressão, com a diminuição da permeabilidade e com aumento da durabilidade (TASHIMA, 2006).

Esses materiais pozolânicos geralmente são resíduos provenientes de outros setores produtivos, como é o caso da cinza de casca de arroz. A utilização de CCA como material suplementar ao cimento já vem sendo investigada por vários autores com resultados promissores, mostrando-se uma alternativa interessante na produção de concretos de alto desempenho (CORDEIRO 2009).

A abordagem utilizada no presente trabalho baseia-se na possibilidade da utilização da cinza de casca de arroz com e sem controle de queima, como material suplementar ao cimento (substituição parcial) no estudo de argamassas, com o objetivo de analisar as características destes, criando, assim, um banco de dados para estudos futuros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho mecânico de argamassas, com a substituição parcial de cimento Portland por cinza de casca de arroz. Contribuindo com a criação de um banco de dados do mapeamento do RS com as duas cinzas da casca de arroz, provenientes da cidade de Alegrete/RS.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar as características físicas e químicas das cinzas de casca de arroz por meio de ensaios de: Espectometria por Fluorescência de Raios-x; Difração de Raios-X (DRX), perda ao fogo, granulometria a laser, índice de atividade pozolânica, massa específica.
- Analisar se as CCAs se enquadram como material pozolânico seguindo a NBR 12356/1992.
- Identificar os parâmetros de substituição necessários para o estudo de dosagem com os diferentes teores de substituição de cinza de casca de arroz em argamassas.

- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores (10%, 15% e 20%) de substituição em massa de cinza de casca de arroz em relação ao cimento.
- Analisar o comportamento da argamassa, no estado fresco, utilizando-se o ensaio de consistência.
- Analisar o comportamento da argamassa, no estado térmico, utilizando-se o ensaio de avaliação da curva de liberação de calor de hidratação;
- Analisar o comportamento da argamassa, no estado endurecido, por meio dos seguintes ensaios: ensaio de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão e à compressão, investigação da microestrutura por intermédio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), porosimetria por intrusão de mercúrio e determinação da absorção de água.

1.3 DELINEAMENTO

O trabalho seguiu as etapas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura1.

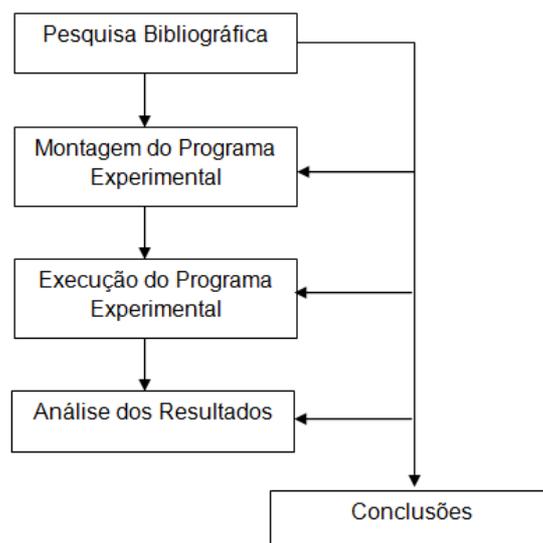


Figura 1 - Etapas da Pesquisa

Fonte: Elaboração Própria.

A etapa de **pesquisa bibliográfica** visou aumentar os conhecimentos sobre o

tema da pesquisa, possibilitando um melhor entendimento do mesmo, necessário para a definição das variáveis da pesquisa e para a análise e interpretação dos resultados. Esta etapa não ficou restrita somente no começo do trabalho, estando presente durante toda a execução do mesmo.

A segunda etapa, denominada de **montagem do programa experimental**, tratou da caracterização dos materiais que foram utilizados, realizando-se segundo recomendações das Normas pertinentes aos ensaios, a definição das porcentagens de substituição a serem utilizadas e a escolha dos ensaios adequados para esse estudo.

A terceira etapa (**execução do programa experimental**) constituiu-se na busca e aquisição dos materiais necessários para a realização dos ensaios laboratoriais. Além disso, providenciaram-se os equipamentos necessários para a realização dos mesmos. Em paralelo, procedeu-se a execução das atividades laboratoriais, isto é, a moldagem e cura dos corpos de prova. Também foram realizados alguns ensaios em parceria com o laboratório da UFRGS. A quarta etapa constituiu-se da **análise dos resultados**, sendo efetuadas as análises químicas e físicas das cinzas de casca de arroz utilizadas, a análise das argamassas no estado fresco e endurecido, sendo feito um tratamento de espúrio para os resultados. A quinta etapa é formada pelas **conclusões** sobre os resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Desde o surgimento do Homem, a busca por abrigo tornou-se uma necessidade básica e, com isso o desenvolvimento de materiais, apropriados para a construção, tornou-se parte da História. Dentre os materiais descobertos, a argila, a cal, o gesso e a pedra revelaram-se materiais com incríveis possibilidades construtivas (CORDEIRO, 2009).

Relatos acerca das primeiras construções desenvolvidas pelo homem, de aproximadamente 10.000 anos, indicam que os egípcios foram pioneiros no desenvolvimento de materiais ligantes. A cal surge posteriormente, descoberta, ao que tudo indica, pela civilização grega e torna-se um aglomerante muito difundido ao longo da história das civilizações (ALVES, 2002; BARSOUM; GANGULY, 2006).

A evolução das construções pode, sob diversos aspectos, ser avaliada como cíclica, com hábitos que vêm com o decorrer dos anos. Babilônicos, egípcios, gregos, entre outros povos, utilizaram materiais com características pozolânicas em épocas e regiões diferentes. Com a descoberta do cimento Portland estes materiais entraram em desuso, mas hoje a engenharia vive um novo ciclo no que diz respeito ao uso de pozolanas, especialmente porque o mercado consumidor se faz exigente com relação à aplicação de materiais sustentáveis (COOK, 1986 apud CORDEIRO, 2009; SANTOS, 2008).

A origem do nome pozolana deve-se ao fato de que as cinzas vulcânicas mais famosas foram encontradas próximo ao Monte Pozzuoli, Itália. Com a descoberta de novos materiais naturais que ao reagir com a cal apresentavam propriedades cimentíceas, o termo pozolana passou a ser utilizado de forma mais abrangente (TASHIMA, 2006).

Segundo Cordeiro (2009) o termo pozolana inclui não somente cinzas vulcânicas, mas também resíduos agroindustriais, tais como: cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz e diversos outros materiais. O termo pozolana é empregado para todos os

materiais, sejam eles naturais ou artificiais, desde que apresentem características de formar compostos cimentantes.

2.2 DEFINIÇÃO DAS POZOLANAS

Segundo Massazza, 1998, apud Cordeiro, 2009, originalmente, o termo pozolana era atribuído aos materiais naturais de origem vulcânica, com propriedades similares aos da cidade italiana de Pozzuoli, que reagem com a cal, em presença de água, à temperatura ambiente. Com o decorrer do tempo, a definição foi estendida a outros materiais que, embora de origens diversas, exibem comportamento semelhante.

De acordo com a ABNT – NBR 12653/1992, pozolana é um material que, por si só, possui pouco ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

Conforme Tashima (2006), as pozolanas podem ser utilizadas tanto no processo de fabricação do cimento, na substituição de uma parte do clínquer, ou ainda, na produção de argamassas e concretos. No Brasil é muito comum ocorrerem essas duas utilizações, assim, reduzindo a extração das jazidas de calcário e argila, com o intuito de preservar os recursos naturais não-renováveis.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS

As pozolanas dividem-se em dois grandes grupos: naturais e artificiais.

De acordo Cordeiro (2009), as pozolanas naturais derivam-se de rochas ou minerais vulcânicos, passando por vários processos de britagem, moagem, classificação e, normalmente, são ativados termicamente. A utilização das pozolanas naturais proporcionam reduções consideráveis no consumo de energia para a fabricação do cimento Portland. Essa redução aumenta quando a pozolana é utilizada em porcentagem de substituição ao cimento Portland.

As pozolanas artificiais são resíduos ou subprodutos agroindustriais, oriundas de diversas fontes, nas quais possuem diferentes características, mas tendo em comum a atividade pozolânica. As pozolanas artificiais mais empregadas na construção civil são as cinzas volantes, as escórias de alto forno e a sílica ativa. Porém, diversas pesquisas vêm sendo realizadas, tais como as de Tashima (2006), Cordeiro (2009) e Pouey (2006), com

o intuito de introduzir outros resíduos como substituição ao cimento Portland que são o bagaço de cana-de-açúcar e a cinza de casca de arroz (TASHIMA, 2006).

Já a NBR 12653/1992 classifica os materiais pozolânicos em três grupos, conforme apresentado na Tabela 1. Essa classificação baseia-se na origem dos materiais e não especifica uma classe particular para pozolanas altamente reativas.

Tabela 1 - Exigências Químicas da NBR 12653/1992

Recomendações	Classe N	Classe C	Classe E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ % máx.	4	5	5
Teor de umidade % máx.	3	3	3
Perda ao fogo % máx.	10	6	6
Alcális disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Classe N: pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas); Classe C: cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão; Classe E: o que não se enquadram nas Classes N ou C.

Fonte: NBR 12653/1992 (p.2)

Tashima (2006) critica a NBR 12653/1992, primeiramente, por classificar os materiais pozolânicos em função somente da origem do material, não fazendo nenhuma menção às pozolanas altamente reativas como a sílica ativa, metacaulim e a cinza de casca de arroz. Outro fator que o autor questiona, refere-se à forma de obtenção do índice de atividade pozolânica, abordado na NBR 5752/1992. O procedimento do ensaio que determina a fixação da trabalhabilidade faz com que a demanda de água para pozolanas muito finas seja muito elevada e, por consequência, a resistência das argamassas com pozolanas seja reduzida, em comparação ao traço controle.

2.4 CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DAS POZOLANAS EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

A preocupação com a durabilidade das estruturas, o aumento da produção de concretos de elevada resistência e o interesse na destinação adequada de resíduos vêm tornando, cada vez mais frequente o uso de pozolanas em matrizes de cimento Portland.

Sabe-se que as pozolanas reagem com a portlandita, (CH) formada na hidratação do cimento, gerando produtos de hidratação resistentes (C-S-H, A-C-H e/ou S-A-C-H). Segundo Mehta e Monteiro (1994), a substituição de parte do cimento Portland por pozolanas acelera o início das reações de hidratação dos compostos do cimento, especialmente dos aluminatos de cálcio. Isso faz com que se libere uma maior quantidade de cal, favorecendo, assim, a formação de mais produtos de hidratação que, no final, tem influência sobre as características das argamassas e dos concretos no estado endurecido, tais como, resistência mecânica, ataques químicos e reações expansivas.

Pode-se separar a atuação das pozolanas em argamassas e concretos em dois efeitos: efeito químico, também conhecido como atividade pozolânica, e efeito físico. No que se refere ao efeito químico, à atividade pozolânica inclui todas as reações químicas que acontecem entre os elementos ativos das pozolanas, a cal e a água (METHA e MONTEIRO, 1994).

O processo de reação da pozolana com o hidróxido de cálcio contribui para a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (A-C-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H) gerando, assim, um aumento de resistência mecânica, diminuição da permeabilidade e, também, um aumento na durabilidade (CORDEIRO, 2009).

Sabe-se que essas melhorias nas propriedades de argamassas e concretos estão diretamente relacionadas com a relação *a/c*, pois, somente para relações inferiores a 0,5 a atividade pozolânica contribuirá de forma significativa. Para relações superiores a 0,5 a grande quantidade de poros na matriz irá predominar sobre a atividade pozolânica, fazendo com que o efeito pozolânico seja reduzido (TASHIMA, 2006).

O efeito físico da pozolana, conhecido como efeito filer, atua no preenchimento de vazios de concretos e argamassas, melhorando a coesão e diminuindo a exsudação. Outra forma de efeito físico da pozolana, chamado de efeito de nucleação, atua no aumento da velocidade de hidratação das partículas de cimento Portland nos primeiros dias de cura. O efeito filer e o efeito de nucleação estão diretamente relacionados com a distribuição granulométrica das pozolanas (CORDEIRO, 2009).

2.5 SÍLICA ATIVA

A sílica, SiO_2 , é um composto químico formado por oxigênio e silício, que pode ser encontrado na natureza na forma pura, hidratada ou mineral. A sílica pura é encontrada em rochas de quartzo, na areia, arenitos e quartzitos. Na forma hidratada é encontrada na opala e como mineral, apresenta-se em associações que dão origem a feldspatos e silicatos, dentre outros (DELLA, 2001).

A sílica apresenta as seguintes características: alta refratariedade, resistência a ataques químicos e choque térmico, baixa condutividade térmica, resistência mecânica. Estruturalmente a sílica pura pode ser amorfa ou cristalina (FONSECA, 1999).

A sílica amorfa é um material de fácil moagem e, quando moído, altamente reagente. Pode ser obtida a partir da casca de arroz nos processos de queima rápida a baixas temperaturas, inferior a 700°C . Suas propriedades principais são a baixa condutividade e elevada resistência ao choque térmico (POUEY, 2006).

2.6 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. É um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%), em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972 apud POULEY, 2006).

A composição química da cinza é basicamente sílica e, a sua atividade pozolânica está diretamente relacionada com o processo de combustão da casca. Sua coloração pode variar desde um branco rosado até um negro, dependendo do teor de carbono contido na cinza. Trata-se de um material considerado, por diversos pesquisadores (CORDEIRO, 2009; POUEY, 2006; ISAIA; et al., 2010; RODRIGUES; BERALDO, 2010), como uma fonte alternativa de obtenção de sílica amorfa e de alto grau de reatividade.

A cinza de casca de arroz tem sido bastante pesquisada nos últimos 20 anos, principalmente a partir dos estudos que Mehta e Monteiro (1994) e colaboradores desenvolveram na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Muitos países, principalmente os asiáticos, têm empregado a cinza de casca de arroz amorfa no cimento ou concreto,

pois, na Ásia, há grande produção de arroz e, por consequência, tem a facilidade de se utilizar a cinza como material cimentício.

Segundo a ONU, a produção mundial em 2010 chegou a 710 milhões de toneladas, sendo 90% do arroz cultivado e consumido na Ásia. O Brasil ocupa lugar de destaque no cenário internacional, sendo o maior produtor fora do continente asiático, com produção de 11,31 milhões de toneladas, representando 2% do total mundial e 50% da América Latina.

O Rio Grande do Sul, na safra 2010/2011, produziu 8,2 milhões de toneladas de arroz, representando 64% da produção nacional, que foi de 12,83 milhões de toneladas. No sul do Brasil, boa parte da casca de arroz é aproveitada para abastecer as caldeiras de indústrias cerâmicas e para gerar energia em usinas termoelétricas. A casca queimada produz uma elevada quantidade de cinzas, representando cerca de 20% da massa da casca de arroz (CONAB, 2011).

Grande parte das pesquisas realizadas no Brasil para uso da CCA em concreto tem utilizado cinza com a maior reatividade possível, para possibilitar maiores ganhos de resistência e de durabilidade. São poucos os estudos que utilizam a CCA residual, sem controle de queima, como as pesquisas desenvolvidas por Dafico (2001) – UFB -, Isaia; Gastaldini (2009) – UFSM –, Silva (2009) – UnB-, Prudêncio Jr. (2003) – UFSC-, Dal Molin (1995) – USP-, entre outros.

2.7 O USO DA CCA COMO CO-PRODUTO

O arroz, durante seu crescimento, apresenta a formação de uma casca que reveste e protege os grãos. A casca de arroz é removida durante o processo de refino do arroz e possui baixo valor comercial, pois seus componentes principais, tais como SiO₂ e as fibras, não possuem valor nutritivo, sendo inúteis para alimentação humana ou animal (FERREIRA, 1999).

Devido ao seu poder calorífico e custo praticamente nulo, a casca de arroz vem, cada vez mais, substituindo a lenha empregada na geração de calor e vapor, necessários para os processos de secagem e parbolização dos grãos. A combustão desta casca gera cinzas com formas estruturais variáveis, podendo ser amorfa e/ou cristalina, dependendo do tipo de queima, do equipamento, da temperatura e do tempo de queima.

Outro uso da cinza de casca de arroz, na construção civil, é associada à argila, pode ser empregada na fabricação de tijolos, painéis e telhas, favorecendo um bom isolamento térmico e, ainda sendo usada em concretos de baixa densidade (ISAIA, 1995).

Conforme Tashima (2006), a cinza de casca de arroz pode ser utilizada na produção de cimento e incorporada na produção de concretos e de argamassas; no cimento pode aumentar a resistência e a durabilidade, além de reduzir a porosidade.

2.8 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA

Estudos como Silva et al. (2007), Nair et al. (2008) e Isaia et al. (2010) comprovam que as propriedades da CCA estão fortemente ligadas às temperaturas de queima da casca de arroz. O aumento da temperatura de queima promove as transformações de fases de sílica contida na cinza de casca de arroz, influenciando diretamente na quantidade de sílica reativa.

De acordo com Cordeiro (2009), outro fator de influência é o tipo de forno em que a cinza é gerada. Esse pode favorecer, ou não, a produção de sílica amorfa. Um forno do tipo fluidizado, comparado a um forno comum, possui mais vantagens na produção de cinza de casca de arroz amorfa devido às características peculiares dos leitos fluidizados que, em geral, apresentam inexistência de gradientes de temperatura, de pontos muito ativos ou de regiões estagnadas.

Associada à temperatura e ao tipo de forno, a taxa de aquecimento e o tempo de residência na temperatura desejada completam os fatores que regem as características físicas e químicas das CCA produzidas (TIBONI, 2007).

É sabido que a queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente na forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por uma alta reatividade (CORDEIRO, 2009).

Segundo Cook, 1986, apud Cordeiro, 2009, com relação às transformações estruturais que regem a formação de cinzas amorfas e/ou cristalinas, tem-se que inicialmente ocorre a perda de massa em temperaturas de até 100°C, resultando na evaporação da água absorvida. A cerca de 350°C ocorre à ignição do material mais volátil, dando início à queima da casca de arroz. Entre 400 e 500°C, o carbono residual é oxidado, sendo neste estágio observada a perda de massa mais substancial. Após esta

etapa, a cinza é rica em sílica amorfa. O emprego de temperaturas acima de 600°C pode levar à formação de quartzo, e níveis mais elevados de temperatura podem acarretar na formação de outras formas cristalinas. Acima de 800°C, a sílica presente na CCA é essencialmente cristalina.

Estudos realizados revelam que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Barbosa et al. (2006) estudaram a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Como resultados, apresentam uma cinza com controle de queima, com temperatura aproximadamente 600°C, Figura 2 (b); e outra cuja queima processou-se por autocombustão sem controle de queima, tal processo durou 36 horas, tendo uma temperatura de até 850°C, Figura 2 (a).



(a) cristalina



(b) amorfa

Figura 2 - Cinza de Casca de Arroz (CCA) após moagem

Fonte: Barbosa, et al. (2006, p. 6).

Ainda nesses estudos, Barbosa (2006) realizou o ensaio de difração de raio X, nos dois tipos de cinzas obtidas. É possível observar a presença de cristais, principalmente, a cristobalita e a tridimita na cinza cristalina (Figura 3), enquanto que, na cinza amorfa, não ocorrem picos (Figura 4).

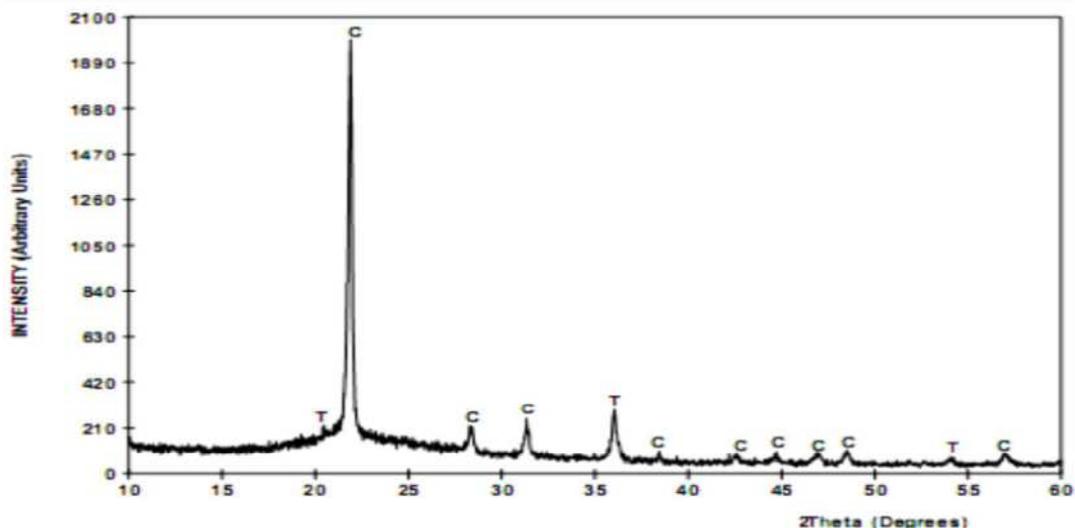


Figura 3 - Resultado do ensaio de Difração de Raio-x CCA cristalina

Fonte: Barbosa et al. (2006, p. 6).

