

**Silvana Leonita Weber**

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE SÍLICA DE ELEVADA REATIVIDADE  
PARA USO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO A PARTIR DO  
PROCESSAMENTO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil da Universidade Federal de  
Santa Catarina, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Florianópolis**

**2001**

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE SÍLICA DE ELEVADA REATIVIDADE  
PARA USO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO A PARTIR DO  
PROCESSAMENTO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

**Silvana Leonita Weber**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Professor Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior

Co-Orientador: Professor Ph.D. Ivo José Padaratz

Co-Orientadora: Professora M.Sc. Sílvia Santos

WEBER, Silvana Leonita. **Metodologia para Obtenção de Sílica de Elevada Reatividade para Uso em Concreto de Alto Desempenho a Partir do Processamento de Cinza de Casca De Arroz**. Florianópolis, 2001, 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Co-Orientador: Prof. Ph.D. Ivo José Padaratz

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Sílvia Santos.

Data da defesa: 28/04/01

O presente trabalho visou confirmar, em escala piloto, a adequação de uma metodologia para produzir uma cinza de casca de arroz modificada, com um teor bastante reduzido de carbono, a partir de um segundo processo de combustão da cinza residual “in natura”, mantendo seu bom desempenho como adição em concretos e argamassa. Para tanto, amostras de cinza coletadas antes e depois do processamento foram submetidas à moagem por 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas. Após a moldagem de corpos-de-prova de argamassa de referência (sem cinza) e utilizando os dois tipos de cinza em teores de 15% e 40% em substituição ao cimento CP V - ARI em volume absoluto, mantendo-se o mesmo volume de aglomerante na pasta e relações água/aglomerante de 0,52 e 0,40, fez-se a comparação dos resultados de resistência à compressão axial e capacidade de incorporação de agregados das misturas, para uma dada consistência. Além disso, foram realizados testes de índice de atividade pozolânica e ensaio de Luxan. Os resultados indicaram que o uso da cinza de casca de arroz modificada mostrou-se economicamente mais vantajoso, pela sua maior incorporação de agregado miúdo, ou seja, pela sua inferior demanda de água necessária para atingir uma dada consistência. Pode-se, também, concluir que o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento não deve ser tomado como um parâmetro limitante do uso destas pozolanas. Avaliou-se ainda a reatividade do material, através da análise da sua condutividade, pelo ensaio de Luxan.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz, índice de atividade pozolânica, pozolanas, processo de combustão.

Revisão ortográfica e gramatical:

Prof. M.Sc. Silvino Iagher – CEFET-PR.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC  
CENTRO TECNOLÓGICO

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada, em 28 de abril de 2001, pela comissão examinadora.

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior – Orientador – Moderador

---

Prof. Ph.D. Ivo José Padaratz - Co-Orientador - UFSC

---

Prof<sup>a</sup>. MSc. Sílvia Santos - Co-Orientadora - UNIVALI

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - UFRGS

---

Prof. Dr. Narciso Angel Ramos Arroyo - UFSC

---

Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do CPGEC

**Dedico este trabalho a minha Mãe, minha  
melhor amiga e maior incentivadora,  
Ebraema da Silva Weber.**

## **AGRADECIMENTOS**

Na realização de um trabalho técnico de engenharia como este, torna-se fundamental a colaboração de instituições e empresas para o bom desenvolvimento do trabalho, assim como a participação da família e dos amigos, também contribui de maneira essencial para atingir, com êxito, os objetivos estabelecidos. Desta forma tenho muito a agradecer.

Agradeço a Deus, por iluminar meus passos dando coragem para vencer cada novo obstáculo.

Agradeço à minha irmã Marisa Isabel Weber, ao meu querido e amado sobrinho Allan Felipe Weber Macan, ao meu irmão Paulo Sergio Weber e ao meu pai Lourival Weber, pelo carinho, apoio e incessante incentivo.

A CAPES, pelos recursos financeiros que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CEFET-PR, em especial aos professores do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC: Cezar Augusto Romano, Enos Pirkel, Ricardo Karvat, Helena Akemi Umezawa, Ely Costa Cardona de Aguiar, Délcio Efigênio Honório, Amacin Rodrigues Moreira e Iseu Reichmann Losso, pela liberação das aulas das minhas disciplinas, pela amizade, otimismo e confiança no meu potencial. Agradeço também à secretária da pós-graduação Vera Lúcia Delfino, pelas boas notícias e principalmente pela sua competência.

Ao professor e orientador Luiz Roberto Prudêncio Júnior, pela valiosa orientação neste trabalho, pelo incentivo, confiança, dedicação, competência, seriedade mesmo estando na Inglaterra durante parte desta pesquisa, mostrando-se excepcionalmente presente e participativo.

Ao professor Ivo José Padaratz pela co-orientação neste trabalho e pela disponibilidade em ouvir e ajudar a solucionar os problemas na ausência do professor Prudêncio, tornando-se o mais amigo de todos os professores.

À professora Sílvia Santos (UNIVALI-SC) pela co-orientação, profissionalismo, dedicação, conhecimento e amizade.

A UFSC, em especial ao seu núcleo de manutenção – NUMA, ao Sérgio, Antônio, André e Clóvis pela colaboração na montagem dos diversos equipamentos referentes à combustão. Ao departamento de transportes, pela colaboração, especialmente ao Jair e ao motorista Cláudio. Agradeço também à secretária da pós-graduação, Irizete Meneses, pelas palavras de grande incentivo e motivação.

À Cia. de Cimento Portland Rio Branco – Votoran, pela doação de materiais e pelos ensaios de caracterização das cinzas, lá realizados, especialmente aos engenheiros Roberto Pan, Marivaldo Rosado Atta Filho e Clair Ceron.

A Toniolo Pré-Moldados, por todo apoio dado à pesquisa, na doação de materiais, no espaço físico cedido para construção do forno, bem como na sua execução, meu agradecimento especial vai para Carlos Augusto Bedin, Jaderson Luiz Barbieri e Lourival Martins Luiz Filho.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) – Centro de Educação e Tecnologia de Tijucas, pela possibilidade de realizar a moagem das cinzas.

A Betonbrás Concreto Ltda, pela gentileza na doação do agregado miúdo utilizado na pesquisa, especialmente ao engenheiro Joélcio Luiz Stocco.

A Sika S.A. pela doação do aditivo usado nos experimentos com argamassas.

A todo o grupo do GTEC pelo apoio, contribuição nas discussões técnicas, e pela agradável convivência diária, agradeço a Luciana Calçada, Fábio Elias Araújo, Juliana Casali, Alan Noronha, Alexandre, Rafael, Vanessa e Zaira.

Ao professor Dario Dafico (PUC-GO), pela troca de informações e grande incentivo, e também à professora Giovanna Patrícia Gava (UNIOESTE-PR) pela disponibilidade e seriedade na transferência de conhecimentos.

Às amigas Helga Martins, Vaneide Gomes, Maria Luíza, Dinara da Paixão e especialmente à Luciana Lopes Xavier, pelo carinho e pela ajuda em vários momentos no decorrer do curso de mestrado.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Importância da Pesquisa	1
1.2 Objetivo Geral	4
1.3 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificativa	5
1.5 Estrutura do Trabalho	5
<b>2. POZOLANAS</b>	<b>7</b>
2.1 Definição	7
2.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos	8
2.3 Reação Pozolânica	12
2.4 Características Químicas e Físicas das Pozolanas	15
<b>3. CINZA DA CASCA DE ARROZ</b>	<b>23</b>
3.1 Casca de Arroz	23
3.2 Cinza da Casca de Arroz	25
3.3 Influência do Tratamento Térmico e do Grau de Moagem	27
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>35</b>
4.1 Desenvolvimento	35
4.2 Escolha da Casca e da Cinza da Casca de Arroz	35
4.3 Construção do Forno	36
4.4 Experimentos de Combustão	44
4.4.1 Procedimentos Para Realização da Combustão	46
4.5 Moagem das Cinzas “In Natura” e Modificada	49
4.6 Caracterização dos Materiais	50
4.6.1 Caracterização Física e Química das Cinzas de Casca de Arroz	50
4.6.2 Cimento	54
4.6.3 Agregado	55
4.6.4 Água	56
4.6.5 Aditivos Redutores de Água	56
4.6.6 Hidróxido de Cálcio	57
4.7 Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento - IAP	57
4.8 Ensaio de Luxan	59
4.9 Ensaio de Resistência à Compressão Axial	61
4.9.1 Relação água/aglomerante	61
4.9.2 Teores de Substituição das Cinzas de Casca de Arroz	62
4.9.3 Teor do Aditivo Químico	62

4.9.4	Mistura dos Materiais	62
4.9.5	Consistência das Argamassas	63
4.9.6	Moldagem dos Corpos-de-prova	63
4.9.7	Idades dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial	65
4.9.8	Cura	66
4.9.9	Ruptura dos Corpos-de-prova	66
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>67</b>
5.1	Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento	67
5.2	Ensaio de Luxan	73
5.3	Ensaio de Difração de Raios-X das Cinzas de Casca de Arroz	74
5.4	Ensaio de Resistência à Compressão Axial das Argamassas	74
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>77</b>
6.1	Influência da Combustão nas Cinzas de Casca de Arroz	77
6.2	Influência do Grau de Moagem nas Cinzas de Casca de Arroz	78
6.3	Ensaios de Pozolanicidade das Cinzas de Casca de Arroz	78
6.4	Resistência à Compressão Axial das Argamassas	79
6.5	Sugestões para Trabalhos Futuros	79
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>86</b>
	ANEXO 1	87
	ANEXO 2	94
	ANEXO 3	96

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1:	Classificação dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653/92.	8
TABELA 2.2:	Classificação dos materiais pozolânicos segundo a ASTM 618-95.	8
TABELA 2.3:	Classificação, composição e características das partículas de aditivos para concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	11
TABELA 2.4:	Propriedades químicas das pozolanas – NBR 12653/92.	15
TABELA 2.5:	Propriedades físicas das pozolanas – NBR 12653/92.	15
TABELA 4.1:	Comparação de cores das cinzas “in natura” e modificada, após a moagem.	50
TABELA 4.2:	Análise física da cinza de casca de arroz “in natura”.	51
TABELA 4.3:	Análise química da cinza de casca de arroz “in natura”.	51
TABELA 4.4:	Análise física da cinza de casca de arroz modificada.	52
TABELA 4.5:	Análise química da cinza de casca de arroz modificada.	52
TABELA 4.6:	Análise física do cimento CP V – ARI – Votoran.	54
TABELA 4.7:	Análise química do cimento CP V – ARI – Votoran.	54
TABELA 4.8:	Análise mecânica do cimento CP V – ARI – Votoran.	55
TABELA 4.9:	Composição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7217/82).	55
TABELA 4.10:	Caracterização do agregado miúdo (NBR 7217/82).	56
TABELA 4.11:	Dados físicos do aditivo plastificante.	57
TABELA 4.12:	Resultados médios dos valores de massa específica das cinzas “in natura” e modificada.	57
TABELA 4.13:	Índice de atividade pozolânica com cimento para cinza “in natura”.	59
TABELA 4.14:	Índice de atividade pozolânica com cimento para cinza modificada.	59
TABELA 4.15:	Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade (LUXAN, 1989).	60

TABELA 4.16:	Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,52 para cinza de casca de arroz “in natura”, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.	64
TABELA 4.17:	Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,52 para cinza de casca de arroz modificada, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.	64
TABELA 4.18:	Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,40 para cinza de casca de arroz “in natura”, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.	65
TABELA 4.19:	Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,40 para cinza de casca de arroz modificada, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.	65
TABELA 5.1:	Resultados do ensaio de índice de atividade pozolânica (NBR 5752/92).	67
TABELA 5.2:	Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante de 0,52.	69
TABELA 5.3:	Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante de 0,52.	69
TABELA 5.4:	Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante de 0,40.	70
TABELA 5.5:	Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante de 0,40.	70
TABELA 5.6:	Resultados referentes ao ensaio de LUXAN (1989).	73

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1:	Micrografia de uma amostra de cinza de casca de arroz - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).	9
FIGURA 2.2:	Micrografia de uma amostra de cinza volante - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).	9
FIGURA 2.3:	Micrografia de uma amostra de sílica ativa - Magnificação de 2500 (DAFICO, 2001).	10
FIGURA 2.4:	Período efetivo da contribuição da reação pozolânica na resistência à compressão (MEHTA, 1992).	14
FIGURA 3.1:	Micrografia de uma amostra de casca de arroz, evidenciando sua porosidade - Magnificação de 500 (DAFICO, 2001).	24
FIGURA 3.2:	Micrografia de uma amostra de casca de arroz, evidenciando sua cobertura lenhosa - Magnificação de 50 (DAFICO, 2001).	24
FIGURA 3.3:	Micrografia de uma amostra de cinza de casca de arroz, evidenciando sua porosidade - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).	27
FIGURA 3.4:	Gráfico das médias das resistências à compressão para os diferentes tipos de adição em função da idade (SILVEIRA e RUARO, 1995).	30
FIGURA 3.5:	Esquema do processo para preparação de cinzas silicosas (PITT, 1976).	31
FIGURA 3.6:	Método para produção de cinza de casca de arroz ativa (SUGITA, 1994).	31
FIGURA 3.7:	Cortes horizontal e vertical da minifornalha de leito fixo (DAFICO, 2001).	33
FIGURA 3.8:	Fornalha protótipo desenvolvida por DAFICO (2001).	34
FIGURA 4.1:	Silos de armazenamento da cinza de casca de arroz na indústria beneficiadora.	37
FIGURA 4.2:	Detalhe da combustão da casca de arroz na indústria beneficiadora.	37