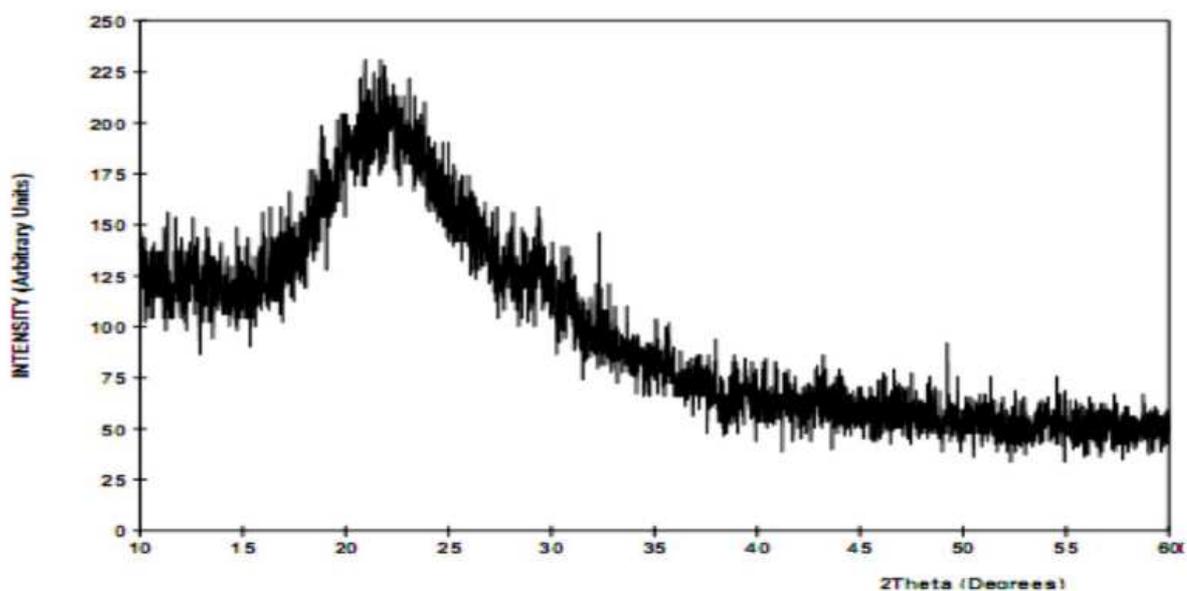


Figura 4 - Resultado do ensaio de Difração de Raio-x CCA amorfa.

Fonte: Barbosa et al. (2006, p. 6).

2.9 INFLUÊNCIA DO GRAU DE MOAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA

O grau de moagem, em conjunto com as condições de queima, é um dos fatores que influenciam nas características das CCA. Trata-se de uma operação dispendiosa, porém, necessária, que é capaz de modificar as propriedades físicas da cinza de casca de arroz, tais como a superfície específica e finura (CORDEIRO, 2009).

Conforme Cordeiro (2009), a moagem consiste na fragmentação de uma estrutura sólida, quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elementos que provocam deformação das partículas, a ponto de conferir maior compacidade à mistura. Essa moagem pode ser realizada a seco, ou a úmido, dependendo do material a ser moído e do processo subsequente.

Após a queima, a dimensão da cinza é praticamente a mesma da casca e, por conta disso as mesmas precisam passar por um processo de beneficiamento, de forma que atendam a finura apropriada para o uso como adição.

Prudêncio Jr (2002) constatou que, na medida em que se aumenta o tempo de moagem, a pozolanicidade também aumenta devido ao tamanho da partícula que diminui. No entanto, em moagens prolongadas esse efeito não se mantém, atribuindo ao a dificuldade na dispersão dessas partículas muito finas na argamassa.

A finura da casca de arroz influencia a sua reação com a água. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ele reagirá. No entanto, existem limites para a finura, devido ao calor de hidratação; com isso, partículas menores do que 45 µm são difíceis de hidratar, e aquelas maiores do que 75 µm nunca se hidratam completamente. A adição de cinza de casca de arroz, ao concreto, provoca um aumento significativo na resistência à compressão, devido ao refinamento dos poros e dos grãos e pela melhoria na microestrutura da zona de transição (SILVA, 2007).

Prudêncio e Santos (1996) demonstraram que o índice de atividade pozolânica (IAP) da CCA residual aumenta com o tempo de moagem (aumento da superfície específica) até o limite de quatro horas. Após este tempo, há um decréscimo no índice, apesar de a superfície específica continuar aumentando. Este comportamento inesperado talvez possa ser atribuído ao fato de que o aumento da superfície específica dificulta a dispersão da cinza na argamassa. As partículas da cinza acabam formando grupos que não reagem na sua totalidade com a Ca(OH)_2 liberada no processo de hidratação do cimento.

Segundo Frizzo (2001), comparando-se as misturas com mesma pozolana, cinza volante e cinza de casca de arroz, verificou-se que o aumento na finura, ao mesmo tempo em que aumentou a resistência à compressão axial, reduziu a penetração média de cloretos. Este comportamento ocorreu devido ao aumento na finura das adições minerais

que proporcionaram melhor preenchimento dos espaços capilares grandes, resultando em maior densificação da microestrutura da pasta e impermeabilidade do concreto.

Pouey (2006) produziu cimentos diferentes com distintas CCAs submetidas a tratamentos físicos, térmicos e químicos. A autora afirmou que, em termos de resistência à compressão, o tratamento físico (redução da granulometria) foi o que produziu maiores benefícios. Ficou clara a influência da CCA no seu desempenho, ou seja, até o limite de 4,55 μm testado, quanto menor foi a granulometria, maior foi a pozolanicidade da CCA e, por consequência, a resistência à compressão dos compósitos. Ainda de acordo com a autora, para cimentos 50% passantes inferiores a 6 μm , obtidos pelo moinho “periquito”, parece haver uma padronização do comportamento. Quando desconsiderados o tipo de CCA e tipo de tratamento empregado, todas as CCAs atingiram IAP acima do limite mínimo estabelecido pelas normas brasileiras e os cimentos atingiram bom desempenho.

Seguindo a mesma tendência, Cordeiro (2009) afirmou que os estudos de moagem desenvolvidos com a cinza residual da casca de arroz possibilitaram verificar que a moagem ultrafina foi adequada para conferir elevada atividade pozolânica ao material. Dentre os procedimentos investigados pelo autor, as moagens efetuadas por períodos de 120 e 240 minutos em moinho vibratório conduziram às cinzas de maior atividade pozolânica, na avaliação tanto por método mecânico quanto por método químico.

Assim, tem-se que o tempo de moagem influencia de forma significativa na pozolanicidade do material, e que existe um tempo de moagem ótimo para que a CCA atinja a máxima pozolanicidade.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os materiais, os equipamentos e os métodos experimentais empregados para o desenvolvimento da pesquisa. Este trabalho foi realizado em parcerias com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), que possibilitaram a realização de alguns dos ensaios propostos, em razão da UNIPAMPA não dispor de todos os equipamentos necessários.

O programa experimental foi dividido em cinco etapas. A primeira etapa descreve os materiais que foram utilizados no estudo. Na segunda, foi realizada a caracterização da cinza de casca de arroz.

A dosagem dos traços foi realizada na terceira etapa. Na quarta etapa da pesquisa, foi analisada a argamassa no estado fresco, com os ensaios de consistência e avaliação de liberação de calor de hidratação.

E, por fim, a quinta etapa contempla os ensaios de argamassa no estado endurecido que são: resistência à compressão simples NBR 7215/96, resistência à tração na flexão e compressão NBR 13279/05, investigação da microestrutura através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), porosimetria por intrusão de mercúrio e determinação da absorção de água e índice de vazios NBR 9778/05.

A produção e os ensaios no estado fresco foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa. Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e preparação para o ensaios de Porosimetria foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Para facilitar a visualização da execução do programa experimental, a Figura 5 mostra esquematicamente todas as etapas para a realização deste.

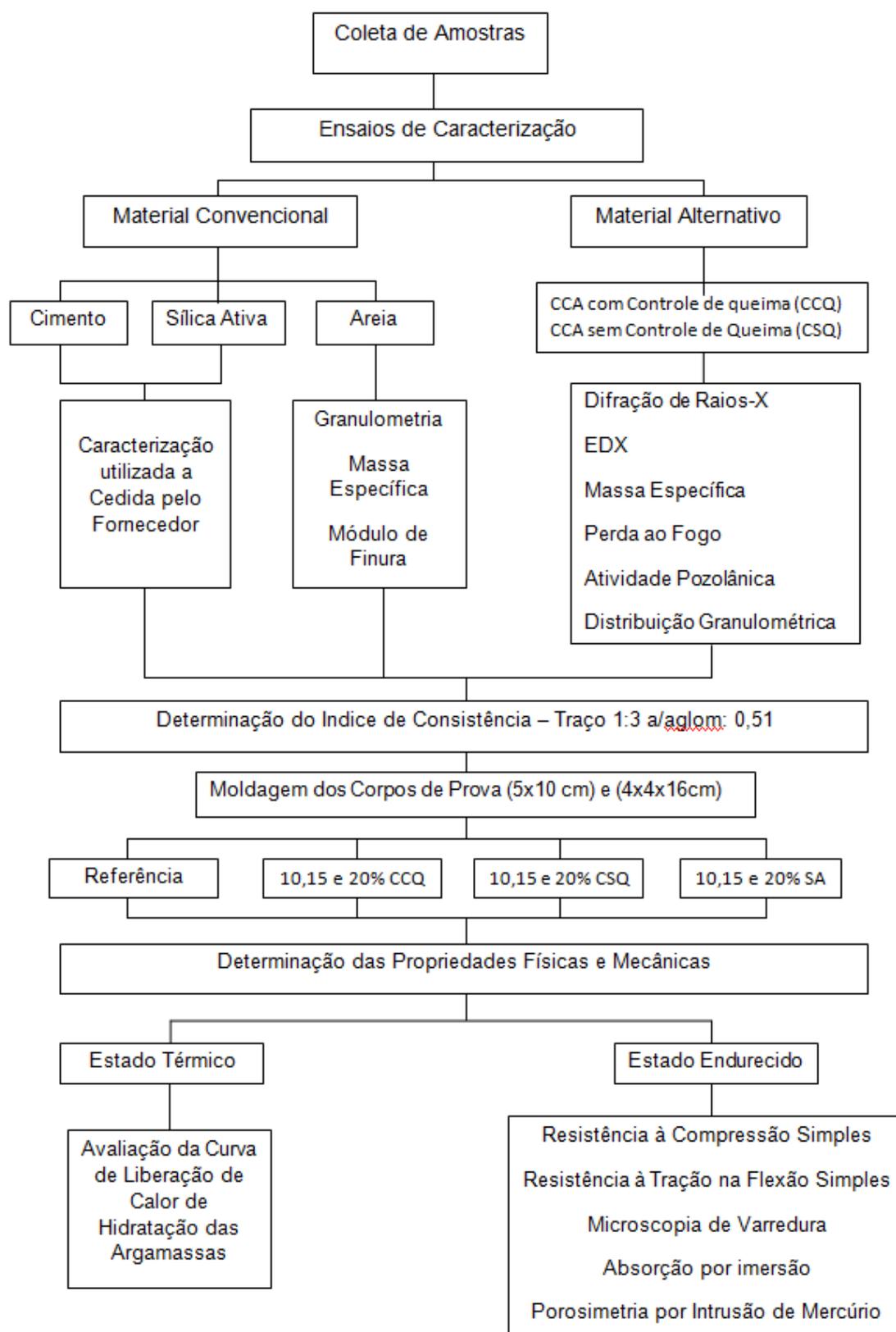


Figura 5 – Esquema do Programa Experimental.

Fonte: Elaboração Própria.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para a produção de argamassas foi o CP V-ARI de alta resistência inicial produzido pela Empresa Votorantim. Suas características físicas, químicas e mecânicas, de acordo com informações fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Composição do Cimento CP V

	Análise do Cimento	Exigência da Norma	NBR
	Finura		
Resíduo na peneira 75mm [%]	0,1	≤ 6,0	11579/91
Área específica [m ² /Kg]	487	≥ 300	NM 76/98
	Tempo de Pega		
Início [mim]	194	≥60	NM 65/03
Término [mim]	259	-	NM 65/03
Expansibilidade a quente [mm]	0,46	≤5,0	11582/91
Massa específica [g/cm ³]	2,96	-	NM 23/01
	Resistência à Compressão [MPa]		
1 dia	23,1	≥11	7215/96
3 dias	33,2	≥24	7215/96
7 dias	38,3	≥34	7215/96
28 dias	46,7	-	7215/96
	Propriedades Químicas		
Perda ao Fogo [%]	3,6	≤4,5	NM 18/04
Óxido de Magnésio [%]	5,66	≤6,5	NM 14/04
Anidrido Sulfúrico	3,45	≤4,5	NM 16/04
Resíduo Insolúvel	11,8	10 a 20	NM 22/04

Fonte: Empresa Votorantim (2012, p.1).

3.1.2 Água de Amassamento

A água utilizada para a mistura de argamassas é a proveniente da rede pública de distribuição de água fornecida pela empresa CORSAN para a cidade de Alegrete/RS.

3.1.3 Agregado Miúdo

Foram utilizados dois agregados miúdos; areia média e areia fina, de origem natural, do tipo quartzosa de origem do Município de Manoel Viana.

A caracterização destes agregados foi realizada segundo o procedimento recomendado pela NBR NM 248/2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica.

Para o ensaio da massa específica utilizou-se a recomendação da norma NBR 9776/1987: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. A Tabela 3 detalha a composição da areia.

Tabela 3 - Composição Granulométrica da Areia e Massa Específica

Abertura de Peneiras [mm]	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
6,30	0,0	0,0
4,80	0,0	0,0
2,40	0,0	0,0
1,20	0,8	0,8
0,60	2,6	3,4
0,30	49,1	52,5
0,15	44,0	96,4
FUNDO	3,6	100,0
TOTAL	100,0	153,06
DIÂMETRO MÁXIMO		0,60
MÓDULO DE FINURA		1,53
MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]		2,63

Fonte: Elaboração Própria.

3.1.4 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é considerada por muitos pesquisadores um pó, sendo uma super-pozolana, que apresenta como características principais o seu elevado conteúdo de SiO₂ (superior a 85%), a sua alta reatividade (material amorfo) e sua elevada finura.

A sílica utilizada neste trabalho é um material que se encontra disponível no mercado brasileiro, marca SILMIX, fabricada pela Camargo Corrêa Metais S/A. A Tabela 4 mostra a composição química e outras informações sobre o material. A empresa

também fornece seu diâmetro médio de 0,40 µm e perda ao fogo ≤ 6%.

Tabela 4 - Características da Sílica Ativa

Substância	Cas ⁽¹⁾	Composição Química (%)	OSHA-PEL-TWA ⁽²⁾ (mg/m ³)	ACGIH-TLV-TWA ⁽³⁾ (mg/m ³)
Sílica Amorfa (SiO ₂)	69012-64-2	≥ 85,0	-	2
Sílica Cristalina (SiO ₂)	14808-60-7	≤ 0,5	3	0,05
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	1313-59-3	≤ 1,5	-	-
Carbono Total ©	1333-86-4	≤ 6,0	3,5	3,5
Umidade (H ₂ O)	-	≤ 3,0	-	-

(1) Cas: Chemical Abstract Service Registry Number

(2) OSHA-PEL: Occupational Safety & Health Administration - Permissible Exposure Limits.

(3) ACGIH-TLV-TWA: American Conference Of Governmental Industrial Hygienists - Thershold Limit Value-Time Weighted Average exposure concentration for a conventional 8-hour (TVL,PEL) workday and a 40-hour workweek.

Fonte: Empresa SilMix (2012, p.1).

3.1.5 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima com Temperatura Controlada

Para a pesquisa foi utilizada a cinza de casca de arroz de uma empresa da cidade de Alegrete - RS. Esta Empresa implantou um sistema inovador de combustão com leito fluidizado, utilizando a casca de arroz para gerar energia elétrica renovável e sílica amorfa de qualidade. Segundo a empresa, esta tecnologia de combustão, além de melhorar a eficiência de queima, conta com um avançado sistema de automação e controle de temperatura que permite a extração da sílica da casca de arroz no seu formato amorfo, possibilitando sua utilização como adição/substituição do cimento em dosagens de concretos e argamassas.

A empresa garante vários benefícios da sílica ecológica produzida comercialmente quando adicionado à argamassas e concretos, tais como: diminuição da porosidade, aumento da resistência mecânica, aumento da resistência à corrosão, redução do consumo de cimento e aumento da durabilidade das estruturas. A Figura 6 mostra a cinza de casca de arroz fornecida pela empresa.



Figura 6 - Cinza de Casca de Arroz com Queima Controlada

Fonte: Elaboração Própria.

3.1.6 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima Sem Controle de Temperatura

A cinza de casca de arroz da queima sem controle de temperatura é utilizada como combustível no processo de parbolização dos grãos de arroz. Esta queima se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas, resultando como rejeito deste processo, uma cinza de cor predominantemente preta ou cinza escuro (Figura 7).



Figura 7 - Cinza de Casca de Arroz obtida do processo de queima sem controle

Fonte: Elaboração Própria.

No laboratório da Engenharia Civil (UNIPAMPA, campus Alegrete), a cinza teve sua granulometria reduzida, utilizando-se uma máquina de Abrasão Los Angeles, da

marca Pavitest, programado para realizar 28800 giros aproximadamente 8 horas, realizando-se, desse modo, a moagem com o intuito de aumentar a finura da cinza.

Sabe-se que a correta moagem da cinza até alcançar a granulometria desejada dar-se-á pela utilização de um moinho de bolas. No entanto, a UNIPAMPA não possui tal equipamento, então optou-se pela substituição utilizando o equipamento de abrasão Los Angeles (Figura 8).



Figura 8 - Equipamento de Abrasão Los Angeles

Fonte: Elaboração Própria.

3. 2 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ

3.2.1 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-x é uma técnica que revela a estrutura cristalina das fases que compõem um material. Quando um feixe de raios-x atinge um conjunto de átomos (por exemplo, em uma estrutura cristalina de uma amostra), os raios-x são difratados em função dos planos atômicos e íons presentes no cristal, sem mudança de comprimento de onda (dispersão coerente ou de Bragg). As difrações resultantes, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, constituem uma propriedade física fundamental de uma substância, servindo não só à identificação como também ao estudo de sua estrutura (FORMOSO et al., 1984, apud SILVEIRA 2007).

Esta técnica foi utilizada na caracterização das fases cristalinas das cinzas de casca de arroz. O ensaio foi realizado no Laboratório de Difração de Raios-x da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

3.2.2 Espectrometria de Raio X (EDX)

A Espectrometria de raios-X, por dispersão em energia (EDX ou EDS), é uma técnica analítica usada para a análise ou caracterização química de uma amostra. É uma das variantes da espectroscopia por fluorescência de raios-X que se baseia na investigação de uma amostra por meio de interações entre partículas ou radiação eletromagnética e matéria, analisando os raios X emitidos pela matéria, em resposta à incidência de partículas carregadas. Suas capacidades de caracterização são devidas em grande parte ao princípio fundamental que cada elemento tem uma estrutura atômica única, de modo que os raios X emitidos são característicos desta estrutura, que identificam o elemento (POUEY, 2006).