FIGURA 4.3:	Vista frontal do forno.	38
FIGURA 4.4:	Corte frontal do forno.	39
FIGURA 4.5:	Vista lateral do forno.	40
FIGURA 4.6(a):	Corte lateral do forno.	41
FIGURA 4.6(b):	Corte lateral do forno com detalhamento das instalações.	42
FIGURA 4.7:	Depósito da cinza após sua segunda queima, destacando a localização das resistências blindadas.	43
FIGURA 4.8:	Detalhe da grelha deslizante.	43
FIGURA 4.9:	Vista interna do forno, com destaque para a tubulação de ar comprimido.	43
FIGURA 4.10:	Vista geral do forno	43
FIGURA 4.11:	Esquema de posicionamento dos termopares na parede do forno.	44
FIGURA 4.12:	Resultado da primeira tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca de arroz, em volume.	45
FIGURA 4.13:	Resultado da segunda tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca de arroz, em volume.	45
FIGURA 4.14:	Mistura de 50% de cinza “in natura” com 50% de casca de arroz, em volume.	48
FIGURA 4.15:	Controle da vazão do ar comprimido através dos equipamentos da bancada.	48
FIGURA 4.16:	Chegada do ar comprimido às tubulações principais.	48
FIGURA 4.17:	Processamento dos dados da combustão.	48
FIGURA 4.18:	Tentativa de queima, utilizando 50% de cinza e 50% de casca, em volume.	49
FIGURA 4.19:	Moinho giratório usado na moagem das cinza “in natura” e modificada.	49
FIGURA 4.20:	Difração de raios-X da cinza da casca de arroz “in natura”, com 4 horas de moagem.	53

FIGURA 4.21:	Difração de raios-X da cinza da casca de arroz modificada, com 4 horas de moagem.	53
FIGURA 4.22:	Cura térmica acelerada para o ensaio de pozolanicidade com cimento.	61
FIGURA 4.23:	Ensaio de LUXAN (1989).	61
FIGURA 4.24:	Identificação dos corpos-de-prova após a moldagem.	66
FIGURA 4.25:	Prensa para realização do ensaio de resistência.	66
FIGURA 5.1:	Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com fator água/aglomerante 0,52.	71
FIGURA 5.2:	Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com fator água/aglomerante 0,52.	71
FIGURA 5.3:	Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com fator água/aglomerante 0,40.	72
FIGURA 5.4:	Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com fator água/aglomerante 0,40.	72
FIGURA 5.5:	Comparação dos difratogramas de raios-X das cinzas de casca de arroz “in natura” (CCA AT) e modificada (CCA MT) (DAFICO, 2001).	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM:	American Society for Testing Materials
C <sub>2</sub> S:	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A:	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S:	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF:	Ferroaluminato tetracálcico
Ca(OH) <sub>2</sub> :	Hidróxido de cálcio
CAD:	Concreto de Alto Desempenho
CAN:	Canadian Standards Association
CASAN:	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CCA AT:	Cinza de casca de arroz alto teor de carbono
CCA MT:	Cinza de casca de arroz médio teor de carbono
CCA:	Cinza de casca de arroz
CH:	Hidróxido de cálcio
CP V-ARI:	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSA:	Canadian Standards Association
C-S-H:	Silicatos de cálcio hidratados
EB:	Especificação Brasileira
FATMA:	Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente
IAP:	Índice de Atividade Pozolânica
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT:	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR:	Norma Brasileira
RILEM:	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions
SENAI:	Serviço Nacional da Indústria
UFSC:	Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

A evolução na tecnologia do concreto e seus constituintes, principalmente o concreto de alto desempenho com adição de materiais pozolânicos, tem sido alvo de inúmeras pesquisas em todo o mundo. O uso de adições de origem mineral, como a cinza de casca de arroz, que é considerada como “superpozolana”, está recebendo maior atenção por parte dos pesquisadores, em função das vantagens técnicas que apresenta quando empregada no concreto de cimento Portland. Outra vantagem, que oferece um futuro promissor para a utilização deste resíduo agrícola, é sua fonte. No Brasil, a rizicultura chega à casa dos aproximadamente 10 milhões de toneladas de cereal produzidos por ano, e deste montante, cerca de 2 milhões são cascas, que após combustão, geram 400 mil toneladas de cinza. Assim sendo, a aplicabilidade destas cinzas em argamassas e concretos pode contribuir substancialmente com a preservação ambiental.

Apesar da cinza de casca de arroz residual, que é obtida sem controle de temperatura e tempo de exposição, já ter atingido bom desempenho técnico ao substituir parte do cimento em argamassas e concretos, com resultados comprovados em diversas pesquisas, apresenta elevado teor de carbono que, além de provocar um aumento na demanda de água do material, pela sua elevada superfície específica, também se apresenta como um produto de coloração final muito escura, implicando pouca aceitação no mercado.

O presente trabalho visou confirmar, em escala piloto, a adequação de uma metodologia para produzir uma cinza de casca de arroz modificada, com um teor bastante reduzido de carbono, a partir de um segundo processo de combustão da cinza residual “in natura”, mantendo seu bom desempenho como adição em concretos e argamassa. Para tanto, amostras de cinza coletadas antes e depois do processamento foram submetidas à moagem por 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas. Após a moldagem de corpos-de-prova de argamassa de referência (sem cinza) e utilizando os dois tipos de cinza em teores de 15% e 40% em substituição ao cimento CP V – ARI, em volume absoluto, mantendo-se o mesmo volume de aglomerante na pasta e relações água/aglomerante de 0,52 e 0,40, fez-se a comparação dos resultados de resistência à compressão axial e capacidade de incorporação de agregados das misturas, para uma dada consistência. Além disso, foram realizados testes de índice de atividade pozolânica e ensaio de Luxan.

Os resultados indicaram que o uso da cinza de casca de arroz modificada mostrou-se economicamente mais vantajoso, pela sua maior incorporação de agregado miúdo, ou seja, pela sua inferior demanda de água necessária para atingir uma dada consistência. Pode-se também concluir que o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento não deve ser tomado como um parâmetro limitante do uso destas pozolanas. Avaliou-se ainda a reatividade do material, através da análise da sua condutividade, pelo ensaio de Luxan.

## ABSTRACT

The evolution in concrete technology, mainly in high performance concrete using pozzolanic materials, has been focus of lots of researches around the world. The use of mineral additions in concrete, such as rice husk ash (rha), considered as a superpozzolan, is receiving great attention from researchers, due to their technical advantages. Moreover, its future seems to be promising because it's large availability. In Brazil, the rice production is estimated in 10 million tons a year, resulting in 2 million tons of huskes and, after burnt, 400 thousand tons of ash. Thereby, its use in concrete can substantially contribute to environment preservation.

Although residual rha, obtained without control of time and temperature of burnt, shows good technical results when replacing partially Portland cement in mortars and concrete, confirmed in several research works, it presents high carbon content that leads to an increase of water demand of the mixes, due to its high specific area, and gives a very dark colour to the final products, decreasing their acceptance in the construction market.

The present work aimed at confirming, in normal scale, the suitability of a methodology developed to produce modified rha, containing a small carbon percentage, consisting in a second burnt process applied on a residual rha, supposed to be capable of keeping the good performance exhibited by the "in natura" ash, when used in concrete. To accomplish this objective, samples of ashes collected before and after the second burnt were submitted to grinding for 2, 4, 6, 12, 18 and 24 hours. After casting mortar specimens without ash (reference) and using the two kinds of ash in amounts of 15% and 40% in replacement of Portland cement type V (high initial strength) by volume, keeping the same volume of binder in all cement pastes and adopting water/binder ratios of 0.52 and 0.40, comparisons among the results of compression strength and capacity of incorporating aggregates in the mixes, for the same consistency, were undertaken. Moreover, tests of pozzolanic activity index and Luxan test were carried out.

The obtained results pointed that the use of the modified rha leads to economical advantages for its superior capacity of incorporating aggregates in the mixes, i. e., for its lower water demand necessary to reach a certain consistence. It is also conclude that the model of pozzolanic activity index with cement should not be taken as a limiting parameter in the use of this pozzolan. The reactivity of the material has been evaluated through the analysis of its conductivity, according to Luxan test.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância da Pesquisa

Na construção civil, o material mais largamente utilizado, sendo inclusive citado como um material universal, é o concreto de cimento Portland. Segundo BRUNAUER e COPELAND (1964) *apud* MEHTA e MONTEIRO (1994) em 1963, o consumo mundial total de concreto foi de três bilhões de toneladas, o que corresponde a um consumo de uma tonelada por habitante. Com exceção da água, o homem não consome nenhum outro material em tão grande escala, conforme citado por MEHTA e MONTEIRO (1994). O concreto de cimento Portland, quando comparado a outros materiais estruturais, apresenta grande versatilidade, e isto se deve principalmente ao fato de ser um material monolítico, que não apenas possibilita a arquitetos e engenheiros explorar sua criatividade na elaboração de formas ousadas, como também proporciona segurança quando do cálculo de estruturas. Entre suas vantagens, encontram-se ainda sua boa resistência mecânica e ao fogo e matéria-prima abundante e de baixo custo.

Apesar das grandes vantagens apresentadas pelo concreto, este material também possui suas desvantagens, como peso próprio elevado, variações volumétricas e liberação de elevado calor de hidratação. No sentido de superar as naturais deficiências do concreto normal, geralmente relacionadas aos seus materiais constituintes (cimento Portland comum e agregados convencionais), avanços tecnológicos incentivaram a pesquisa de concretos especiais, como o concreto leve, concreto reforçado com fibras, concreto massa, concreto polímero, concreto de alta resistência e concreto de alto desempenho, entre outros. Para alguns autores, a evolução gradual do concreto convencional passou pelo concreto de alta resistência – CAR e, posteriormente, para concreto de alto desempenho – CAD, como sugere NEVILLE (1997).

Na constituição do concreto de alto desempenho – CAD, estão presentes os agregados comuns de boa qualidade, o cimento Portland, além de sílica ativa, em quantidades que podem variar de 5 a 15% em relação à massa total de cimento. Opcionalmente, pode ser utilizada cinza volante ou escória granulada de alto-forno. O uso destas adições tem por objetivo melhorar algumas características do concreto e minimizar o seu custo. Essencialmente deve ser utilizado um superplastificante, que permite a redução do teor de água do concreto e, usualmente, possui um

consumo entre 5 e 15 l/m<sup>3</sup> de concreto (dependendo do teor de sólidos do aditivo e de sua natureza), segundo NEVILLE (1997).

A idéia de se utilizar materiais alternativos com propriedades pozolânicas, ou cimentantes na formulação de aglomerantes, não se constitui propriamente uma novidade. Para MOHANTY (1974), a história da civilização humana é absolutamente cíclica. Babilônia, Grécia, Roma, Índia revelaram o uso de diferentes materiais de construção em diferentes tempos, e essas tendências têm sido seguidas. O cimento, criado a partir da pozolana, foi patenteado no século XX por tecnólogos do cimento, refletindo um esforço repetitivo de outras épocas. Segundo KLOSS (1996), a origem da palavra pozolana é derivada do nome Pozzuoli, uma cidade próxima a Nápoles, na Itália, onde um tipo de argila, que foi inicialmente misturada com cal e água, desenvolvendo propriedades cimentantes, passou a ser usada como material de construção civil por suas características de resistência e durabilidade.

Deve ser ressaltado que a maioria dos materiais alternativos com características pozolânicas, isto é, de origem silicosa e mineralogicamente amorfos, possuindo reatividade com a cal, ou propriedades cimentantes, são geralmente cinzas ou escórias provenientes de atividades agrícolas e industriais, cuja utilização plena continua sendo um desafio para a humanidade.

CINCOTTO e KAUPATEZ (1988) consideram que a construção civil é o ramo da atividade tecnológica que apresenta as melhores condições de absorver os resíduos sólidos. A perspectiva de consumo destes resíduos em produtos derivados do cimento Portland, sendo este um dos materiais mais empregados pelo homem, é uma contribuição que a engenharia civil oferece à sociedade, com o objetivo de preservar o meio ambiente e, ao mesmo tempo, produzir construções mais duráveis e com menor custo econômico e social. Acumular estes subprodutos em aterros representa perda de material, além de causar sérios problemas de poluição ambiental. O descarte como agregado para concreto, e em subleito de rodovias, é uma forma de aproveitamento menos nobre, que não explora todo o potencial dos materiais pozolânicos e cimentantes, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994).

Segundo ISAIA (1997), os resíduos agrícolas, como a casca de arroz, representam uma fonte de agressão à natureza, uma vez que, em geral, são depositados sem cuidados, gerando poluição de

mananciais aquíferos ou, então através da combustão a céu aberto, como forma de eliminação destes resíduos. Porém mesmo realizando esta redução, ainda sobra a cinza da casca de arroz.

Dentre as pozolanas hoje utilizadas na confecção dos concretos de alto desempenho, destaca-se a sílica ativa, que é uma sílica amorfa com alta superfície específica, apresentando, conseqüentemente, grande reatividade com a cal liberada na hidratação do cimento Portland, contribuindo com grande eficiência para o aumento da resistência do concreto. Este material, que é um resíduo da produção de ferro-silício ou de silício metálico, já tem seu uso respaldado pelos resultados de muitas pesquisas realizadas em todo o mundo. Entretanto, seu uso em larga escala torna-se comprometido pela sua quantidade disponível no mercado e conseqüentemente seu alto valor comercial, em torno de cinco vezes maior que o preço do cimento. Além disso, sua elevada finura, dependendo da relação água/cimento e da porcentagem de adição, demanda um alto consumo de aditivos superplastificantes para a obtenção de concretos com trabalhabilidade adequada (DAFICO, 2001).

Entretanto, pesquisas realizadas em todo o mundo já demonstraram que sílica reativa de qualidade, até superior a este produto hoje comercializado, pode ser obtida através do processamento da cinza da casca de arroz, segundo DAFICO (2001). Vários pesquisadores têm relatado as diversas propriedades da cinza da casca de arroz, em adição ao concreto, como a redução da segregação e da exudação, melhorando a trabalhabilidade do mesmo. Excetuando-se a cinza da casca de arroz e a sílica ativa, nenhum outro material pozolânico tem a habilidade de contribuir para o aumento da resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias (MEHTA, 1983).

A cinza da casca de arroz começou a ser pesquisada como material pozolânico a partir da década de 70, principalmente na Índia e nos Estados Unidos. Porém, foi com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, na década de 80, que houve maior preocupação dos pesquisadores na produção de cinza de casca de arroz com elevada pozolanicidade, e que possibilitasse sua utilização no lugar da sílica ativa. A norma americana ASTM C 989 classifica a cinza da casca de arroz, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade, juntamente com a sílica ativa. O pesquisador que mais publicou artigos sobre a cinza da casca de arroz foi Mehta, desenvolvendo inclusive um incinerador doméstico capaz de controlar as condições de tempo e temperatura de queima da casca de arroz. Esse incinerador possibilitou que

a sílica permanecesse em estado amorfo e com elevada superfície específica, produzindo, assim, uma cinza de altíssima reatividade, mas com alto teor de carbono, resultando em um material de cor preta e de baixo valor comercial (MEHTA e PITT, 1977).