O ensaio que foi empregado para a caracterização química de amostras de CCA foi realizado na Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).

3.2.3 Perda ao Fogo

A perda ao fogo é determinada por variação gravimétrica pela queima à 1000°C em forno mufla por 2 horas. Para a realização deste ensaio utilizou-se as recomendações da Norma NBR NM 18/2012: Cimento Portland – Análise Química – Determinação de perda ao fogo.

Primeiramente foram separadas três amostras para cada tipo de cinza de casca de arroz (com e sem controle de temperatura), com 1,0 (uma) grama em cada vasilha, conforme a Figura 9.



Figura 9 - Amostras das Cinzas de Casca de Arroz

Fonte: Elaboração Própria.

Após separação e pesagem, as amostras foram levadas no forno Mufla por duas horas na temperatura de 1000°C. O ensaio foi executado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.2.4 Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland

A atividade pozolânica da cinza de casca de arroz para as duas amostras distintas, de acordo os procedimentos estabelecidos na NBR 5752/1992: Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com Cimento. Para esse ensaio foi utilizado o cimento CP V- Ari com o traço de 1:3.

O ensaio consiste na determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland, no qual a quantidade de água a ser usada é determinada por teste de consistência da argamassa, conforme a Figura 10, que deve ficar compreendida entre (225 +/5)mm.



Figura 10 - Ensaio de Consistência de Argamassa

Fonte: Elaboração Própria.

Após a determinação da consistência padrão, foram realizadas as moldagem dos corpos-de-prova com dimensões de 5 x 10 cm. Foram moldados três corpos-de-prova para cada tipo de cinza, ou seja, num total de 6 corpos de prova, que ficaram por 24 horas dentro dessas formas. No dia seguinte, depois da desmoldagens dos corpos-de-prova estes foram colocados dentro de uma estufa por 28 dias na temperatura de $38 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Posteriormente aos 28 dias de cura, foram realizadas as rupturas dos mesmos, ou seja, realização dos ensaios de resistência à compressão axial utilizando-se uma prensa hidráulica marca EMIC. A realização deste ensaio foi realizada na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.2.5 Massa específica

A determinação da Massa específica da Cinza de Casca de Arroz (com e sem controle de temperatura) foi realizada seguindo as recomendações da NBR 23/2000: Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da massa específica. Esta Norma estabelece os procedimentos para determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 11). O ensaio foi realizado na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

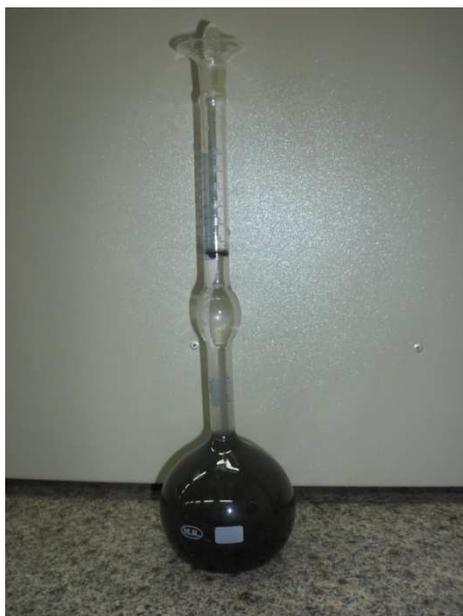


Figura 11 – Cinza de Casca de Arroz no frasco de Le Chatelier

Fonte: Elaboração Própria.

3.2.6 Distribuição Granulométrica

A técnica empregada para determinar as distribuições granulométricas das amostras dos dois tipos de CCA foi por difração a laser. As amostras foram preparadas na forma de suspensão, ou seja, Cinza de Casca de Arroz e água, em seguida, submeteu-se à agitação para completa desaglomeração das partículas e, então, colocou-se no equipamento chamado de granulômetro, marca Cilas, modelo 1064, para a realização das leituras.

Segundo Souza (2008), a análise granulométrica por difração a laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida, associada com um processo de medida óptica. Neste método, combina-se a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas. Para a realização desse ensaio, as amostras devem ser beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), dispersas em 250 ml de água destilada em agitador à velocidade de 17000 rpm por 10 minutos. Em seguida, a dispersão deve ser colocada em um equipamento, por exemplo, no Modelo 1064 da marca CILAS, em modo úmido, até atingir a concentração ideal, que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

A realização do ensaio de distribuição granulométrica das CCA foi no Laboratório

de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do SUL (UFRGS).

3.3 DOSAGEM DA ARGAMASSA

Para a produção da argamassa, decidiu-se por adotar um traço padrão, ou seja, de 1:3 (cimento: areia). Além disso, verificou-se que este traço é normalmente utilizado nas obras da região, de modo a reproduzir a realidade dessas obras e assim, se for o caso, facilitar a prática das adições da cinza da casca de arroz.

Para os ensaios de resistências à compressão e flexão das argamassas foram escolhidas as idades de 3,7, 28, 63 e 91 dias, seguindo-se as referências de Isaia et al. (2010), Tashima (2006) e Rodrigues (2008), que afirmam que argamassas com cinza de casca de arroz necessitam de idades avançadas para que ocorram todas as hidratações dessas argamassas.

A Tabela 5 mostra as misturas e as porcentagens das substituições do cimento Portland utilizados nesta pesquisa.

Tabela 5 -Traços das argamassas

Pozolanas	Misturas
-	Referência
	10%
CCA Com Controle de Temp.	15%
	20%
	10%
CCA Sem Controle de Temp.	15%
	20%
	10%
Sílica Ativa	15%
	20%

Fonte: Elaboração Própria.

3.4 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Consistência

O ensaio de consistência para os tipos de argamassas foram executados seguindo-se as recomendações da NBR 13276/2005: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da Mistura e Determinação do Índice de Consistência como ilustra a Figura 12.

A realização deste ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).



Figura 12 - Argamassa com 10% CCQ depois da retirada do molde tronco-cônico

Fonte: Elaboração Própria.

3.5 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO TÉRMICO

3.5.1 Avaliação da Curva de Liberação de Calor de Hidratação

Para Metha e Monteiro (1994), os compostos do cimento Portland são produtos de reações de alta temperatura que não estão em equilíbrio e, por isso, estão em um estado de energia elevada. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de baixa energia e o processo é acompanhado pela liberação de calor. Em suma, as reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de

calor pela hidratação dos compostos individuais podem ser usadas para caracterizar o comportamento de pega e endurecimento do cimento.

Nesse sentido, com a realização desse ensaio, pode-se obter as curvas de calor de hidratação. Tais curvas possibilitam efetuar a análise do comportamento térmico das argamassas. O ensaio consiste em medir a temperatura a cada minuto, passando por uma elevação brusca de temperatura (ápice das reações), até o momento em que a temperatura se estabiliza. Após a mistura, a amostra foi acondicionada dentro de um recipiente plástico, conectado a um termopar. Posteriormente, o recipiente foi colocado em uma caixa de isopor forrada de papel alumínio (Figura 13 (b)) e fechada com fita adesiva visando a não interferência do ambiente externo.

Neste ensaio foi utilizado um Módulo de Aquisição e Registro - FieldLogger conectado ao termopar tipo J e registrado a curva no software do fieldLogger como ilustra a Figura 13 (a) . Para que não houvesse a interferência do ambiente na hora de confecção da argamassa foi utilizada uma sala climatizada, onde todos os traços foram realizados na temperatura de 24°C.



(a) Módulo de Aquisição e Registro



(b) Amostra sendo acondicionada.

Figura 13 – Execução do Ensaio de Avaliação da Curva de Calor de Hidratação

Fonte: Elaboração Própria.

Estudos realizados por Vargas (2002), referentes ao comportamento de hidratação do cimento, quando da substituição parcial de cimento por pó de aciaria elétrica, verificaram o efeito retardador nas pastas de cimentos proporcionado por esta substituição (Gráfico 1). Este trabalho destaca ainda que a forma da curva da pasta de

referência apresenta uma base mais estreita e de maior altura em relação às outras, demonstrando nesse caso, uma maior liberação de calor em menor espaço de tempo.

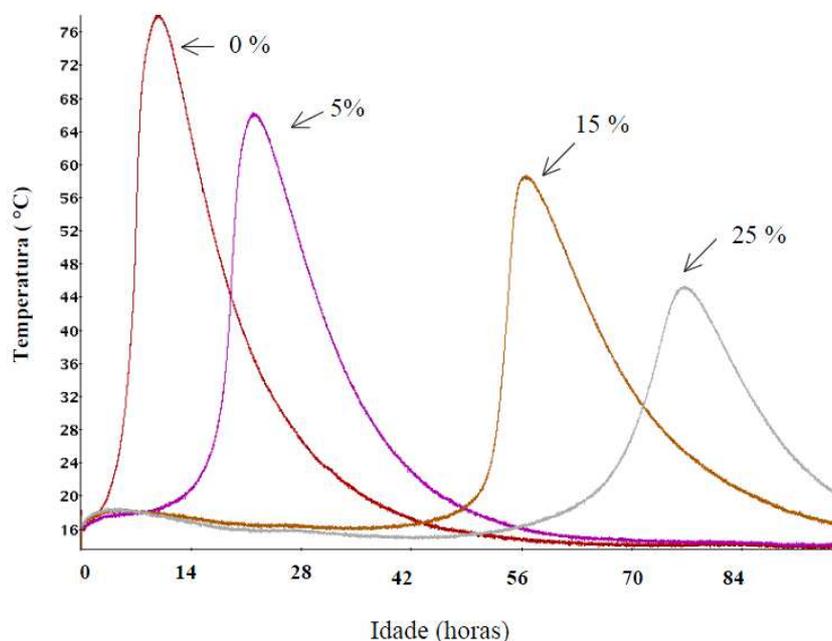


Gráfico 1 - Calor de Hidratação da pasta de cimento de referência (0%) em relação as pastas com adição de 5%; 15% e 25% de aciaria elétrica ao longo do tempo (horas)

Fonte: Vargas (2002, p.76).

A realização deste ensaio foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.6 ENSAIOS DA ARGAMASSA No ESTADO ENDURECIDO

3.6.1 Resistência à compressão axial

Os corpos de prova para resistência à compressão axial foram moldados em moldes cilíndricos com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215/96. Para cada mistura, foram moldados 15 corpos de prova (Figura 14) que foram ensaiados, posteriormente, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

Salienta-se que, inicialmente, para a realização deste ensaio, apenas se dispunha de fôrmas para corpos de prova cilíndricos. Somente mais tarde, já com os ensaios em andamento, foi possível também utilizar as fôrmas prismáticas, em razão do Laboratório de Engenharia Civil não dispor deste material até o momento. Assim, decidiu-se realizar

ensaios nos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos para confrontar os resultados entre as duas normas, ou seja, entre a norma NBR 7215/1996 e a norma NBR 13279/2005. A Tabela 6 demonstra a quantificação de corpos-de-prova que foram confeccionados para a resistência à compressão.



Figura 14 - Corpos de Prova Cilíndricos Moldados.

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6 - Programa experimental para realização do ensaio para determinação da Resistência à compressão simples

Traços	Idade de Ruptura					TOTAL
	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	
Referência	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
10% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
15% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
20% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
10% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
15% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
20% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
10% Sílica Ativa (SA)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
15% Sílica Ativa (SA)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs
20% Sílica Ativa (SA)	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	15 CPs

Fonte: Elaboração Própria.

A execução deste ensaio foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.6.2 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão – NBR 13279/2005

Foram moldados corpos de prova utilizando moldes prismáticos metálicos que consistem em armações abertas com paredes removíveis, formando três compartimentos. Estas formas servem de molde para três corpos-de-prova de (4,0 x 4,0 x 16,0) cm.

A execução das argamassas foi realizada seguindo-se a NBR 13279/2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Para esse ensaio foram moldados três corpos-de-prova prismáticos por traço. Após a colocação da primeira camada de argamassa nos moldes, foi aplicado 30 golpes através da mesa de adensamento, conforme Figura 15. A Tabela 7 esquematiza o programa experimental para a execução deste ensaio.



(a) equipamento mecânico



(b) forma prismática

Figura 15 – Moldagem dos Corpos de Prova Prismáticos

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 7 - Programa experimental para realização do ensaio para determinação da Resistência à tração na Flexão e à Compressão

Traços	Idade de Ruptura 28 dias
Referência	3 Barras
10% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 Barras
15% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 Barras
20% CCA Com Controle de Temp.(CCQ)	3 Barras
10% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 Barras
15% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 Barras
20% CCA Sem Controle de Temp.(CSQ)	3 Barras
10% Sílica Ativa (SA)	3 Barras
15% Sílica Ativa (SA)	3 Barras
20% Sílica Ativa (SA)	3 Barras

Fonte: Elaboração Própria.

Os corpos-de-prova permaneceram 48 horas moldados. Posteriormente foram mantidos em temperatura ambiente até as datas de ensaio.

Para a realização dos ensaios da resistência à compressão e à tração na flexão, inicia-se, primeiramente, com a determinação da resistência dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios à tração na flexão. Posiciona-se o corpo-de-prova nos dispositivos de apoio e em seguida, procede-se a ruptura.

Após a realização da resistência à tração na flexão, de todos os corpos-de-prova, passa-se a determinação da resistência à compressão. Para isso, utilizam-se as duas metades dos corpos-de-prova do ensaio anterior. A Figura 16 ilustra o ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão.



(a) tração na flexão



(b) compressão

Figura 16 – Ensaio de Resistência das Argamassas

Fonte: Elaboração Própria.

A execução destes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.6.3 Investigação da microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para Maliska (sem data), durante a fase de produção ou análise de materiais, quase sempre se torna necessário analisar a sua microestrutura. Esta análise microestrutural é muito importante, pois permite: primeiro, entender as correlações microestrutura - defeitos - propriedades; e segundo, prever as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas. As técnicas mais utilizadas para este tipo de análise são a Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura. No caso da microscopia ótica, o contraste da imagem é resultado da diferença de refletividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído, basicamente, pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Para materiais que são opacos a luz visível, como é o caso dos metais, a maioria dos cerâmicos e os polímeros, somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da microestrutura.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução. É limitado pelo diâmetro do feixe de elétrons e o

microvolume de interação com a amostra. Neste trabalho, a microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para a visualização dos produtos de hidratação.

Para a realização do ensaio de MEV, utilizou-se a infraestrutura do Centro de Microscopia Eletrônica (CME), pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que dispõe de um microscópio marca JEOL 5800 (Figura 17).



Figura 17 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Fonte: Elaboração Própria.

A preparação das amostras consiste, basicamente, em cortar pedaços de argamassas para que sejam dispostas sobre um adesivo de carbono e, posteriormente metalizadas por uma fina camada de ouro, pois a cinza não tem caráter condutor, como mostra a Figura 18.

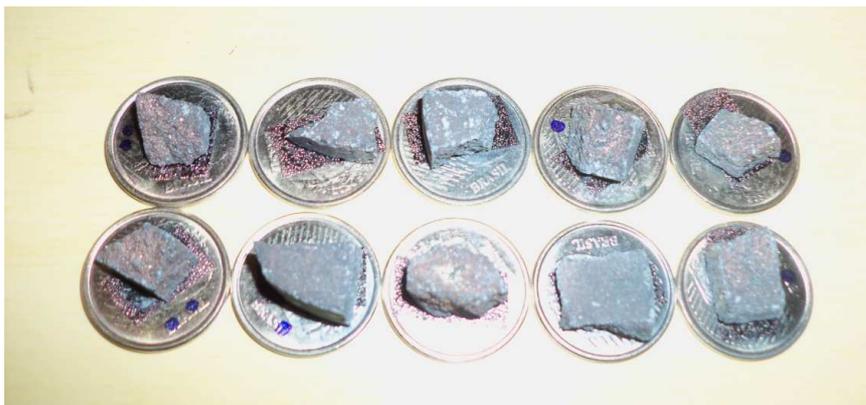


Figura 18 - Amostras dispostas sobre o adesivo para serem analisadas.

Fonte: Elaboração Própria.

3.6.4 Porosidade por Intrusão de Mercúrio

Para a realização desse ensaio, inicialmente deve-se moldar corpos de prova e, após, cortá-los em “fatias” com espessura não superior a 10 mm. Foram extraídas amostras de argamassas da parte central destas fatias e, em seguida, foram colocadas em um recipiente contendo éter, permanecendo imersas por 48 horas (Figura 19), com o intuito de remover a água que ficam nos poros. Decorrido o período de 48 horas, as amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura de 105°C, permanecendo nesta por 24 horas. Após sua completa secagem, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos apropriados; catalogadas e, então, enviadas para análise no Laboratório de Microestrutura da Escola Politécnica da USP.



Figura 19 - Amostras imersas em éter

Fonte: Elaboração Própria.

Para a realização do ensaio, as amostras retiradas dos corpos de prova foram colocadas em um recipiente dotado de capilar, sendo aplicado vácuo sobre o conjunto para retirar o ar. O recipiente e o capilar foram totalmente preenchidos com mercúrio. Com o aumento da pressão sobre o líquido, o mercúrio começa a penetrar nos poros da amostra, sendo possível obter uma curva porosimétrica, cujos resultados informam o volume de poros de material que foi penetrado pelo mercúrio em certo nível de pressão. Os parâmetros de ensaio adotados estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio

Parâmetros	Condições de ensaio	
	Baixa pressão	Alta pressão
Pressão de evacuação	50 μ mHg	-----
Tempo de evacuação	5 min	-----
Pressão de preenchimento por mercúrio	0,56 psia	-----
Tempo de equilíbrio	60 s	60s
Volume máximo intrudido	100 mL/g	100 mL/g
Ângulo de contato	130°	130°
Pressões limites (N/mm ²)	0,0038 – 0,1776	0,1776 – 412,1162

Fonte: Elaboração Própria.

Salienta-se que, em virtude dos custos elevados para a realização do ensaio, decidiu-se por analisar apenas os traços de Referência, 10 e 20 % Cinza com controle de queima (CCQ), 10 e 20% Cinza sem controle de queima (CSQ) e 10 e 20% de Sílica Ativa (SA).

3.6.5 Absorção e índice de vazios

Este ensaio foi realizado em corpos-de-prova de 50 x 100 mm, com argamassa 1:3 de referência e com argamassas contendo cinza de casca de arroz e sílica. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR: 9778/2005: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Para a realização desse ensaio foi utilizado três corpos-de-prova para cada traço ensaiado.

Na Figura 20 é possível visualizar o andamento do ensaio, durante a saturação total dos corpos de prova.



Figura 20 - Ensaio de absorção por imersão

Fonte: Elaboração Própria.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3, quanto à caracterização das cinzas de casca de arroz estudadas, bem como o comportamento de argamassas, com e sem adições, tanto no estado fresco, quanto endurecido.

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A técnica de difração de raios é indicada na determinação das fases cristalinas presentes nos materiais, ou seja, é utilizada para se obter informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos (DAL MOLIN, 2010). A interpretação dos resultados requer um software com um banco de dados referente às fichas padrão para comparação com o difratograma coletado.

Dessa forma, a Gráfico 2 apresenta os resultados oriundos do ensaio de DRX para a cinza com controle de temperatura na queima. Observa-se que o material passa a apresentar uma estrutura predominante amorfa, representada no difratograma pelo alargamento dos picos e aparecimento de bandas. De acordo com Dal Molin (2011), a queima controlada possibilita a obtenção de cinzas amorfas de alta pozolanicidade.

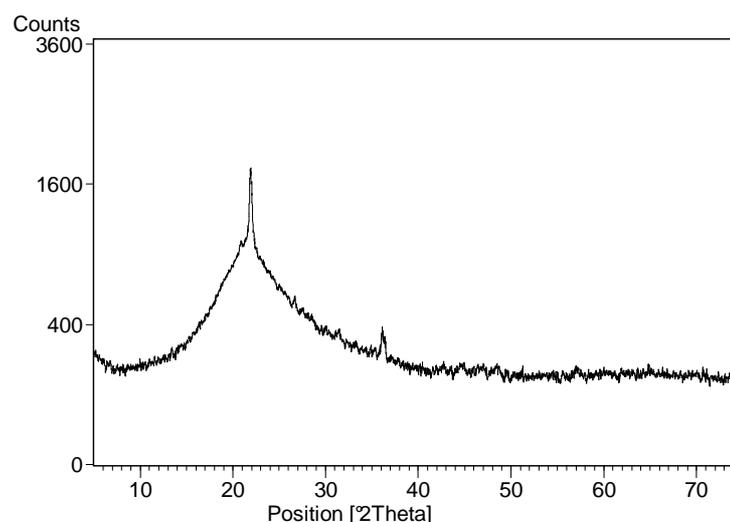


Gráfico 2 - Difratograma da CCA com controle de queima

Fonte: Elaboração Própria.