No Brasil, vários pesquisadores já estudaram as condições de queima da cinza da casca de arroz residual, ou seja, sem controle de tempo e temperatura de queima, podendo-se citar: CINCOTTO (1988), SILVEIRA, FERREIRA e DAL MOLIN (1997), SANTOS (1999). Muitos estudos também enfocaram a influência do grau de moagem da cinza, como PRUDÊNCIO e SANTOS (1997), constatando que a finura, a densidade e a forma da partícula têm influência direta na relação água/(cimento + cinza) e na retenção de água pelo concreto. O aumento da finura da cinza da casca de arroz melhora a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa, segundo FARIAS e RECENA (1990).

A opinião dos vários pesquisadores, que estudaram as cinzas residuais e aquelas obtidas em condições de queima controladas, é unânime em apontar o grande potencial do seu emprego em concreto. Entretanto, apesar dos 30 anos de estudos, seu uso continua muito restrito.

Visando eliminar uma das maiores barreiras ao uso da cinza de casca de arroz como adição mineral no concreto, DAFICO (2001) realizou estudos sobre a combustão da casca de arroz em leito fixo, de forma a produzir uma cinza de coloração cinza-claro com baixo teor de carbono. Iniciou, também, estudos visando obter este tipo de cinza através de uma segunda queima de cinzas residuais do processo de beneficiamento do arroz, onde a casca é utilizada como combustível. Estes estudos, realizados em escala laboratorial e utilizando fornos de pequenas dimensões, conduziram à obtenção de pozolanas de boa qualidade.

## **1.2 Objetivo Geral**

Desenvolver uma metodologia necessária para produzir cinza de casca de arroz através de segunda queima, em leito fixo, de forma a obter um material altamente pozolânico e com reduzido teor de carbono, sendo conseqüentemente de cor branca ou cinza clara, com alto valor comercial em escala industrial. Para tanto, construiu-se um forno piloto na fábrica Toniolo Pré-Moldados, localizada em Palhoça, região da Grande Florianópolis. Buscou-se, também, verificar

a adequabilidade de suas propriedades em relação às exigências normativas necessárias à engenharia.

### **1.3 Objetivos Específicos**

- i- Obter o melhor tempo de moagem e verificar sua influência na área específica da cinza;
- ii- Comparar o desempenho entre a argamassa padrão (sem substituição) e as argamassas confeccionadas com variados teores de substituição de cimento, em volume absoluto, utilizando cinza de casca de arroz “in natura” e modificada, em diferentes graus de moagem.

Nesta pesquisa, denomina-se cinza de casca de arroz modificada, o material obtido através de controle adequado da temperatura, do tempo de exposição e injeção de ar comprimido, a partir da segunda queima da cinza de casca de arroz “in natura”, que é produzida sem controle térmico.

### **1.4 Justificativa**

Assim sendo, a realização deste trabalho justificou-se pela importância de se estudar a incorporação de subprodutos industriais, que apresentam características pozolânicas, e que atendem ao quádruplo enfoque iniciado pela letra E: Engenharia, Economia, Energia e Ecologia (MEHTA, 1992).

### **1.5 Estrutura do Trabalho**

Para atingir os objetivos propostos, esta pesquisa apresenta-se dividida em capítulos, conforme segue:

O capítulo 1 trata da introdução, apresentando um breve resumo histórico, bem como a motivação para o trabalho através da importância do assunto e seus objetivos.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos materiais pozolânicos, desde sua definição, classificação, a reação pozolânica e suas características físicas e químicas.

O capítulo 3 aborda uma revisão bibliográfica sobre a casca e a cinza da casca de arroz, influência da queima e grau de moagem e estudos sobre a incineração da casca.

O capítulo 4 relata o programa experimental, detalhando a construção do forno, equipamentos utilizados, software para aquisição de dados durante a combustão, caracterização da cinza pura e da cinza modificada, procedimentos de moagem, ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP), confecção de argamassas para ensaio de resistência à compressão.

O capítulo 5 apresenta os resultados e respectiva análise dos dados dos ensaios propostos no programa experimental.

No capítulo 6, são apresentadas as considerações finais do trabalho, apontando as vantagens e as desvantagens da metodologia proposta, além de sugestões para novos trabalhos.

## 2. POZOLANAS

### 2.1 Definição

Os materiais pozolânicos, ou pozolanas são classificados como adições minerais. A adição ou a substituição de parte do cimento por pozolanas em argamassas e concretos confere, além da redução de custos, melhoria na trabalhabilidade do concreto fresco (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo a NBR 12653/92 e ASTM C 618-95, “materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Para NEVILLE (1997), a pozolana deve apresentar-se finamente subdividida, pois somente assim poderá se combinar com o hidróxido de cálcio (liberado pela hidratação do cimento Portland) na presença de água formando silicatos estáveis, que, por sua vez, possuem propriedades cimentantes. O autor salienta, ainda, que a sílica deve estar no estado amorfo (vítreo) e que a forma cristalina possui reatividade muito pequena.

As pozolanas possuem sílica pouco cristalizada e em geral têm elevada superfície específica. Quando são adicionadas a misturas contendo cimento Portland, possuem a propriedade de reagirem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio) liberado na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), contribuindo para o aumento do volume deste tipo de gel insolúvel em água, que é o principal constituinte das pastas de cimento hidratadas e principal responsável por sua resistência e durabilidade. Segundo CINCOTTO (1988), essa reação deve ocorrer em temperatura ambiente, durante um período de tempo não muito longo e com uma finura industrial normal. A adição de pozolanas em argamassas ou concretos melhora seu desempenho, e a substituição de parte do cimento por pozolanas controla a formação dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , aumentando a densidade da pasta e das regiões de interface.

Um importante conceito associado ao desempenho das pozolanas é o de *atividade pozolânica* ou *pozolanicidade*, que se relaciona com a capacidade de reação do material pozolânico, e está associado à fixação do hidróxido de cálcio, na forma de compostos hidratados mais ou menos definidos, os quais contribuem para as resistências mecânicas.

## 2.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos

A classificação segundo a NBR 12653/92 é feita com base na origem dos materiais pozolânicos, que os divide em três classes distintas, conforme TABELA 2.1. A ASTM C 618-95 também classifica os materiais pozolânicos segundo sua origem, conforme a TABELA 2.2.

TABELA 2.1 - Classificação dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653/92.

Classe	NBR 12653/92
N	Pozolanas naturais e artificiais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Cinza volante produzida pela combustão do carvão mineral em usinas termoeletricas.
E	Pozolanas que diferem das classes anteriores.

TABELA 2.2 - Classificação dos materiais pozolânicos segundo a ASTM 618-95.