Já o Gráfico 3 apresenta os resultados obtidos para a cinza sem controle de temperatura de queima. Nota-se que o difratograma apresenta picos cristalinos característicos, indicando que o material analisado não é totalmente amorfo, pois apresenta alguma cristalinidade. Conforme mencionado em Dal Molin (2011), cinzas provenientes de combustão não controlada geralmente contêm uma grande proporção de minerais de sílica não reativos (cristalinos) e de baixo valor pozolânico, devendo ser micronizadas para desenvolver a atividade pozolânica.

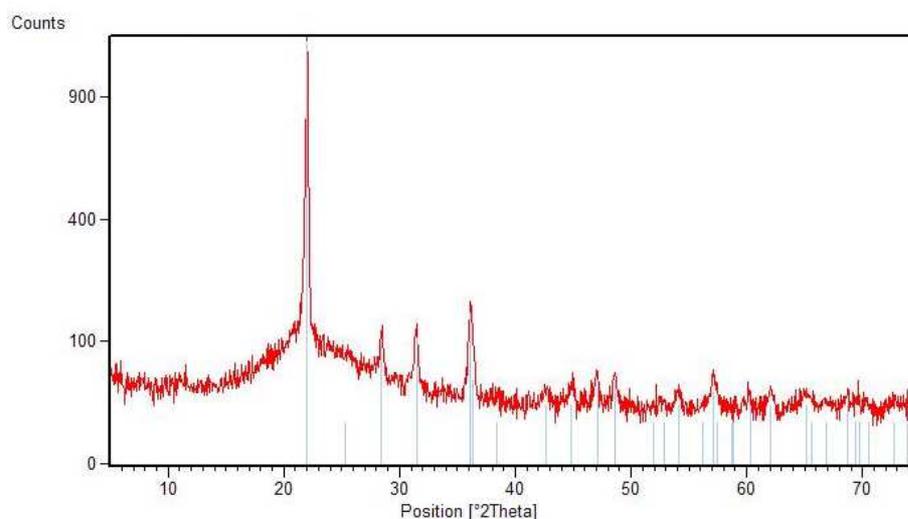


Gráfico 3 - Difratograma da CCA sem controle de queima

Fonte: Elaboração Própria.

4. 2 ESPECTROMETRIA DE RAIOS X (EDX)

Os resultados referentes aos ensaios de espectrometria de raios X estão apresentados na Tabela 9. Verifica-se que a CCA com controle na queima contém aproximadamente 90% de sílica. Os resultados se mostram coerentes, visto que outros trabalhos como Cordeiro (2009) e Pouey (2006) afirmam que o controle da temperatura na queima da CCA resulta em uma cinza com alto teor de componentes amorfos.

Com referência à CCA sem controle de queima, verifica-se que esta cinza, obteve uma porcentagem de sílica de 88%. É importante salientar que o material analisado foi selecionado a partir da retirada de amostras em pontos estratégicos no interior do forno. Portanto, a amostra selecionada não é representativa com relação à quantidade total de material oriundo da queima sem controle de temperatura.

Tabela 9 - Espectrometria de Raio X da CCA (com e sem controle)

Cinza de Casca de Arroz	Si	K	Ca	Mn	Fe	Rb	Cu	Zn	Br
Queima Controlada	89,8%	6,3%	1,9%	1,6%	0,2%	-	-	-	-
Sem Controle de Queima	88,0%	7,0%	2,2%	1,9%	0,6%	0,1%	0,1%	0,1%	0,04%

Fonte: Elaboração Própria.

4.3 PERDA AO FOGO

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio para verificação da perda ao fogo, realizado segundo as recomendações da NBR NM 18/2012. Verifica-se que a cinza de casca de arroz com queima controlada ficou dentro do limite estabelecido pela norma NBR NM 18/2012. Tal fato não ocorreu com a cinza de casca de arroz sem controle de queima, pois ultrapassou o limite máximo exigido nesta norma, ou seja, superior a porcentagem máxima de 10%.

Valores elevados de perda ao fogo para qualquer tipo de amostra a ser utilizada em argamassas ou concretos pode implicar na atenuação da quantidade de sílica e ainda em elevados teores de carbono contidos, e como consequência, reduzir a atividade pozolânica.

Tabela 10 - Perda ao Fogo da CCA (com e sem controle de queima)

Propriedade	NBR 12653	Queima Controlada	Sem Controle de Queima
Perda ao Fogo (% máx)	10	3,62	10,76

Fonte: Elaboração Própria.

4.4 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND

Os resultados encontrados nos ensaios da determinação da atividade pozolânica com o cimento Portland, seguindo as recomendações da norma NBR 5752/1992, bem como as resistências médias e a quantidade de água requerida, encontram-se na Tabela 11.

A argamassa de referência produzida para comparação entre os dois tipos de CCA obteve resistência média, aos 28 dias, de 11,61 MPa.

Observa-se a partir desses resultados (Tabela 11) que os índices de atividade pozolânica para as duas CCA encontram-se em conformidade com a Norma NBR 12653/1992: Materiais Pozolânicos, ou seja, as duas CCA (com e sem controle) obtiveram valores superiores aos 75%.

Tabela 11 - Índice de atividade pozolânica da CCA (com e sem controle)

Tipo de Cinza	Resistência Média (MPa)	IAP (%)	Água Requerida (%)
Queima Controlada	13,97	120,25	106,06
Sem Controle de Queima	9,84	84,73	115,00

Fonte: Elaboração Própria.

Verifica-se que apesar da CCA sem controle ter obtido um IAP superior a 75%, esta teve sua resistência abaixo da resistência com a CCA com controle. E também, observa que a CCA com controle ultrapassou a resistência da argamassa padrão, ou seja, superior aos 11,61 MPa, concluindo-se que esta cinza aumenta a resistência de argamassa com adição no seu proporcionamento. E ainda, observa-se que a quantidade de água requerida para confeccionar a argamassa com CCA sem controle ultrapassa a recomendação da norma NBR 12653/1992, ou seja, superior aos 110 (%), assim se caracterizando como um material não pozolânico.

4.5 MASSA ESPECÍFICA

A Tabela 12 apresenta as determinações das massas específicas das CCA (com e sem controle). Os valores obtidos são semelhantes aos encontrados na literatura, ou seja, normalmente, a CCA com controle de queima possui uma massa específica menor em relação à massa da CCA sem controle de queima.

Agopyan (1991) encontrou valores que variavam na faixa de 1,88 a 2,11 g/cm³, faixa esta semelhante à encontrada na pesquisa.

Tabela 12 - Massa específica da CCA (com e sem controle)

Cinza de Casca de Arroz	Queima Controlada	Sem Controle de Queima
Massa Específica (g/cm ³)	2,03	2,1

Fonte: Elaboração Própria.

4.6 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O Gráfico 4 mostra a distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA com controle de temperatura na queima. Observa-se que a amostra possui uma distribuição com concentração de partículas próxima de 10 μ m e uma concentração que se apresenta de modo irregular em 20 μ m, com diâmetro médio das partículas de 13,53 μ m.

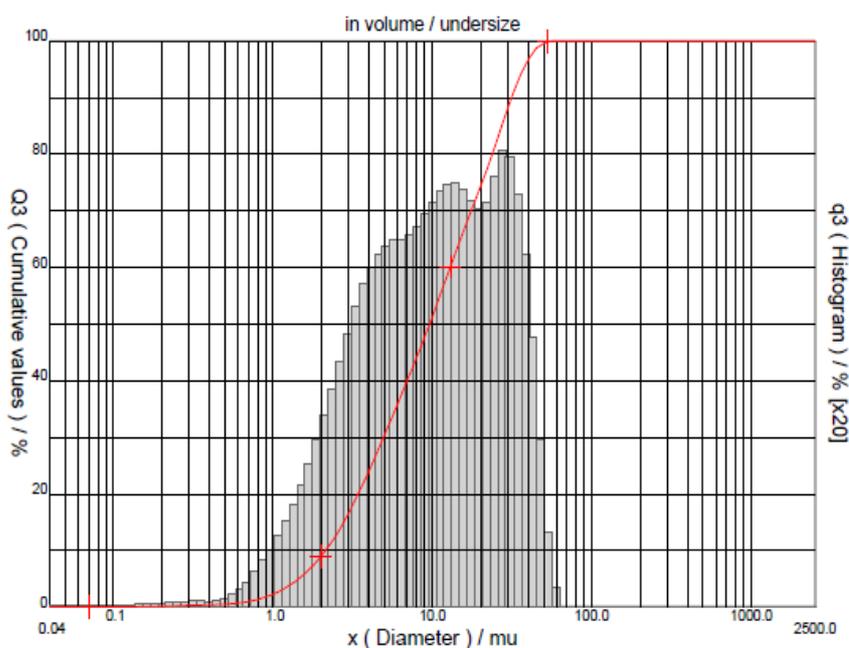


Gráfico 4 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA com controle de temperatura na queima

Fonte: Elaboração Própria.

O Gráfico 5 mostra a distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA sem controle de temperatura na queima. Nota-se uma distribuição com concentração de partículas próxima de 100 μ m, com diâmetro médio de 44,20 μ m. Percebe-se que a CCA sem controle de queima obteve um acréscimo da ordem de 30,61% em relação ao diâmetro médio da CCA com controle de queima, assim sendo uma partícula muito maior

em relação à CCA com controle de queima.

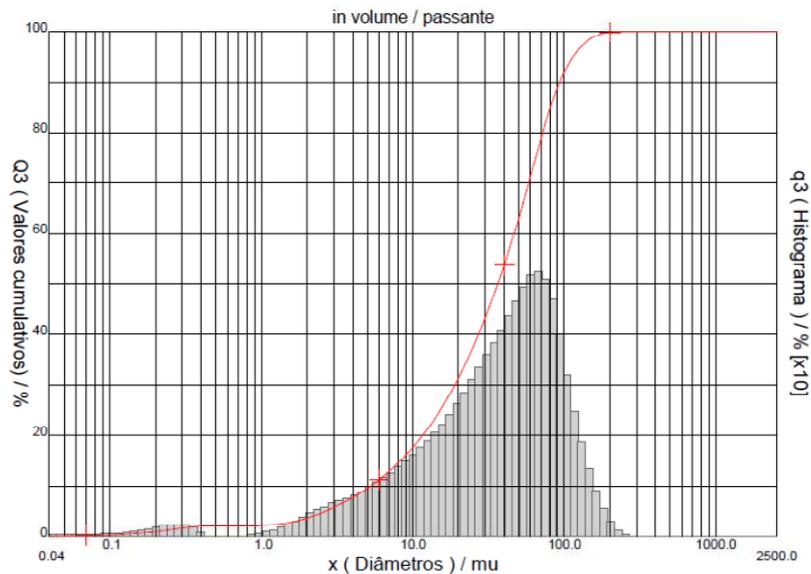
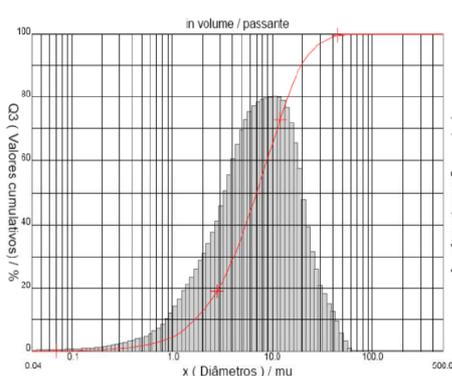


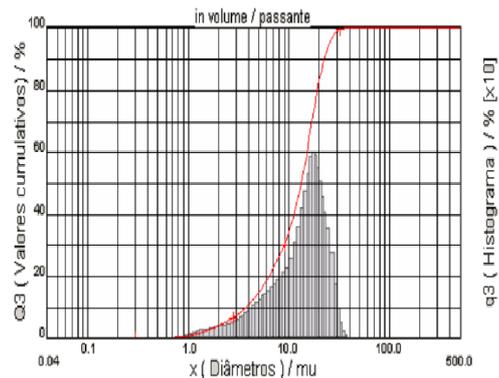
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA sem Controle de Queima

Fonte: Elaboração Própria.

Souza (2008) que utilizou uma CCA com controle de queima obteve uma distribuição de tamanho das partículas com comportamento monomodal, com concentração de partículas em torno de $10\mu\text{m}$, ver Gráfico 6 (a). Já Tiboni (2007) que também trabalhou com uma CCA com controle de queima obteve um tamanho médio de $13,4\mu\text{m}$, conforme Gráfico 6 (b).



(a) Souza (2008, p.82)



(b) TIBONI (2007, p.133)

Gráfico 6 - Distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA

Portanto, percebe-se que os resultados obtidos, com referência à forma da distribuição granulométrica, são bastante similares aos encontrados na literatura,

diferenciando-se apenas os tamanhos médios das partículas.

4.7 ENSAIOS NA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

4.7.1 Índice de Consistência

A Tabela 13 apresenta os valores para relação água/aglomerante e índice de consistência das argamassas realizadas conforme a norma NBR 13276/2002. Nota-se que quanto maior a quantidade de finos no proporcionamento das argamassas, menor o índice de consistência e, por consequência, menor a sua trabalhabilidade, independente do tipo de adição.

A perda de consistência nas argamassas com incorporação de finos esta ligada ao fato de que a quantidade de água para amassamento permaneceu se constante. Para manter a trabalhabilidade seria necessário aumentar o consumo de água devido à elevada superfície específica desses materiais. No entanto, neste trabalho optou-se por fixar a quantidade de água, em 0,51 para todos os traços das argamassas.

Tabela 13 - Relação água /aglomerante e Índice de Consistência

Traços	Relação água/aglomerante	Índice de Consistência (mm)
Referência	0,51	228,25
10% CCA Com Controle de Queima (CCQ)	0,51	214,25
15 % CCA Com Controle de Queima (CCQ)	0,51	199,50
20% CCA Com Controle de Queima (CCQ)	0,51	199,50
10% CCA Sem Controle de Queima (CSQ)	0,51	198,75
15 % CCA Sem Controle de Queima (CSQ)	0,51	195,75
20% CCA Sem Controle de Queima (CSQ)	0,51	179,25
10% Sílica Ativa (S.A)	0,51	198,00
15% Sílica Ativa (S.A)	0,51	184,75
20% Sílica Ativa (S.A)	0,51	170,75

Fonte: Elaboração Própria.

4.8 ENSAIOS NA ARGAMASSA NO ESTADO TÉRMICO

4.8.1 Avaliação da Curva de Liberação de Calor de Hidratação

Para a avaliação da curva de liberação de calor de hidratação percebe-se um comportamento muito semelhante ao encontrado por Alves (2002), ou seja, conforme aumenta-se a porcentagem de pozolana, a cinética de hidratação é mais lenta.

Os Gráficos 7, 8 e 9 apresentam, respectivamente, as curvas de liberação de calor das argamassas nas porcentagens de 10%, 15% e 20% das substituições, todas comparadas ao traço padrão. Para facilitar a visualização gráfica dos resultados, optou-se pela utilização de linhas de tendência polinomiais de 2ª ordem.

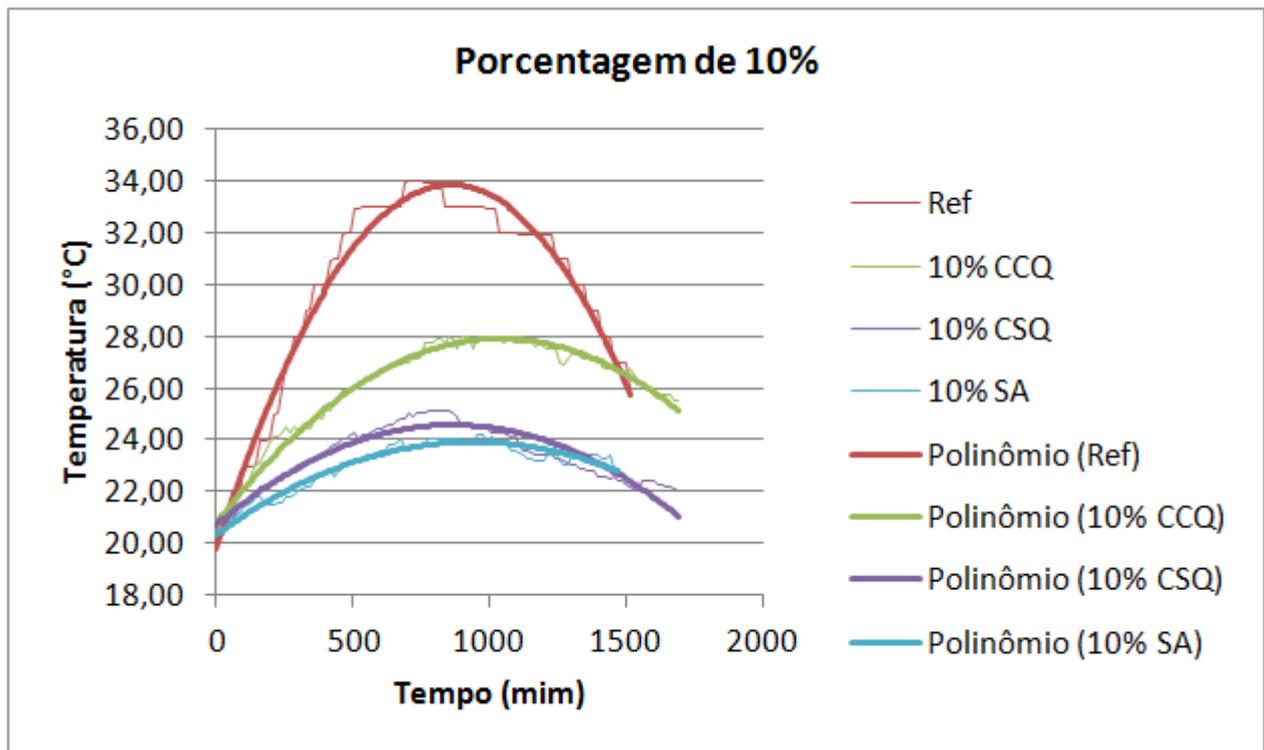


Gráfico 7 - Curvas de Calor de Hidratação nas porcentagens de 10%

Fonte: Elaboração Própria.

Nota-se pelo Gráfico 7 que o traço com 10% de CCA com controle de queima (CCQ) foi o que apresentou maior liberação de calor, com uma curva onde o maior pico de temperatura encontra-se aos 28°C. Ao se comparar com o traço padrão houve uma diminuição de 17,64% de temperatura. A porcentagem de 10% da CCA sem controle de

queima (CSQ) obteve um pico de temperatura menor que a outra CCA analisada, ficando em torno de 25°C, e apresentou uma redução da ordem de 26,47% ao traço referência. E a curva com a sílica ativa (SA) foi a que apresentou a curva menos acentuada em relação a todas as demais com redução de 29,41% em relação ao traço de referência.

No Gráfico 8 percebe-se que todos os traços com a substituição de 15% adquiriram curvas muito semelhantes entre si, com os picos de temperatura máxima muito próximo de 23°C. As substituições de 15% também seguem o mesmo comportamento de 10% apresentando valores de temperatura menores que a curva de referência, sendo que em média a redução foi de aproximadamente 32,35%.