Classe	ASTM 618-95
N	Pozolanas cruas ou calcinadas, que concordam com as exigências aplicáveis conforme dado nesta classe, como algumas terras diatomáceas; quartzo de opalina e xistos; tufos e cinzas ou pedras vulcânicas, podendo ou não serem processadas por calcinação; e vários materiais que exigem calcinação para levar a propriedades satisfatórias, como algumas argilas e xistos.
F	Cinza volante produzida pela queima de carvão antracito ou betuminoso, que preenchem os requisitos dados nesta classe. Esta classe de cinza volante tem propriedades pozolânicas.
C	Cinza volante produzida de lignina ou carvão betuminoso, que preenche os requisitos aplicáveis para esta classe. Esta classe de cinza volante, além de apresentar propriedades pozolânicas, também apresenta propriedades cimentantes. Algumas cinzas volantes da classe C podem apresentar conteúdo de cal maior que 10%.

Em seu estudo DAFICO (2001) apresenta micrografias de cinza de casca de arroz, cinza volante e a sílica ativa. Algumas características destas pozolanas são descritas a seguir:

a) A cinza de casca de arroz é considerada uma pozolana altamente reativa, constituída essencialmente de sílica pura na forma não cristalina com partículas altamente celulares de diâmetro inferior a  $45\mu\text{m}$ , conforme observa-se na micrografia apresentada na FIGURA 2.1.

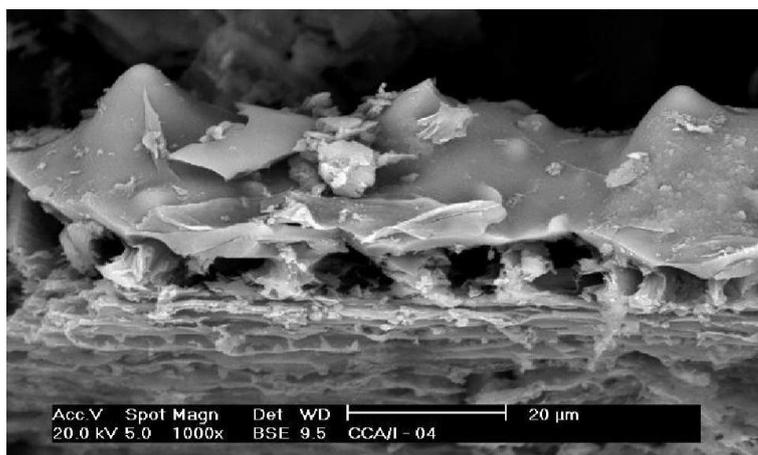


FIGURA 2.1: Micrografia de uma amostra de cinza de casca de arroz - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).

b) A cinza volante apresenta partículas esféricas, lisas, sólidas e com diâmetro médio de  $20\mu\text{m}$  conforme FIGURA 2.2.

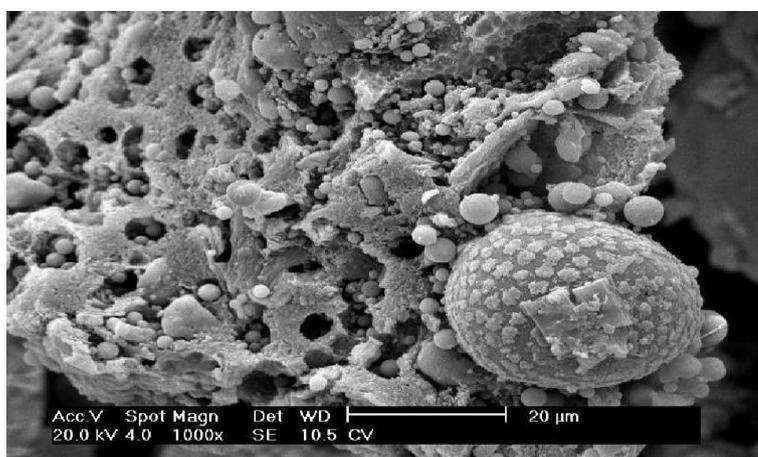


FIGURA 2.2: Micrografia de uma amostra de cinza volante - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).

c) A sílica ativa apresenta-se pura na forma não cristalina com partículas esféricas sólidas e diâmetro médio de  $0,1\ \mu\text{m}$ .

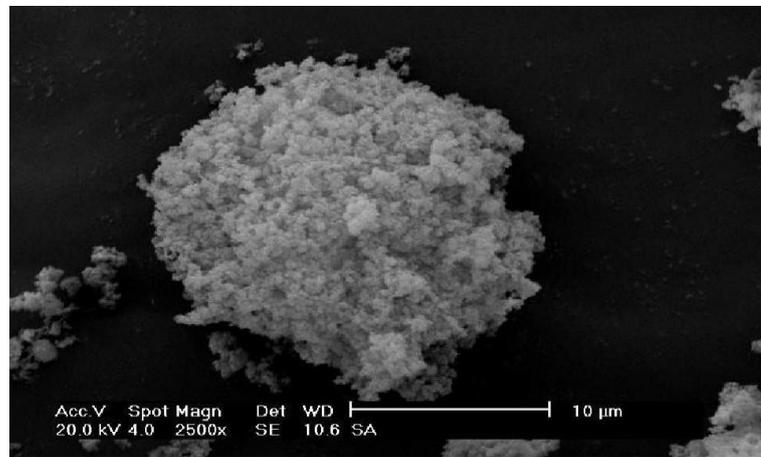


FIGURA 2.3: Micrografia de uma amostra de sílica ativa - Magnificação de 2500 (DAFICO, 2001).

MEHTA e MONTEIRO (1994) propõem uma classificação mais abrangente para as adições minerais, de acordo com suas características pozolânicas ou cimentantes. A TABELA 2.3 mostra a composição mineralógica e características das partículas que influem sobre o comportamento do concreto, bem mais que a origem do material ou sua composição química. A classificação apresenta os materiais divididos em dois grupos: materiais naturais e subprodutos. Os materiais naturais são processados com a intenção única de produzir uma pozolana e seu processamento inclui em geral britagem, moagem e classificação granulométrica. Os subprodutos não são os produtos primários de suas indústrias produtoras, e no seu processamento podem requerer a secagem ou a pulverização.