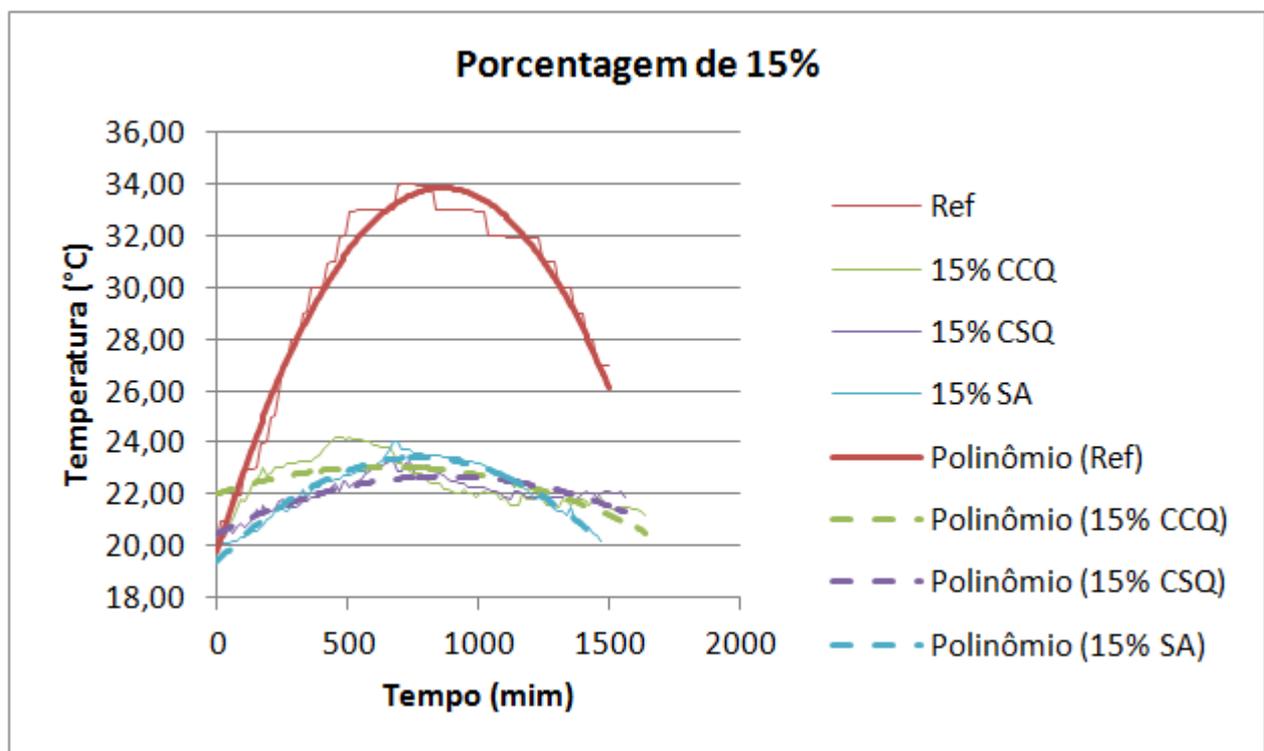


Gráfico 8 - Curva de Liberação de Calor nas porcentagens de 15%

Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com o Gráfico 9 é possível observar as curvas de liberação de calor de hidratação das argamassas com substituições de 20%. É possível analisar que as curvas são menos acentuadas em relação às demais porcentagens, onde os picos de temperatura encontram-se de 20°C a 23°C. A diminuição de temperatura é da ordem de 35,29% em relação ao traço de referência. É notável que à medida em que se aumentou o teor de substituição encontraram-se curvas com menores acentuações de temperatura

e também obtiveram menores calores gerados nas primeiras horas do ensaio.

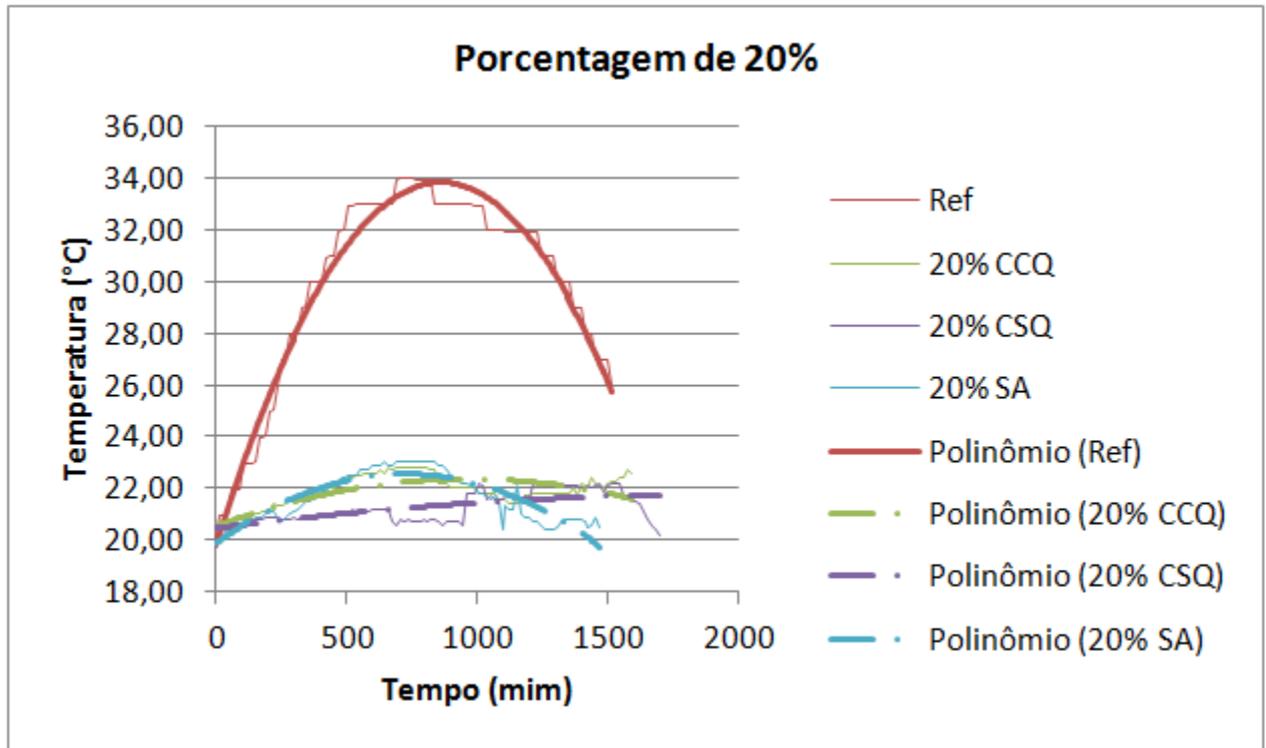


Gráfico 9 - Avaliação da Curva de Liberação de Calor na porcentagem de 20%

Fonte: Elaboração Própria.

4.9 Ensaios na Argamassa no Estado Endurecido

Salienta-se que para os ensaios mecânicos no estado endurecido, os resultados passaram por um tratamento de espúrio estatístico para a eliminação de resultados fora do desvio padrão. Lembrando mais uma vez que os resultados foram obtidos através de uma média aritmética de três corpos-de-prova.

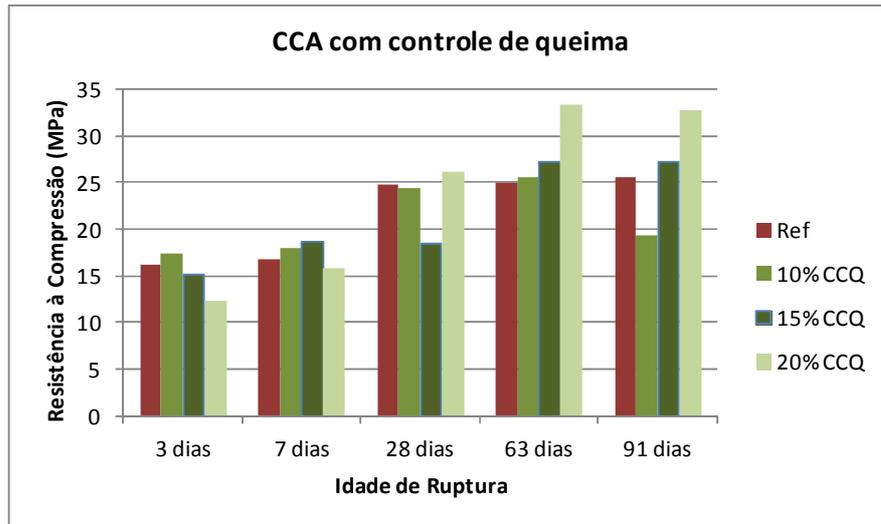
4.9.1 Resistência à compressão simples

Os Gráficos 10(a), 10(b) e 10(c) apresentam um estudo comparativo entre os resultados de resistência à compressão do traço referência com os resultados obtidos dos traços contendo adições, em diferentes idades. Por meio de análise do Gráfico 10(a) é possível observar que nas primeiras idades, as argamassas com adição de cinza com controle de queima apresentaram resistência semelhante ou um pouco acima ou abaixo do traço referência. No entanto, para idades mais avançadas (63 e 91 dias), os traços com cinza obtiveram resistência acima do traço referência, com exceção do traço

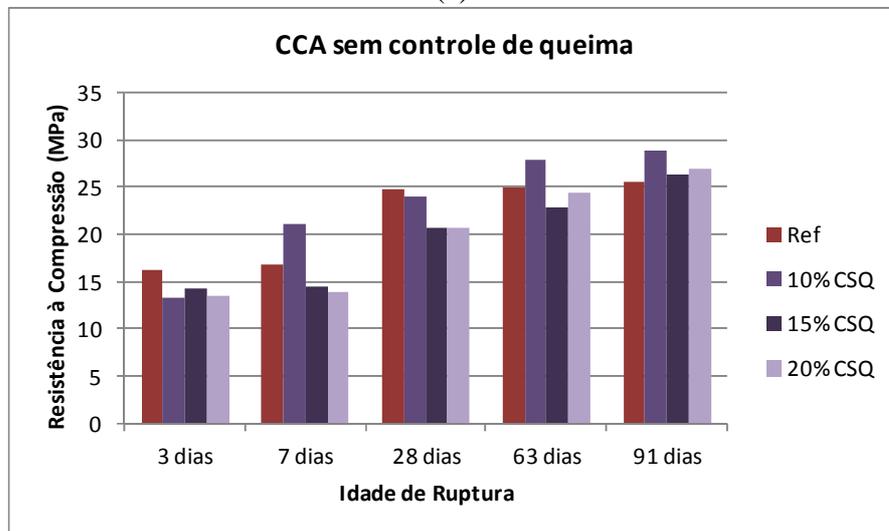
contendo 10% de adição, aos 91 dias, que apresentou uma resistência bem abaixo do esperado. Acredita-se que este comportamento diferenciado pode ser resultado de um ruído experimental no resultados, que não conseguiu ser eliminado durante o tratamento de valores atípicos. De maneira geral, pode-se concluir que a cinza, por ser um material pozolânico, apresenta uma taxa de reação baixa nas primeiras idades, no entanto, em idades mais avançadas a reação pozolânica é o fator dominante, resultando em resistências maiores.

Com referência ao Gráfico 10(b), que compara o valor referência com o traço contendo cinza de casca de arroz sem controle de queima, observa-se novamente que nas primeiras idades, a resistência do traço referência foi superior as dos traços com adição (com exceção do traço com 10 % de adição aos 7 dias). Nota-se também um pequeno aumento da resistência em idades mais avançadas, principalmente, na idade de 91 dias, no entanto, menos expressivo que os obtidos nos traços de CCA com controle de queima.

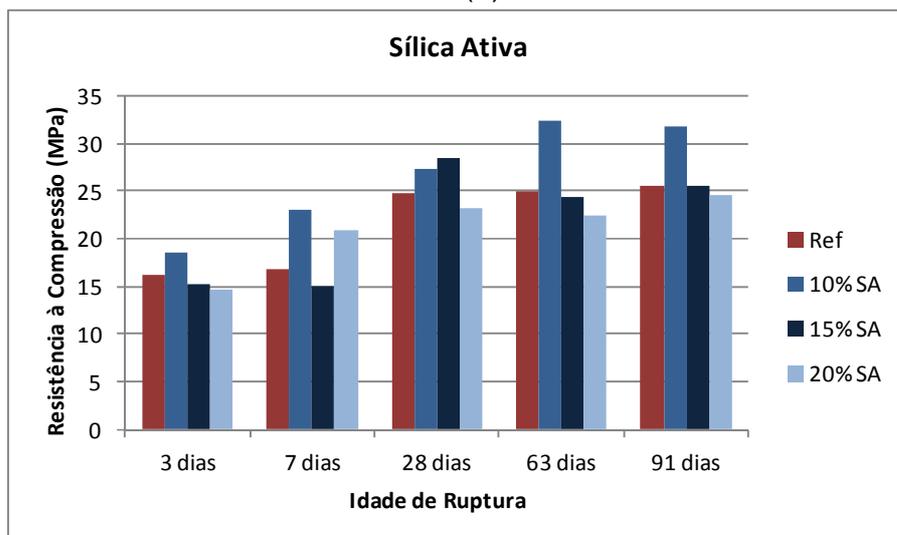
O Gráfico 10(c) apresenta os resultados obtidos pela adição de sílica ativa, em comparação com o traço referência. Verifica-se que o traço em destaque foi o que continha 10% de adição, resultando em resistências maiores em todas as idades. De fato, Malhotra e Mehta (1996) chegaram à conclusão que o teor ótimo de sílica ativa, por exemplo, no concreto, varia de 7 a 10%, podendo em algumas situações especiais, chegar a teores de 15%. Vale lembrar que o diâmetro médio das partículas de sílica ativa é aproximadamente 2 ordens de magnitude mais finas que a partícula de cimento (Dal Molin, 2005). Por isso, maiores quantidades de sílica ativa ao traço, aumentam consideravelmente a necessidade de água no material. Salienta-se que neste trabalho, a relação água-aglomerante foi mantida constante para todos os traços e não se fez uso de aditivos redutores de água à mistura, o que dificultou o manuseio e trabalhabilidade dos traços com grandes porcentagens de sílica ativa.



(a)



(b)

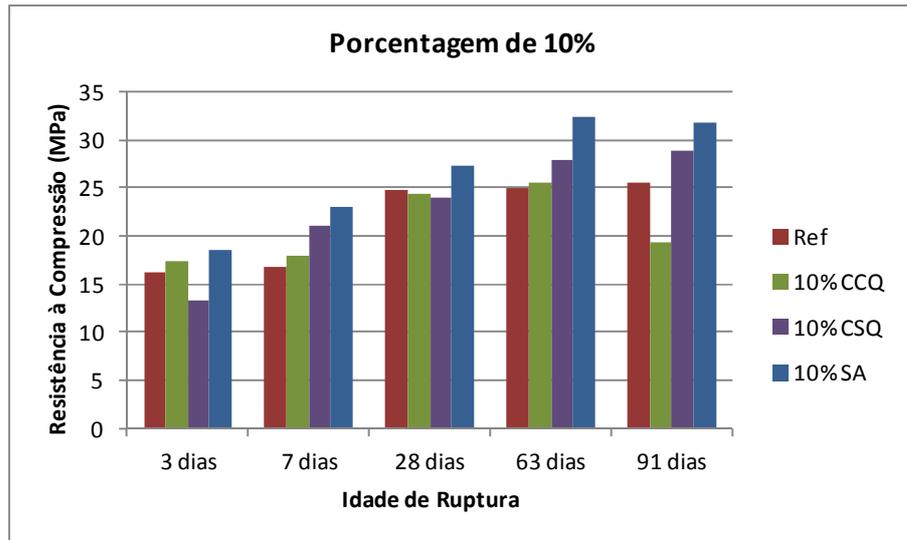


(c)

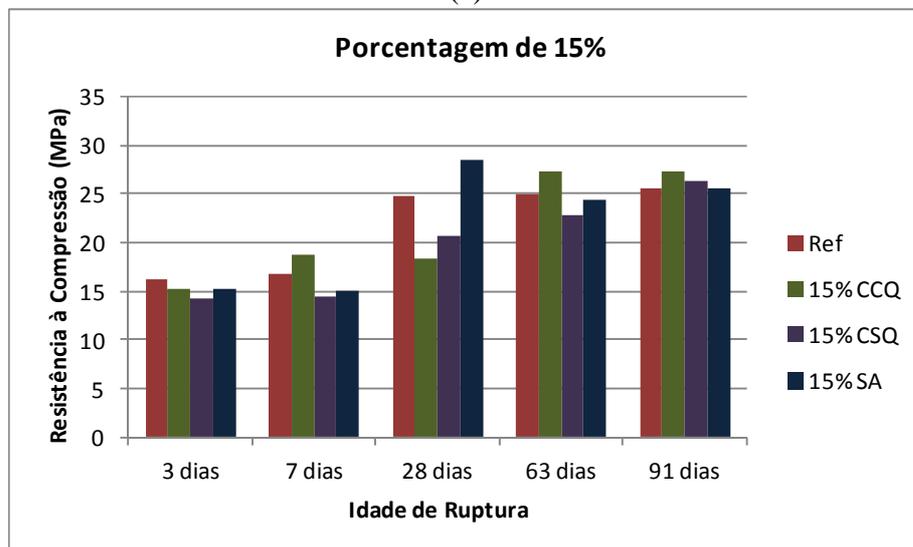
Gráfico 10 – Resistência à Compressão Simples

Fonte: Elaboração Própria.

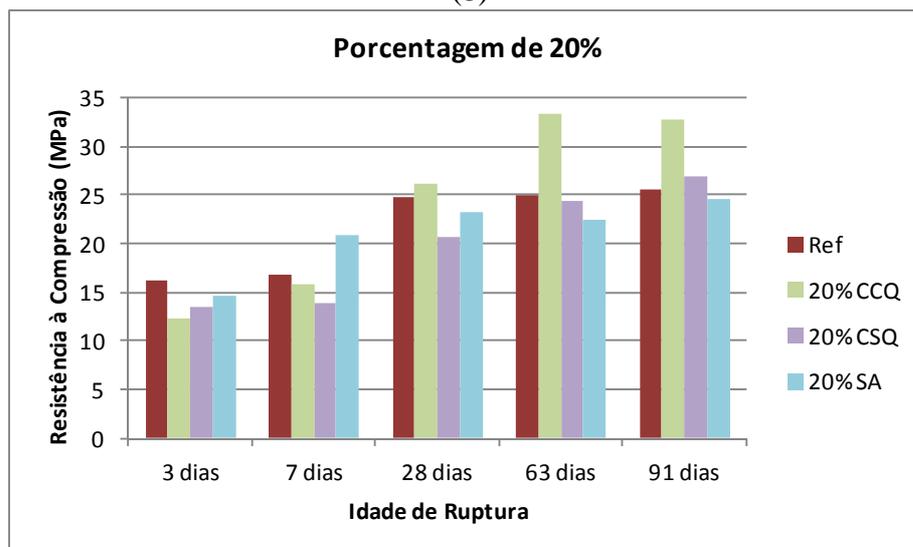
Os Gráficos 11(a), 11(b) e 11(c) apresentam um estudo comparativo entre as diferentes adições e o traço referência. Para os traços com 10% de adição (Gráfico 11(a)), como esperado, a sílica ativa se mostrou a mais eficaz, em termos de resistência mecânica, seguida pelo traço com CSQ e CCQ. No entanto, devido à sua alta pozolanicidade, esperava-se que a cinza com controle de queima (CCQ) atingisse valores intermediários entre a SA e CSQ, mas isso não aconteceu. Um maior número de ensaios deverá ser realizado para entender o comportamento destes materiais. Com referência aos 15% de adição (Gráfico 11(b)), os resultados se mostraram bem dispersos nas primeiras idades. Em idades mais avançadas tiveram resultados semelhantes ao traço referência. Nos traços com 20% de adição (Gráfico 11(c)), a cinza com controle de queima foi a que apresentou a maior resistência em idades mais avançadas, comportamento este já esperado. Lembrando mais uma vez que para todos os traços foram realizados o tratamento de espúrio para a eliminação de valores fora do desvio padrão conforme Anexo 1.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 11 - Resistência à Compressão Simples- Porcentagens

Fonte: Elaboração Própria.

4.9.2 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

A seguir são mostrados os resultados médios de resistência à tração na flexão das argamassas (Gráfico 12). Verifica-se que para os traços de 10% e 15% de CCA com controle de queima (CCQ) os resultados são superiores ao traço de referência e um decréscimo de resistência no traço de 20%. No entanto, poder-se-ão ocorrer aumento da resistência para idade mais elevadas, pois acredita-se que com esta proporção (20%) ainda não houve tempo o suficiente para que ocorra a hidratação na massa da argamassa.

Para a CCA sem controle de temperatura (CSQ) houve uma inversão no traço de 20% na curva de crescimento da resistência, levando-se a “crer” de que tal comportamento deve-se ao preenchimento dos vazios, deixando uma matriz mais compacta conforme se aumenta o teor de CCA em idades mais avançadas.

O comportamento da sílica ativa (SA) já era o esperado, sendo que estudos anteriores já comprovaram que a porcentagem adequada para a utilização da sílica ativa é de 10% aproximadamente, pois o aumento da mesma não proporciona o incremento de elevadas resistências.

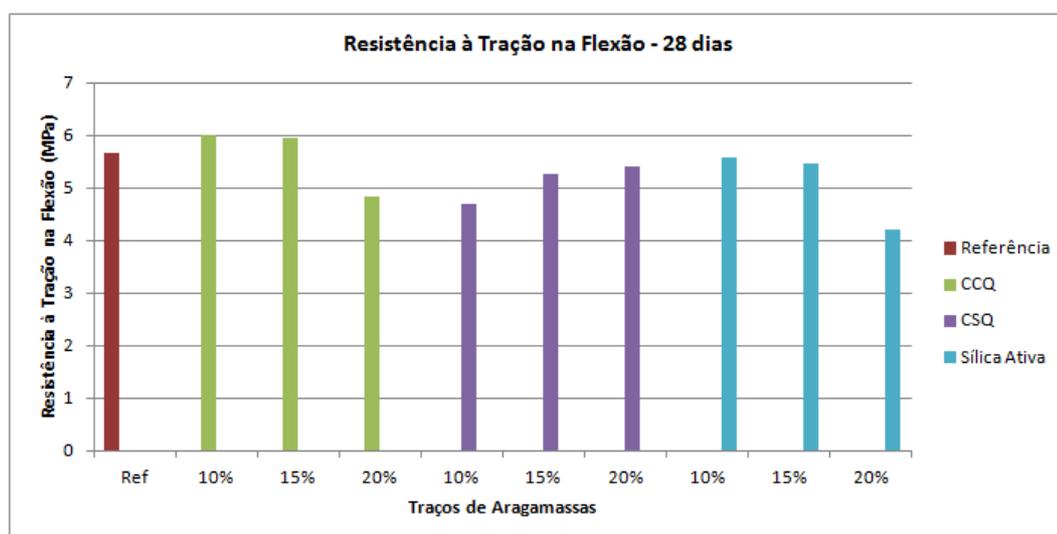


Gráfico 12 - Resistência à Tração na Flexão

Fonte: Elaboração Própria.

Analisando a resistência à compressão simples obtida através dos corpos de prova prismáticos (Gráfico 13) observa-se um comportamento inverso aos resultados obtidos com os ensaios de tração na flexão para dois tipos de argamassa com CCA estudada.

Nota-se que para a CCQ houve um acréscimo de resistência conforme se aumentou o teor de substituição, o que aconteceu o contrário no ensaio de resistência à tração na flexão. Para a CSQ ocorreu o contrário para a resistência à tração ocorreu um aumento de resistência conforme se aumentou o teor de substituição e na resistência a compressão uma diminuição na medida em que o teor de adições aumentou. A sílica ativa permaneceu com o mesmo comportamento nos dois ensaios.

Lembrando que foram realizados 2 ensaios para determinar a resistência a compressão simples, o primeiro teve como base a norma NBR 7215/1996, para corpos de prova cilíndricos de 5,0 x 10cm (Gráfico 14). A segunda moldagem para os corpos de prova utilizou-se a norma atualizada e modificada NBR 13279/2005 para argamassas, que passaram a ser prismáticos de com as dimensões de 4,0 x 4,0 x 16 cm.

É importante verificar que ao se comparar a norma do cimento com a nova norma de argamassas está relação entre a base e altura do corpo de prova. Portanto, na norma NBR 7215/1996 tem-se uma relação de 2 entre estas dimensões, enquanto que na norma NBR 13279/2005 esta relação passa para 1.

Nesse sentido, a relação de altura diâmetro do corpo de prova de 2 para 1, a resistência à compressão aumenta em até 20% (NEVILLE, 1997) fato que foi comprovado neste estudo, devido aos resultados dos corpos de prova prismáticos resultaram em valores menores que os corpos-de-prova cilíndricos.

Percebe-se que em relação aos dois tipos de corpos-de-prova ocorreu um comportamento muito semelhante entre os traços. Exceto para os traços de 15% CCQ e 15% SA onde para a CCA com controle de queima nesse percentual o ensaio da NBR 7215/1996 (Gráfico 14) obteve um valor abaixo em relação ao ensaio da NBR 13279/2005 (Gráfico 13). Para o traço de 15% SA ocorreu o contrário o corpo-de-prova prismático obteve um resultado abaixo do encontrado no corpo-de-prova cilíndrico. Para os resultados obtidos nesses gráficos pode ser verificar a média dos três corpos-de-prova e o tratamento de espúrio que foi aplicado nos resultados no Anexo 2.

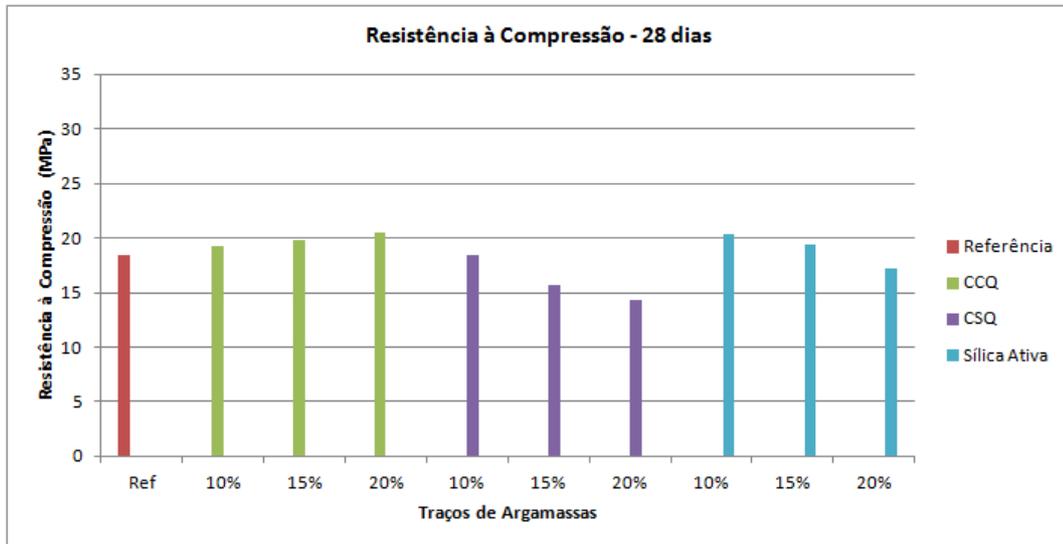


Gráfico 13 - Gráficos de Resistência à Compressão – CPs Prismáticos

Fonte: Elaboração Própria.

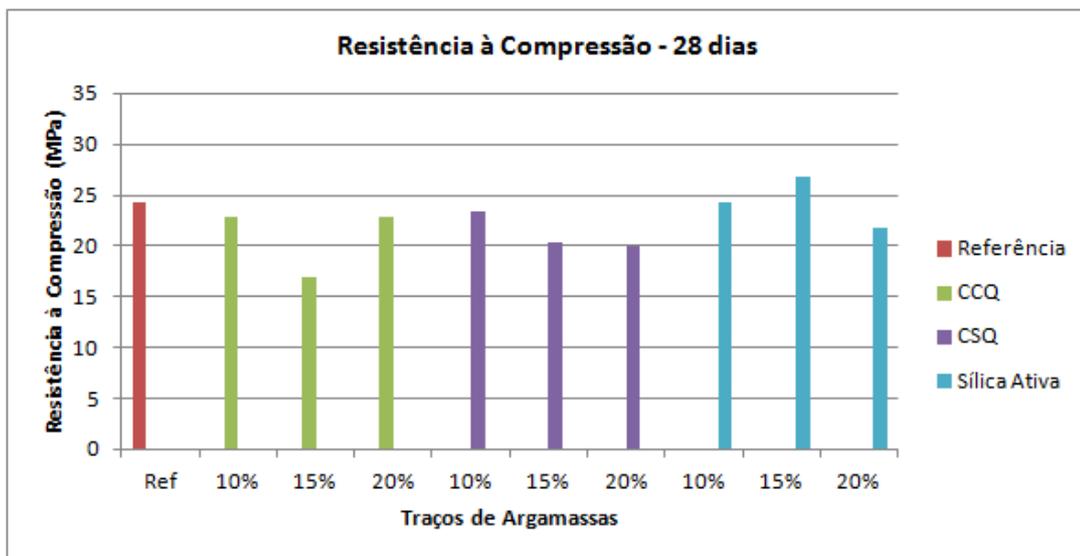


Gráfico 14 - Gráficos de Resistência à Compressão – CPs Cilíndricos

Fonte: Elaboração Própria.

4.9.3 Investigação da microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Cabe salientar que essas amostras foram analisadas na idade de 56 dias para todos os traços. Para a análise da microestrutura das argamassas procurou se analisar

com os resultados obtidos por Tashima (2006) devido a semelhança entre os trabalhos. Como encontrado na referência pode se identificar os cristais de Etringita (pequenos filamentos finos) como mostra a Figura 21.

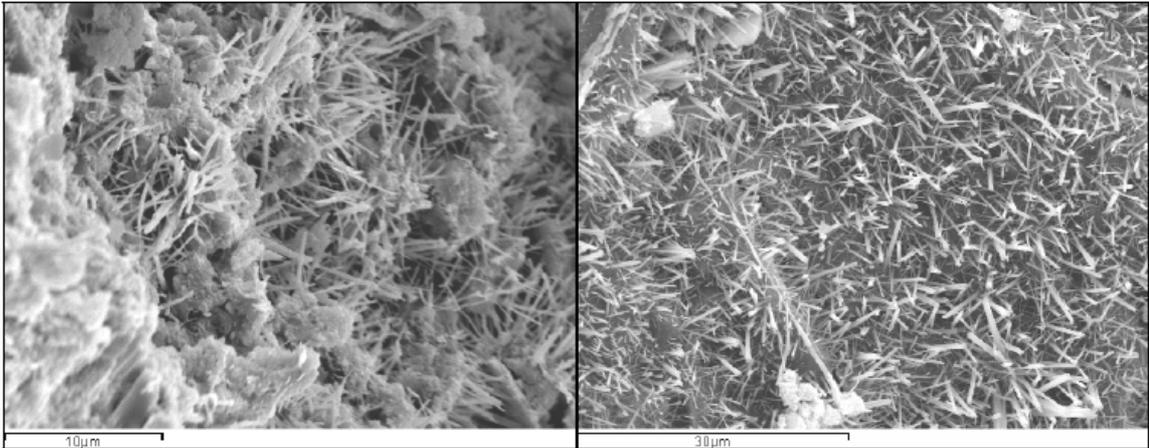


Figura 21 - Etringita nas pastas de cimento com 10% SA com três dias de cura

Fonte: Tashima (2006, p.65).

A seguir serão mostradas algumas fotos tomadas das argamassas para a visualização da formação dos produtos de hidratação. Na Figura 21 mostra o traço de referência, onde percebeu-se uma estrutura com muitos produtos de hidratação C-S-H.

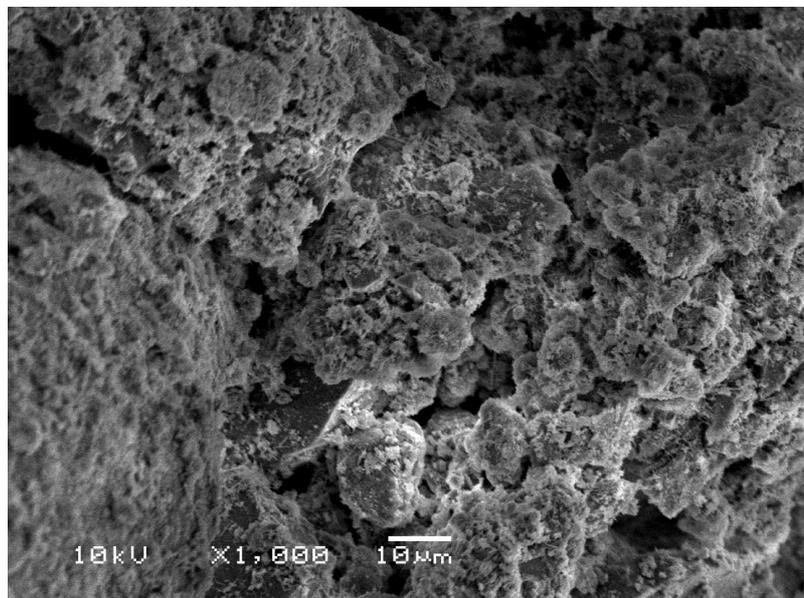


Figura 22 - Traço Referência - Amostra com ampliação de 1,000x

Fonte: Elaboração Própria.

Para os traços de cinza de casca de arroz com queima controlada pode ser perceber uma presença de cristais de Etringita conforme se aumentou o teor de

substituição. No traço de 10% CCQ (Figura 23) é notável a presença de produtos de hidratação como indica a seta vermelha, o que nos leva a crer que nessa idade ainda está acontecendo reações de hidratação tardia, isso se comprova quando se analisa a resistência à compressão que até os 63 dias de idade, observa-se um aumento de resistência.

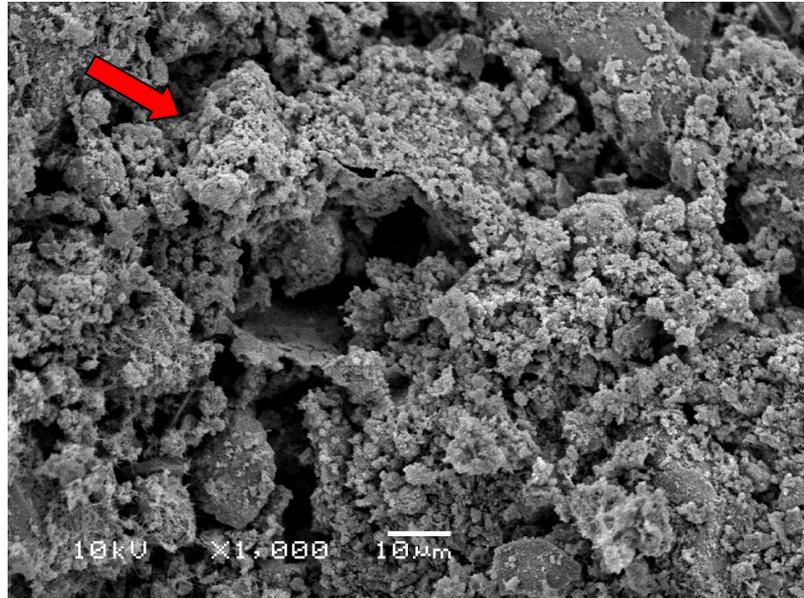


Figura 23 - Traço 10% CCQ - Ampliação de 1,000x

Fonte: Elaboração Própria.

Para o traço com teor de substituição de 15% (Figura 24) já é visível uma maior presença de filamentos de Etringita quando comparado com o teor de 10%. Compreende que nessa porcentagem está ocorrendo hidratações tardias. As argamassas com cinza de casca de arroz apresentam aumento em idades avançadas de ruptura o que reforça as imagens de microestrutura onde está ocorrendo hidratações dessa argamassa ainda nessa idade.

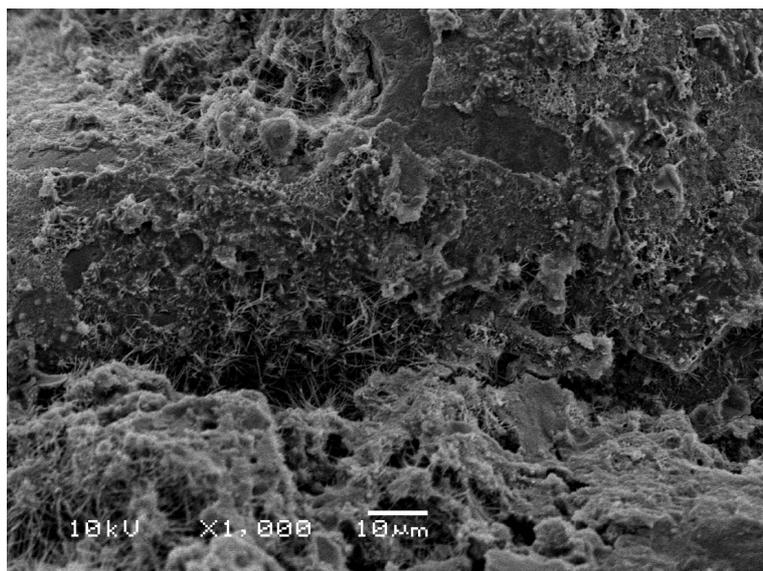


Figura 24 – Traço 15% CCQ - Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Para o traço de 20% CCQ (Figura 25), é possível notar um aumento da presença de Etringita com produtos de hidratação em relação aos outros traços com a CCA com controle de temperatura. Também é possível notar a presença de uma fissura indicada na imagem, essa fissura é gerada pela retração devido a se manter a mesma relação a/aglomerante e a CCA possuir um diâmetro médio de 13,53 µm o que acarreta em um refinamento dos poros.

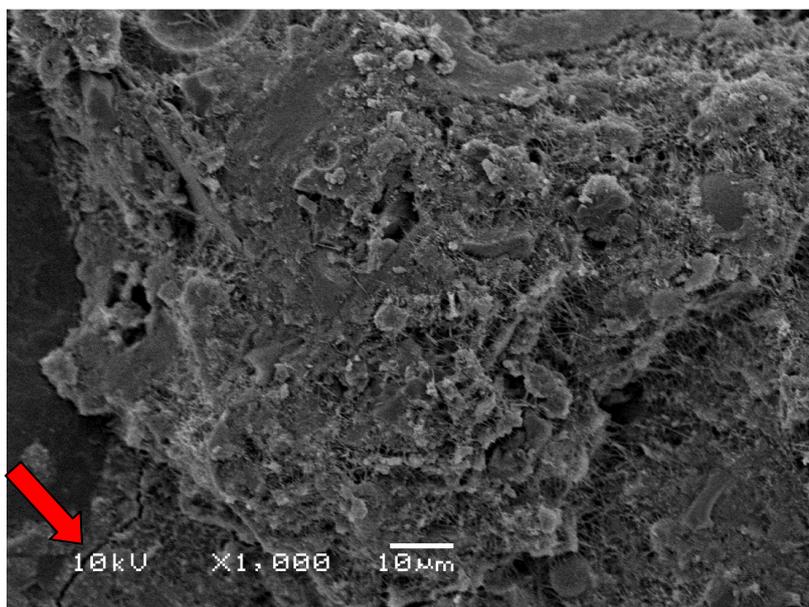


Figura 25 – Traço 20% CCQ – Ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Para as amostras de cinza de casca de arroz sem controle de queima (CSQ) encontrou-se um comportamento parecido com a cinza de casca de arroz com controle, onde se aumentou a porcentagem de cinza CCA aumentou a presença de Etringita (C6 ASH32) e produtos de hidratação. Para o traço de 10% (Figura 26) nota-se que não há grande presença de Etringita, apenas produtos de hidratação do cimento. Acredita-se que por essa CCA não possuir um índice de atividade pozolânico significativo, a mesma preencheu melhor a estrutura devido ao seu efeito fíler.



Figura 26 – Traço 10% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Para o traço de 15% CSQ (Figura 27) pode se notar o mesmo comportamento encontrado no traço de 10% CSQ, presença dominante de produtos de hidratação e alguns pequenos pontos com presença de Etringita. Mais uma vez esses produtos de hidratação demonstram que ainda está se formando cristais tardios o que comprova o aumento de resistência à compressão em idades de 63 e 91 dias de ruptura.