TABELA 2.3 - Classificação, composição e características das partículas de aditivos para concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Classificação	Adição mineral	Composição química e mineralógica	Características da partícula
Cimentante	Escória granulada de alto-forno	Silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Pode haver pequena quantidade de compostos cristalinos do grupo melilita.	Antes do processamento, tem a dimensão da areia e possui de 10 a 15 % de umidade. Antes do uso deve ser seco e moído até partículas menores que 45 $\mu\text{m}$ (50 $\text{m}^2/\text{g}$ finura Blaine). A textura das partículas é rugosa.
Cimentantes e pozolânicos	Cinza volante com alto teor de cálcio	Vidro de silicato contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. Pequena quantidade de matéria cristalina que consiste geralmente de quartzo $\text{C}_3\text{A}$ . O carbono não queimado é inferior a 2%.	Pó com 10 a 15% de partículas maiores que 45 $\mu\text{m}$ (30 a 40 $\text{m}^2/\text{g}$ de finura Blaine). Partículas são lisas, sólidas, esféricas, menores que 20 $\mu\text{m}$ de diâmetro.
Pozolanas altamente reativas	Sílica ativa	Sílica pura na forma não cristalina.	Pó extremamente fino, consistindo de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1 $\mu\text{m}$ (20 $\text{m}^2/\text{g}$ de área específica, por adsorção de nitrogênio).
	Cinza de casca de arroz	Constituída essencialmente de sílica pura na forma não cristalina.	Partículas geralmente menores que 45 $\mu\text{m}$ mas altamente celulares (área específica, por adsorção de nitrogênio, de 60 $\text{m}^2/\text{g}$ ).
Pozolanas comuns	Cinza volante de baixo teor de cálcio	Vidro de silicato contendo alumínio, ferro e álcalis. Pequena quantidade de matéria cristalina, geralmente consiste em quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.	Pó com 30 a 40% de partículas maiores que 45 $\mu\text{m}$ , (20 a 30 $\text{m}^2/\text{g}$ de finura Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com 20 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.
	Materiais naturais	Contém quartzo, feldspato e mica e vidro de aluminossilicato.	As partículas são moídas abaixo de 45 $\mu\text{m}$ e apresentam textura rugosa.
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escória, cinza de casca de arroz queimada em campo.	Silicatos cristalinos e pequena quantidade de matéria não-cristalina.	As partículas devem ser moídas finamente para desenvolver atividade pozolânica. Após a moagem, apresentam textura rugosa.

### 2.3 Reação Pozolânica

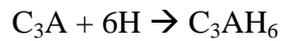
SILVEIRA e RUARO (1995) salientam que as pozolanas naturais (argilas calcinadas) e artificiais (subprodutos industriais) dos fornos de usinas termoelétricas, que possuem propriedades pozolânicas são empregadas como fonte de incorporação mineral em concretos e provocam o aparecimento de dois efeitos: o efeito microfiller e o efeito pozolânico. O efeito microfiller é devido ao tamanho das partículas que se introduzem entre os grãos do cimento, alojando-se nos interstícios da pasta; diminuindo desta forma o espaço disponível para a água; agindo como ponto de nucleação e interferindo na orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio; melhorando sua resistência à compressão. O efeito pozolânico está relacionado com a capacidade de reação da pozolana com a cal.

Para ALMEIDA (1992), as adições minerais no concreto atuam de forma física e química. Fisicamente é denominado de efeito filler, que é o preenchimento de vazios, e reflete-se no aumento da coesão e da compacidade, tanto na pasta quanto na interface pasta-agregado. O efeito químico é representado pela reação pozolânica, ou seja, a transformação do frágil hidróxido de cálcio no resistente silicato de cálcio hidratado.

SILVEIRA e DAL MOLIN (1995) concordam que as adições minerais modificam a microestrutura da pasta de cimento. A sílica ativa, a cinza da casca de arroz, as pozolanas naturais, a escória de alto forno e a cinza volante podem se combinar com o hidróxido de cálcio livre, resultando numa pasta menos heterogênea, mais resistente e com menor calor de hidratação. Para as autoras, o efeito destas adições em concretos é maior, pois as mesmas se combinam com o hidróxido de cálcio livre formado principalmente na interface pasta/agregado, que possui baixa resistência à compressão.

Segundo NEVILLE (1997), a pozolanicidade ainda não foi completamente desvendada, em função de sua enorme complexidade, pois tanto a área superficial específica quanto a composição química estão relacionadas entre si e possuem grande importância. O cimento Portland é formado por quatro componentes básicos: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), que ao reagirem com água originam compostos hidratados.

O  $C_3A$  reage nas primeiras horas e continua até os 3 dias de idade, sendo o principal responsável pela pega e endurecimento.



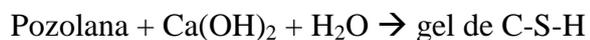
O  $C_3S$  também inicia sua reação nas primeiras horas, estendendo-se até os 28 dias. É o responsável pelo desenvolvimento da resistência neste período.



O  $C_2S$  é responsável pelo aumento gradativo da resistência em idades mais avançadas.



A reação pozolânica se processa da seguinte forma: durante as reações de hidratação do  $C_2S$  e  $C_3S$  ocorre a formação do  $Ca(OH)_2$  (hidróxido de cálcio). A sílica existente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio, formando os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que têm menor relação  $CaO/SiO_2$ , formando produtos de menor basicidade do que os produzidos pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento e, portanto, são mais estáveis quimicamente. Esta reação, bem como a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentos (SANTOS, 1997).



Segundo MEHTA (1992), o Comitê Técnico da RILEM 73 SBC classifica a sílica ativa e a cinza da casca de arroz obtida por queima a baixas temperaturas, como materiais com elevada pozolanicidade, ou altamente reativos, em comparação com os demais subprodutos pozolânicos e cimentantes, e são chamadas de superpozolanas. Ainda segundo MEHTA (1992), quando a cinza da casca de arroz é originada através de baixa temperatura de combustão, os períodos de cura não precisam ser longos para obter as resistências desejadas, como mostra a FIGURA 2.4.

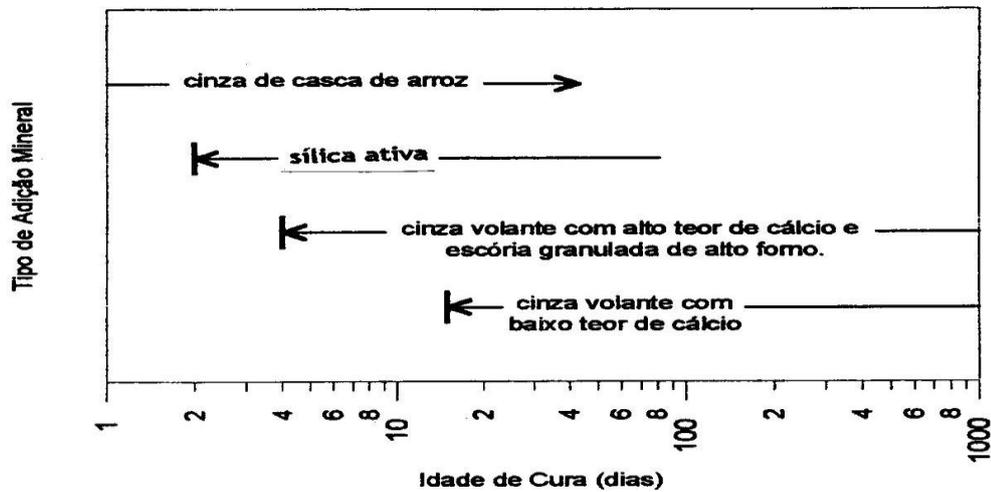


FIGURA 2.4: Período efetivo da contribuição da reação pozolânica na resistência à compressão (MEHTA, 1992).

Nas cinzas volantes com baixo teor de cálcio, a reação pozolânica tem início por volta do 11º dia após a hidratação do cimento aos 20°C, e um efeito significativo da reação na resistência à compressão foi observado aos 28 dias, segundo OWENS e BUTLER.(1980), citados por MEHTA (1983).