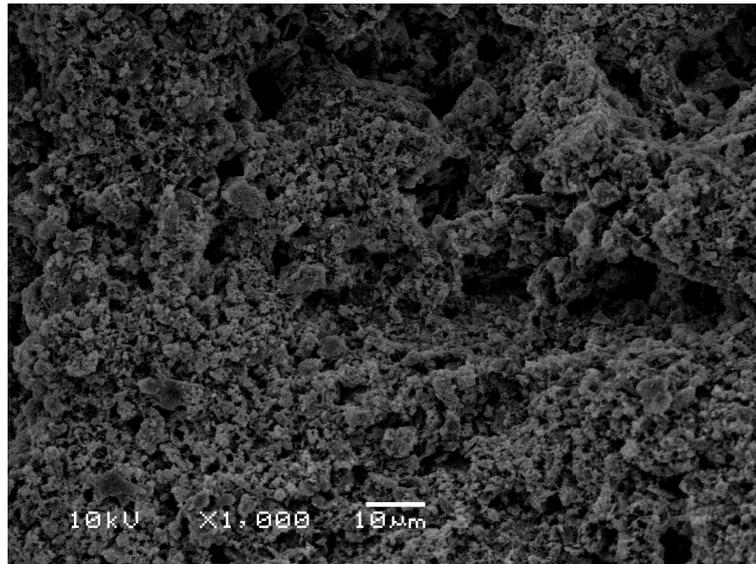


Figura 27 – Traço 15% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Com o traço de 20% CSQ, Figura 28, é possível notar a maior presença de filamentos de Etringita e produtos de hidratação. Acredita-se pelo aumento de CCA em relação aos outros traços de 10% e 15%, esse obteve hidratações mais tardias devido a CCA retardar essas reações. Nessa porcentagem de 20% também é visível a presença de pequenas fissuras, fissuras essas que são menores quando comparadas com o traço de 20% CCQ.

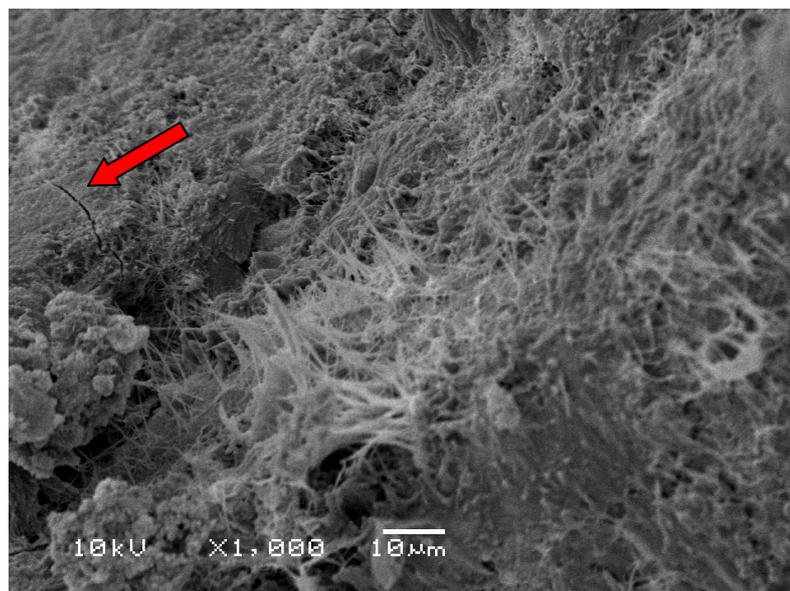


Figura 28 – Traço 20% CSQ – Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Para o traço de 10% SA (Figura 29) observa-se um comportamento muito

semelhante com o traço de referência onde há presença dominante de produtos de hidratação. Devido à sílica ativa acelerar o processo de hidratação, leva a formação mais rápida dos cristais de hidratação. Na imagem também é possível notar que há vazios na amostra, mesmo a sílica ativa ser mais fina que o cimento a porcentagem de 10% não é suficiente para total preenchimento dos vazios.

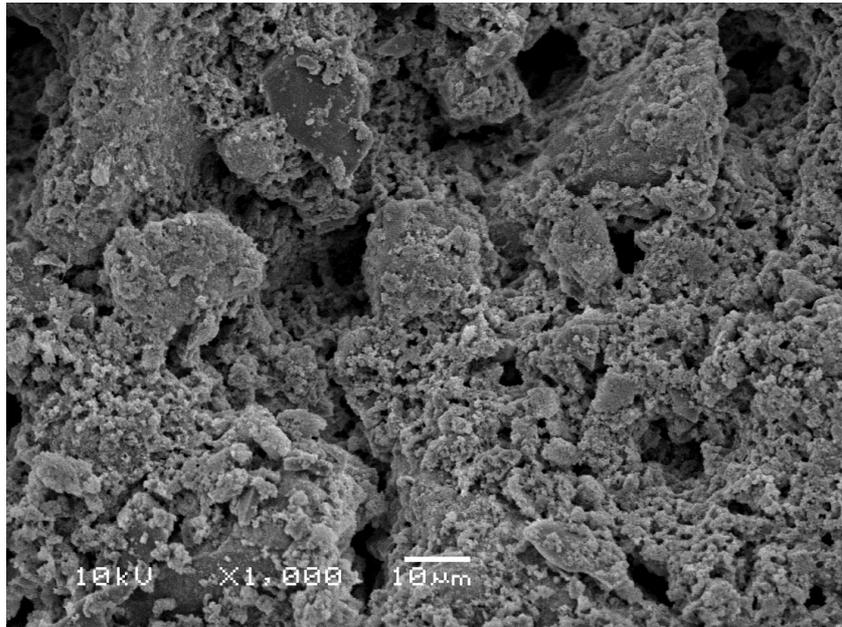


Figura 29 – Traço 10% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x

Fonte: Elaboração Própria.

Em relação ao traço de 15% de sílica ativa (Figura 30) é possível notar uma pequena presença de Etringita, ainda está ocorrendo formações de cristais de hidratação, uma formação mais tardia. Esse comportamento foi detectado também nos traços com utilização de CCA, onde com o aumento do teor houve o aumento de etringita.

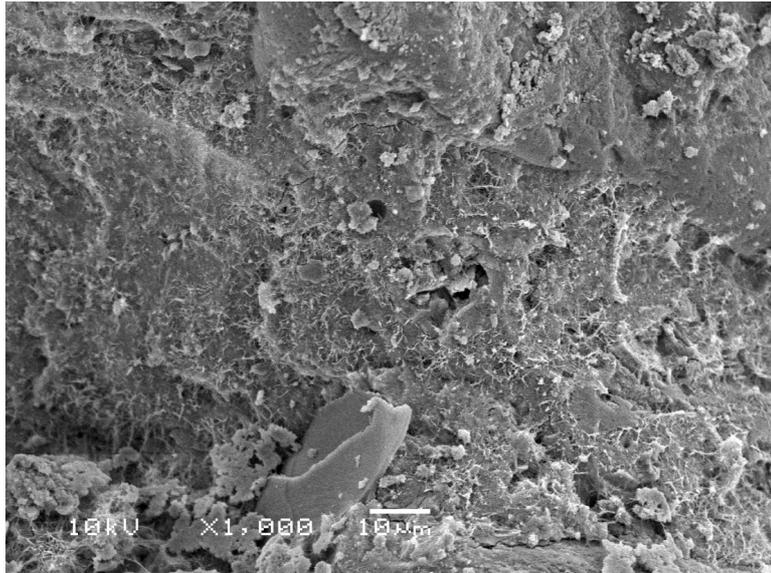


Figura 30 – Traço 15% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

Para a porcentagem de 20% de SA (Figura 31) é notável a grande presença de fissuras. Fissuras essas devidas a retração, pois o diâmetro médio da sílica ativa é de 0,4 μm o que propicia muito a retração devido ao refinamento dos poros. Também podemos correlacionar com a resistência à compressão onde nesse percentual a resistência não teve um aumento ao longo do crescimento de idade de ruptura. Não é possível notar a presença de cristais de hidratação acredita-se que devido ao teor mais alto de sílica não tem produtos de hidratação do cimento suficiente para toda a presença de sílica.

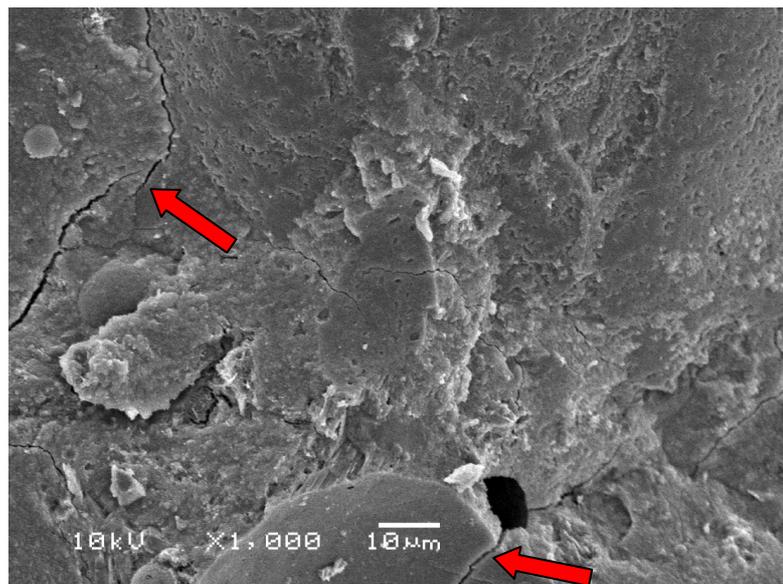


Figura 31 – Traço 20% S.A – Amostra com ampliação de 1,000x
Fonte: Elaboração Própria.

4.9.4 Porosidade por Intrusão de Mercúrio

O Gráfico 15 apresenta os resultados de volume de intrusão de Mercúrio em função da distribuição de tamanho de poros para os diferentes traços de argamassa. É importante salientar que pode-se dividir a distribuição do diâmetro de poros em 4 regiões. As regiões 1 e 4, as quais representam a distribuição de poros de gel (poros < 0,01 μm) e a distribuição de macroporos (poros > 1 μm), respectivamente. As regiões 2 (0,01 μm < poros < 0,05 μm) e 3 (0,05 μm < poros < 1 μm) representam a gama de poros capilares que podem ser divididos em capilares menores e capilares maiores, respectivamente.

Portanto, ao se comparar o traço de referência (linha azul) com todos os traços contendo diferentes tipos e porcentagens de adições, registra-se que, em menor ou maior grau, houve um aumento na distribuição discreta de poros capilares (regiões 2 e 3) e, uma redução dos macroporos (região 4), principalmente, para diâmetros entre 10 e 100 μm . Esse comportamento demonstra que houve um aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições (efeito microfíler). Cabe salientar que esse ensaio foi realizado com as amostras numa idade de 120 dias.

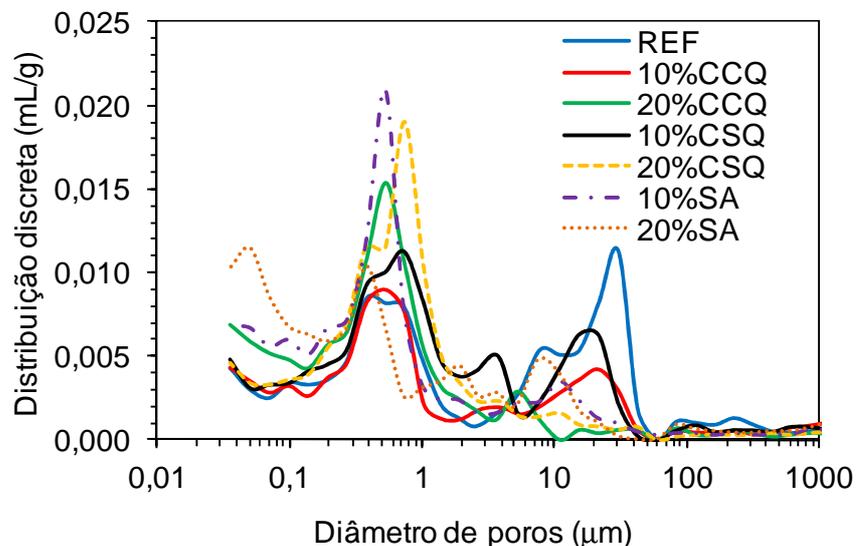


Gráfico 15 - Volume de intrusão de Mercúrio em função da distribuição de tamanho de poros

Fonte: Elaboração Própria.

4.9.5 Absorção e índice de vazios

Os Gráficos 16 e 17 apresentam os resultados médios de três determinações da absorção de água e índice de vazios, respectivamente, após imersão em água e após

imersão e fervura, para cada traço de argamassa.

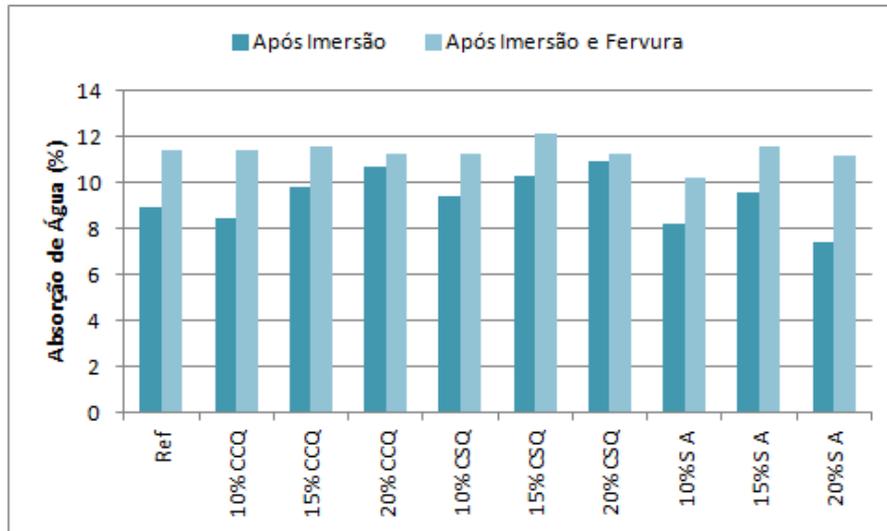


Gráfico 16 - Absorção de água após imersão e após imersão e fervura

Fonte: Elaboração Própria.

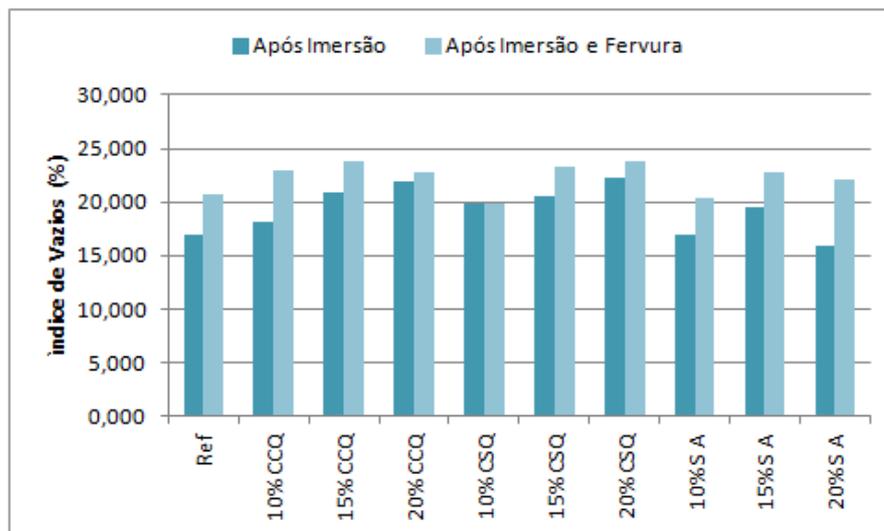


Gráfico 17 - Índice de Vazios após imersão e após imersão e fervura

Fonte: Elaboração Própria.

De maneira geral, os resultados de absorção de água e de índice de vazios apresentaram baixa dispersão, antes e depois da fervura. Analisando o Gráfico 16, constata-se que houve uma similaridade entre todos os traços estudados, pois todos os traços obtiveram um aumento de absorção conforme se aumentou o teor de substituição, leva-se a crer que essa maior absorção se deve a não ter tido idade suficiente para que ocorram todas as hidratações dessas argamassas com materiais pozolânicos.

No Gráfico 17, observa-se que o aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz, resultou em um aumento de índice de vazios. Acredita-se que esse comportamento é devido a este ensaio ter sido realizado aos 28 dias de idade, tempo insuficiente para total preenchimento dos vazios, visto que as reações a cinza de casca de arroz tem um processo mais lento.

Ao comparar os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio percebe-se que conforme obteve o aumento de idade houve o preenchimento dos poros, devido a esse ensaio ter se realizado aos 120 dias. Assim podemos concluir que para o ensaio de índice de vazios realizado aos 28 dias, a matriz das argamassas estavam mais abertas, que ao passar o tempo houve o fechamento desses vazios como demonstra o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

CAPITULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.0 CONCLUSÕES

Por meio dos estudos da caracterização de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz oriunda da queima com e sem controle de temperatura, pode se concluir que:

- Para a composição granulométrica do agregado natural, o agregado apresentou uma curva de granulometria fora dos padrões estabelecidos pelas zonas inferior e superior da norma NBR 7211/2009. Mesmo assim, a curva se mostrou contínua, o que caracteriza um bom arranjo entre as partículas. Quanto ao diâmetro máximo das partículas, foi encontrado de 0,6mm. Já para o módulo de finura, o resultado encontrado foi de 1,53.
- Os resultados dos ensaios para caracterização física e química das cinzas de casca de arroz foram satisfatórios e pode analisar a estrutura química, física das mesmas.
- Para a difração de raios-X, os resultados obtidos para a cinza de casca de arroz com controle de queima mostrou um estado amorfo bem definido já a cinza de casca de arroz sem controle de queima não é totalmente amorfa, pois apresenta alguma cristalinidade.
- Quanto à espectrometria de raios-x, ambas as cinzas de casca de arroz estudadas apresentaram um alto teor de sílica. A cinza com controle de queima confirmou a sua grande pozolanicidade com um teor de aproximadamente de 90%. A cinza sem controle de queima obteve um valor de 88% de sílica.
- Em relação à perda ao fogo, os valores encontrados para a CCA com controle de queima ficaram dentro do limite estabelecido pela NBR 12653/92 que é de 10% máximo de perda ao fogo, ficando com uma perda de 3,62%. Entretanto, a CCA

sem controle de queima ultrapassou o limite preconizado pela norma, obtendo um valor de 10,76% não se enquadrando como um material pozolânico.

- O índice de atividade pozolânica demonstrou que a CCA com controle de queima possui atividade pozolânica, pois atendeu a todos os requisitos da norma NBR 12653/1992. Todavia, a CCA sem controle de queima apresentou um índice de atividade pozolânica maior que 75%, como estabelecido em norma, mas no quesito de água requerida a mesma acabou ultrapassando, assim, o limite de água requerida de, no máximo, 110%.
- Quanto à massa específica ambas as cinzas de casca de arroz apresentaram os valores esperados, visto que a massa específica da CCA com controle de queima é menor ($2,03 \text{ g/cm}^3$) do que a da CCA sem controle de temperatura ($2,1 \text{ g/cm}^3$), fato este encontrado na literatura consultada.
- Analisando-se a distribuição granulométrica, verifica-se que a CCA sem controle de queima apresentou um diâmetro médio maior ($44,20\mu\text{m}$) que o diâmetro médio da CCA com controle de queima ($13,53\mu\text{m}$) devido à diferença de moagem entre elas.
- Pode se analisar o estudo da incorporação de diferentes teores de substituição da cinza de casca de arroz em argamassas onde é possível a sua utilização como demonstra os resultados dos ensaios mecânicos.
- Para o índice de consistência notou-se perda de trabalhabilidade com o aumento do teor de substituição. Isso ocorreu porque se manteve fixa a relação a/aglomerante.
- Para o ensaio de curva de liberação de calor de hidratação das argamassas observou que o aumento do teor de substituição produziu curvas mais lentas, sem grandes picos de temperatura, comportamento já esperado, conforme encontrado em outros trabalhos.
- Quanto à resistência à compressão, verifica-se que ambas as cinzas, de maneira geral, apresentaram resistência menores nas primeiras idades, visto que, neste período, as reações ocorrem de forma mais lenta. Entretanto, para idades mais avançadas, a maioria dos traços analisados apresentou resistências superiores ao traço referência. Os teores que tiveram os melhores resultados foram os de 20% de

substituição, para a cinza sem controle de queima e de 20% de substituição, para a cinza com controle de queima. Contudo, necessita-se que ensaios adicionais sejam realizados para entender melhor este comportamento.

- Para o ensaio de resistência à tração na flexão percebeu-se que o traço com CCA com controle de temperatura (CCQ) obteve resultados superiores ao traço de referência exceto para o traço de 20%. Para a CCA sem controle de temperatura (CSQ) aconteceu um comportamento inverso ao da CCQ, na qual se entende que esse comportamento se deve ao preenchimento dos vazios. E o traço com sílica ativa (SA) obteve um comportamento já esperado, onde a sua utilização mais adequada é de 10%.
- Ao comparar a NBR7215/1996 com a NBR 13279/2005 para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, chegou-se à conclusão que a resistência aumenta 20% em relação ao corpo de prova cilíndrico para o prismático.
- Em relação ao ensaio de investigação da microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode se notar a presença de produtos de hidratação, fato que comprova a hidratação tardia aos traços com utilização de cinza de casca de arroz, independente do tipo de queima. Para a sílica ativa foi possível notar que devido a sua granulometria muito fina houve o refinamento dos poros. Também foi possível notar que todos os traços de 20% obtiveram fissuras devido ao refinamento dos poros pelo aumento de finos.
- Com o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível perceber que em idades avançadas como 120 dias, houve uma redução dos macroporos e um aumento na distribuição discreta dos poros capilares, assim resultando num preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições.
- Quanto ao ensaio de absorção e índices de vazios, concluiu que para a idade de 28 dias de idade de amostra quanto o maior aumento de substituição maior a absorção e índice de vazios, acredita-se que não houve tempo suficiente para as hidratações nas argamassas com cinza de casca de arroz devido a se ter reações de hidratação mais tardias.

- Neste estudo constatou-se que a CCA com controle de temperatura de queima se enquadrando como um material pozolânico atendendo a todos os requisitos da NBR 12653/92 e, nos ensaios mecânicos, mostrou os melhores resultados na porcentagem de 20%. O uso dessa CCA é viável, devido a Empresa Pilecco possui um alto controle de queima e moagem, assim, mantendo um padrão de cinza, sem variabilidade, garantindo, assim, um mesmo desempenho para vários lotes que já são vendidos comercialmente.
- Para a CCA sem controle de queima concluiu-se que a mesma não atende aos requisitos mínimos exigidos pela NBR 12653/92 como Materiais Pozolânicos, mas que, para os ensaios mecânicos, gerou resultados satisfatórios, onde seu melhor desempenho ficou com o teor de substituição de 20%, esse comportamento se dá pela quantidade de finos o que leva a uma matriz mais fechada. Cabe salientar que essa cinza foi recolhida em pontos estratégicos do forno, o que não nos gera uma uniformidade dessa cinza.
- Verificando as duas cinzas de casca de arroz com a NBR 12653/92 a cinza com controle de queima se enquadra como material pozolânico, pois atendeu os requisitos de perda ao fogo, massa específica, distribuição granulométrica, espectrometria de raio-x, difração de raio-x, índice de atividade pozolânica. E a cinza de casca de arroz sem controle de queima não se enquadrando em vários requisitos como perda ao fogo, índice de atividade pozolânica assim não se enquadrando como material pozolânico.
- Por intermédio desse trabalho pode-se contribuir com um banco de dados do mapeamento do Rio Grande do Sul com os dois tipos de cinzas mais utilizados na cidade de Alegrete, onde esse mapeamento visa à busca da cinza de casca de arroz mais amorfa do estado.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Propõe-se que sejam realizados ensaios de durabilidade com a CCA com controle de queima, com vistas a garantir a sua total efetividade na produção de argamassas e concretos. Alguns ensaios que podem ser realizados são: carbonatação, ataques químicos, ação de úmido/seco, entre outros.

Também se propõe o estudo das CCAs com a utilização de superplastificante já que, neste estudo, houve perda de trabalhabilidade, por conta da relação água/aglomerante ter sido mantida constante para todos os traços estudados.

Outro tipo de estudo seria investigar a existência de reação álcali-sílica em argamassas com a adição de cinza de casca de arroz.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P.C. Concreto de Alto desempenho. PINI, São Paulo, 2000.

AGOPYAN, V. **Materias reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais.** São Paulo, 1991. Tese de Livre-docência. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos Aditivos Incorporadores de Ar em Argamassas de Revestimento.** Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2002.

ALVES, S. M. S. **Desenvolvimento de compósitos resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica.** Universidade Federal da Paraíba. Dissertação de Mestrado. João Pessoa, 2002.

ASTM C1260: Standrd test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method) – West Conshohocken, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados – Determinação da Composição Granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados para Concreto – Especificação: NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da massa específica: NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Materiais Pozolânicos - Especificação: NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da Mistura e Determinação do Índice de Consistência: NBR 13276. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice com Cimento: NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland – Análise Química – Determinação de perda ao fogo: NBR NM 18. Rio de Janeiro, 2012.

BARBOSA, M. B. et al. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, **Anais...** IBRACON, 2006.

BARBOZA, A. S. R.; BARBIRATO, J. C. C.; SILVA, M. M. C. P. **Avaliação do uso de bambu como material alternativo para a execução de habitação de interesse social.** Ambiente Construído, v.8, p.115-129, 2008.

BARSOUM, M.W., GANGULY A., **Microstructural Evidence of Reconstituted Limestone Blocks in the Great Pyramids of Egypt.** Journal American Ceramic Society, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). 2011. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_11_09_15_03_02_boletim_2o_levantamento_safra_2011_12.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2012.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da Variação do Índice de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz sobre a Atividade Pozolânica.** Porto Alegre. Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2009.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza de casca de arroz.** 2001. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) □ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica.** 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** ed.G.C.Isaia – São Paulo: IBRACON, 2005, 2v., 1600 p.

DAL MOLIN, D.C.C. **Técnicas Experimentais para o Estudo da Microestrutura. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais / ed. G.C. Isaia, 2ª ed., São Paulo, IBRACON, 2010, 2v, 1712p.**

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais. Concreto: Ciência e Tecnologia / ed. G.C. Isaia, 1ª ed., São Paulo, IBRACON, 2011, 2v, 1946p.**

DELLA, V. P., **Processamento e Caracterização de Sílica Ativa Obtida a partir de Cinza de Casca de Arroz.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

FRIZZO, B. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade de oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

FERREIRA, C.S. **Desenvolvimento do Processo de Obtenção de Filme Polimérico a partir da Cinza de Casca de Arroz.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Centro Tecnológico, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

FONSECA, Margarete R. G. **Isolantes Térmicos Fabricados a partir da Cinza de Casca de Arroz: Obtenção, caracterização de Propriedades e sua Relação com a Microestrutura.** Tese de Doutorado em Engenharia. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, p.107-114, 2005.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Sustentabilidade do concreto com altos teores de escória e cinzas volantes**. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 2, n. 3, p. 244-253, Sep. 2009. ISSN 1983-4195.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura**. Ambiente Construído, 2010.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil e Urbano, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

LIMA, M. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; NASCIMENTO, J. W.B. do; LEAL, A. F. **Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação**. Revista Escola de Minas, v.61, p.285-290, 2008.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da conza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta Scientiarum Technology, v.32, p.383-389, 2010.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Apostila realizada na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis. Sem data de publicação.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo: Ed. PINI, 1994.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. **Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.795-801, 2009.

NAIR, D. G.; FRAAIJ, A.; KLAASSEN, A. A. K.; KENTGENS, A. P. M. **A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice rusk ashes.** Cement and Concrete Research, 2008.

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**, Editora Pini, São Paulo, Brasil, 1997.

OFICEMEN. Datos Coyunturales. Producción mundial Del Cemento. Disponível em : {<http://www.oficemen.com>} Acesso em 20 de Dezembro de 2010.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. de F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.353-357, 2009.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Porto Alegre. Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2006.

PRUDÊNCIO, L R. **Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca.** IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Artigo Técnico. Foz do Iguaçu. 2002.

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. **Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz.** In: workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como material de construção civil, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996.

RODRIGUES, M.S.; **Caracterização de Cinza Residual de Casca de Arroz para a Produção de Argamassa.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

RODRIGUES M. S.; BERALDO A. L. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual.** Engenharia Agrícola, 2010.

SANTOS, M.L.P.O., **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese de Doutorado em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

SILVA, E. J. da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 2009.

SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA)**. HOLOS Environment, 2007.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à relação álcali-agregado**. Porto Alegre. Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2007.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: { <http://www.snic.org.br/>} Acesso em 13 de Dezembro de 2011.

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz no traço**. Campina Grande: UFCG, 2008. 160p. Tese Doutorado.2008.

TASHIMA, M. M, **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Ilha Solteira – São Paulo. Mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia UNESP. Área de Conhecimento Estruturas 2006.

TIBONI, R., **A Utilização da Cinza de Casca de Arroz de Termoelétrica como Componente do Aglomerante de Compósito à Base de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

VARGAS, A.S. **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ANEXO 1 – Resultados de resistência à compressão – NBR 7215/1996

TRAÇO 0%(REFERÊNCIA)					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	31,86	16,23	1,69	16,18	Ok
	26,03	13,26			Eliminado
	31,67	16,13			Ok
7 dias	32,38	16,50	1,67	16,64	Ok
	27,02	13,76			Ok
	32,95	16,78			Ok
28 dias	46,52	23,69	4,91	24,21	Ok
	30,92	15,75			Eliminado
	48,56	24,73			Ok
63 dias	49,09	25,00	2,38	22,89	Ok
	40,80	20,78			Eliminado
	48,64	24,78			Ok
91 dias	50,42	25,69	1,28	24,54	Ok
	50,02	25,48			Ok
	45,91	23,38			Eliminado

TRAÇO 10% CCQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	34,88	17,76	2,90	17,395	Ok
	33,45	17,03			Ok
	22,42	12,42			Eliminado
7 dias	35,25	17,95	1,33	17,3	Ok
	32,68	16,65			Ok
	30,03	15,30			Eliminado
28 dias	48,00	24,45	3,77	24,24	Ok
	34,78	17,71			Eliminado
	47,15	24,02			Ok
63 dias	50,29	25,61	1,84	25,48	Ok
	43,77	22,30			Eliminado
	49,76	25,34			Ok
91 dias	37,43	19,06	1,68	19,2	Ok
	31,99	16,30			Eliminado
	37,98	19,34			Ok

TRAÇO 15% CCQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	29,85	15,20	1,02	15,27	Ok
	26,52	13,51			Eliminado
	30,11	15,34			Ok
7 dias	35,59	18,13	1,15	18,445	Ok
	32,45	16,53			Eliminado
	36,84	18,76			Ok
28 dias	35,72	18,20	0,88	18,28	Ok
	32,92	16,77			Eliminado
	36,06	18,36			Ok
63 dias	49,46	25,20	1,24	27,34	Eliminado
	53,45	27,22			Ok
	53,88	27,45			Ok
91 dias	53,39	27,20	1,77	27,54	Ok
	48,16	24,53			Eliminado
	54,74	27,88			Ok

TRAÇO 20% CCQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	24,29	12,37	1,16	12,47	Ok
	21,07	10,73			Eliminado
	24,65	12,56			Ok
7 dias	24,90	12,68	2,28	15,68	Eliminado
	31,22	15,90			Ok
	30,32	15,45			Ok
28 dias	44,49	22,66	2,46	26,07	Eliminado
	51,33	26,14			Ok
	51,01	25,99			Ok
63 dias	65,76	33,50	0,18	33,37	Ok
	65,28	33,24			Ok
	57,90	29,50			Eliminado
91 dias	60,63	30,88	2,81	31,85	Ok
	52,82	26,90			Eliminado
	64,43	32,81			Ok

TRAÇO 10% CSQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	27,77	14,14	1,25	13,76	Ok
	26,25	13,37			Ok
	22,95	11,69			Eliminado
7 dias	41,34	21,06	1,56	21,23	Ok
	36,40	18,54			Eliminado
	42,00	21,40			Ok
28 dias	47,18	24,03	1,11	24,42	Ok
	44,41	22,62			Eliminado
	48,68	24,80			Ok
63 dias	54,66	27,84	2,59	27,55	Ok
	53,51	27,25			Ok
	45,34	23,09			Eliminado
91 dias	54,00	27,50	3,20	28,14	Ok
	44,59	22,71			Eliminado
	56,51	28,78			Ok

TRAÇO 15% CSQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	28,04	14,28	8,18	14,18	Ok
	27,62	14,07			Ok
	0,00	0,00			Eliminado
7 dias	28,26	14,39	0,13	14,24	Ok
	27,87	14,20			Ok
	27,76	14,14			Ok
28 dias	40,68	20,76	1,52	20,37	Ok
	34,99	17,82			Eliminado
	39,22	19,97			Ok
63 dias	44,46	22,64	0,37	22,52	Ok
	44,81	22,82			Ok
	43,42	22,10			Ok
91 dias	51,75	26,36	2,96	26,53	Ok
	52,41	26,70			Ok
	42,07	21,42			Eliminado

TRAÇO 20% CSQ					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	26,63	13,56	0,26	13,60	Ok
	26,23	13,36			Ok
	27,22	13,87			Ok
7 dias	27,44	13,98	0,41	13,69	Ok
	25,95	13,22			Ok
	27,24	13,87			Ok
28 dias	31,99	16,30	2,40	20,44	Eliminado
	39,65	20,20			Ok
	40,61	20,68			Ok
63 dias	47,80	24,35	1,50	24,40	Eliminado
	47,99	24,45			Ok
	42,83	21,81			Ok
91 dias	41,91	21,34	3,12	23,92	Eliminado
	52,01	26,50			Ok
	52,96	26,97			Ok

TRAÇO 10% S.A					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	31,74	16,16	1,50	18,75	Eliminado
	37,08	18,89			Ok
	36,53	18,60			Ok
7 dias	30,05	15,30	4,75	23,49	Eliminado
	45,32	23,08			Ok
	46,91	23,90			Ok
28 dias	47,68	24,28	1,95	27,63	Eliminado
	54,76	27,90			Ok
	53,71	27,36			Ok
63 dias	65,17	33,2	0,49	32,64	Ok
	63,67	32,44			Ok
	63,38	32,28			Ok
91 dias	60,95	31,04	18,14	31,42	Ok
	62,44	31,80			Ok
	0,00	0,00			Eliminado

TRAÇO 15% S.A					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	29,44	15,00	8,73	15,12	Ok
	29,90	15,23			Ok
	0,00	0,00			Eliminado
7 dias	29,64	15,10	1,86	15,09	Ok
	23,51	11,87			Eliminado
	29,61	15,08			Ok
28 dias	55,55	28,30	5,01	28,43	Ok
	38,78	19,75			Eliminado
	56,05	28,55			Ok
63 dias	48,32	24,35	2,78	24,28	Ok
	47,50	24,20			Ok
	38,22	19,46			Eliminado
91 dias	0,00	0,00	14,67	12,65	Eliminado
	49,66	25,30			Ok
	50,11	25,53			Ok

TRAÇO 20% S.A					
Idade de Ruptura	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
3 dias	27,83	14,17	1,78	14,42	Ok
	22,32	11,37			Eliminado
	28,79	14,66			Ok
7 dias	40,96	20,86	3,82	20,63	Ok
	40,04	20,40			Ok
	27,55	14,03			Eliminado
28 dias	45,38	23,11	3,37	23,21	Ok
	34,11	17,37			Eliminado
	45,73	23,30			Ok
63 dias	43,90	22,36	0,18	22,19	Ok
	43,57	22,20			Ok
	43,20	22,01			Ok
91 dias	48,09	24,50	0,11	24,43	Ok
	47,70	24,30			Ok
	48,06	24,48			Ok

ANEXO 2 – Resultados de Resistência à Tração na Flexão e Compressão - NBR 13279/2005

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO NBR 13279/2005					
Traço	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
Referência	2,68	6,28	3,33	5,67	Ok
	0,00	0,00			Eliminado
	2,16	5,06			Ok
10% CCQ	2,59	6,07	0,50	6,03	Ok
	2,55	5,98			Ok
	2,2	5,16			Eliminado
15% CCQ	2,4	5,63	0,29	5,94	Ok
	2,65	6,21			Ok
	2,55	5,98			Ok
20% CCQ	1,93	4,52	0,30	4,85	Ok
	2,17	5,09			Ok
	2,11	4,95			Ok
10% CSQ	2,36	5,53	0,54	4,69	Eliminado
	1,90	4,45			Ok
	2,10	4,92			Ok
15% CSQ	2,37	5,55	0,26	5,26	Ok
	2,21	5,18			Ok
	2,15	5,04			Ok
20% CSQ	2,34	5,48	0,40	5,41	Ok
	2,28	5,34			Ok
	2,02	4,73			Eliminado
10% S.A	2,41	5,65	0,27	5,57	Ok
	2,25	5,27			Ok
	2,47	5,79			Ok
15% S.A	1,74	4,08	0,82	5,46	Eliminado
	2,24	5,25			Ok
	2,42	5,67			Ok
20% S.A	1,86	4,36	0,49	4,20	Ok
	1,72	4,03			Ok
	1,45	3,40			Eliminado

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NBR 13279/2005

Traço	Metade 1 do corpo-de-prova				
	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
Referência	28,79	17,99	1,59	18,29	Ok
	24,95	15,59			Ok
	29,75	18,59			Eliminado
10% CCQ	29,91	18,69	0,40	19,09	Ok
	31,19	19,49			Ok
	30,56	19,10			Ok
15% CCQ	31,8	19,88	0,29	19,81	Ok
	31,2	19,50			Ok
	32,1	20,06			Ok
20% CCQ	32,6	20,38	1,42	20,40	Ok
	32,67	20,42			Ok
	28,7	17,94			Eliminado
10% CSQ	25,01	15,63	1,40	18,05	Eliminado
	28,97	18,11			Ok
	28,76	17,98			Ok
15% CSQ	24,90	15,56	0,21	15,37	Ok
	24,23	15,14			Ok
	24,67	15,42			Ok
20% CSQ	23,45	14,66	0,17	14,60	Ok
	23,56	14,73			Ok
	23,04	14,40			Ok
10% S.A	44,61	27,88	4,35	20,35	Eliminado
	32,67	20,42			Ok
	32,45	20,28			Ok
15% S.A	31,26	19,54	0,08	19,57	Ok
	31,23	19,51			Ok
	31,45	19,66			Ok
20% S.A	31,56	19,73	1,41	17,28	Eliminado
	27,67	17,29			Ok
	27,63	17,27			Ok

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NBR 13279/2005

Traço	Metade 2 do corpo-de-prova				
	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Status
Referência	28,79	17,99	0,36	18,39	Ok
	29,91	18,69			Ok
	29,59	18,49			Ok
10% CCQ	30,67	19,17	0,65	19,23	Ok
	31,86	19,91			Ok
	29,79	18,62			Ok
15% CCQ	31,56	19,73	0,25	19,60	Ok
	31,6	19,75			Ok
	30,9	19,31			Ok
20% CCQ	32,54	20,34	0,24	20,33	Ok
	32,89	20,56			Ok
	32,12	20,08			Ok
10% CSQ	29,03	18,14	2,44	18,10	Ok
	28,90	18,06			Ok
	35,72	22,33			Eliminado
15% CSQ	25,13	15,71	2,24	15,67	Ok
	24,99	15,62			Ok
	31,27	19,54			Eliminado
20% CSQ	23,01	14,38	0,24	14,34	Ok
	22,87	14,29			Ok
	23,60	14,75			Eliminado
10% S.A	32,12	20,08	0,27	20,35	Ok
	32,56	20,35			Ok
	32,97	20,61			Ok
15% S.A	31,19	19,49	2,03	19,47	Ok
	36,78	22,99			Eliminado
	31,12	19,45			Ok
20% S.A	31,14	19,46	1,26	17,30	Eliminado
	27,34	17,09			Ok
	28,01	17,51			Ok

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NBR 13279/2005			
Traço	1 Metade (Média)	2 Metade (Média)	Média Final (MPa)
Referência	18,29	18,39	18,34
10% CCQ	19,09	19,23	19,16
15% CCQ	19,81	19,60	19,71
20% CCQ	20,40	20,33	20,36
10% CSQ	18,05	18,10	18,43
15% CSQ	15,37	15,67	15,52
20% CSQ	14,60	14,34	14,47
10% S.A	20,35	20,35	20,35
15% S.A	19,57	19,47	19,52
20% S.A	17,28	17,30	17,29