DIAMOND e LOPEZ-FLORES (1981) *apud* MEHTA (1983), também utilizando cinzas volantes com baixo teor de cálcio e com 30% de substituição de cimento em massa, não detectaram contribuição na resistência de argamassas testadas segundo a ASTM C 109 com 1, 3 e 7 dias, mas constataram que a reação pozolânica apresentou uma significativa contribuição para a resistência à compressão aos 28 dias. Aos 90 dias, a resistência à compressão de argamassas de cimento com cinza volante foi da mesma ordem da argamassa referência com cimento.

Para MEHTA (1983), as expectativas dos referidos autores para cinzas volantes com elevado teor de cálcio eram de encontrar valores significantes para resistência à compressão aos 3 dias e similar às argamassas de referência aos 7 dias. As pozolanas altamente reativas iniciam sua contribuição com relação à resistência à compressão quase com o início da hidratação do

cimento e as cinzas volantes com baixo teor de cálcio não mostram grande atividade pozolânica, capaz de afetar a resistência até duas semanas após a hidratação.

## 2.4 Características Químicas e Físicas das Pozolanas

Para que um material apresente propriedades pozolânicas, é necessário que possua características químicas e físicas específicas. A NBR 12653/92, que é análoga à americana ASTM C618-95, estabelece algumas exigências mínimas com relação às propriedades químicas e físicas das pozolanas, que são apresentadas nas TABELAS 2.4 e 2.5, respectivamente.

TABELA 2.4 - Propriedades químicas das pozolanas – NBR 12653/92.

Propriedades Químicas	NBR 12653/92			
	Classe	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% mínima)		70,0	70,0	50,0
SO <sub>3</sub> (% máxima)		4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máxima)		3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máxima)		10,0	6,0	6,0
Álcalis disponível em Na <sub>2</sub> O (% máxima)		1,5	1,5	1,5

TABELA 2.5 - Propriedades físicas das pozolanas – NBR 12653/92.

Propriedades físicas	NBR 12653/92			
	Classe	N	C	E
Material retido na peneira # 45 µm (% máxima)		34	34	34
Índice de atividade pozolânica:				
Com cimento, aos 28 dias em relação ao controle (% mínima)		75	75	75
Com cal, aos 7 dias em MPa		6,0	6,0	6,0
Água requerida (% máxima)		115	110	110

### **a) Composição Química**

Para MALHOTRA e MEHTA (1996), a diferença entre os limites mínimos exigidos pelas normas com relação ao três óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é arbitrária. Para a Classe F, o limite mínimo é de 70% e para Classe C é de 50%. Muitos pesquisadores já constataram que não há correlação com o desempenho do material no concreto. Assume-se que estes constituintes estão presentes no estado não cristalino (ou seja, na forma de vidro) e, portanto, são responsáveis pela existência da atividade pozolânica dos produtos cimentantes através das reações químicas com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais. Esta associação não é correta, pois depende da composição química do carvão e das condições de queima. Os autores comentam também que, para as pozolanas naturais, a norma canadense CSA-A23.5 não exige somatória mínima dos três principais óxidos.

Para MEHTA (1987), estes óxidos, quando presentes em estado não cristalino ou pouco cristalino, participam ativamente na reação pozolânica; porém, a exigência mínima da soma destes constituintes assume que eles devem estar sempre presentes na forma reativa, o que é raramente encontrado. A maioria das pozolanas naturais contém grandes quantidades de quartzo e feldspato, que são altamente cristalinos e não reagem com a cal.

### **b) Cristalinidade**

A sílica ativa e a cinza da casca de arroz são materiais pozolânicos altamente reativos. Esta reatividade é fruto da combinação de dois fatores, que são a elevada área superficial e a estrutura predominantemente não cristalina. A fase não cristalina na sílica ativa consiste de uma desordenada estrutura de  $\text{SiO}_2$ , que é produto da solidificação ou condensação do material fundido. Na cinza da casca de arroz, queimada em temperaturas inferiores a  $700^\circ\text{C}$ , esta estrutura desordenada também existe, mas o produto final é obtido pela decomposição e sinterização da opalina ou da sílica hidratada fundida exteriormente. Ocasionalmente, podem ser encontradas pequenas quantidades de impurezas cristalinas, como 1 a 2% de cristobalita (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

### **c) Presença de Material Carbonoso**

Não existem subsídios para afirmar que a presença de material carbonoso afeta a reatividade de uma pozolana. Entretanto, sua presença pode causar prejuízos ao uso deste material, por tornar as argamassas e concretos com ele confeccionados extremamente tixotrópicos e aumentar a demanda de água, ou de aditivos redutores de água. Daí a importância do seu controle.

Sua determinação normalmente é feita indiretamente através de ensaios de perda ao fogo. Segundo MEHTA (1987), a norma canadense CAN 3 – A 23.5 limita em 10% o valor máximo de perda ao fogo e 3% de umidade livre, assegurando que a pozolana estará convenientemente seca e no estado calcinado antes do uso. MALHOTRA e MEHTA (1996) informam que a norma inglesa BS 3892-1993 limita em 6% o valor máximo de perda ao fogo.

Entretanto, SANTOS (1997), utilizando cinza da casca de arroz residual com teores de perda ao fogo variando entre 9 e 11%, não observou efeitos relevantes no desempenho de argamassas e concretos, tanto com relação a resistências à compressão, quanto à demanda de água das misturas.

CINCOTO, AGOPYAN e JOHN (1990) produziram cinza a partir da casca queimada em caldeira, com elevado índice de carbono medido pela perda ao fogo, esta última variando entre 12 e 17% do peso. Para diminuir esses teores, decidiram utilizar um tempo de exposição da casca durante a combustão em 1 hora e 33 minutos, obtendo um valor menor que 2% em massa.

### **d) Presença de Sulfatos e Álcalis**

A expansão e a ruptura do concreto, muitas vezes, estão relacionadas com a presença de sulfatos e álcalis, presentes nos materiais constituintes, entre eles, os aditivos minerais. Com relação aos álcalis, somente a ASTM C 618 faz menção de um limite de 1,5% no total dos álcalis disponíveis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), quando no concreto for usado agregado reativo. Para as pozolanas naturais, a norma canadense CSA-A23.5 estabelece que o limite máximo é de 3% de  $\text{SO}_3$  (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

**e) Umidade**

Por definição, uma pozolana é um material que isoladamente, em presença de água, não reage. Desta forma, segundo GAVA (1999), os limites impostos pelas normas, referentes à umidade do material pozolânico, são necessários apenas para a dosagem do concreto, no controle da relação água/aglomerante e não devem servir como um critério para sua avaliação.

**f) Finura**

CALLEJA (1983) considera que a finura da pozolana é a característica física mais importante a ser levada em consideração durante sua avaliação, pois, para que a mesma desenvolva compostos cimentantes, deverá apresentar uma finura maior que as partículas de cimento.

Segundo SWAMY (1993), a presença de partículas maiores que  $45\mu\text{m}$  influi na quantidade de água no concreto e, por conseguinte, a determinação do resíduo na peneira  $45\mu\text{m}$  indica o teor de partículas maiores, que além de não contribuírem em nada para o desenvolvimento da resistência, podem concentrar partículas de material carbonoso. O autor comenta ainda, que além do controle da quantidade de partículas menores que  $45\mu\text{m}$ , deve ser verificado se as mesmas apresentam-se na forma amorfa.

Segundo MEHTA (1987), o tamanho da partícula é apenas um dos parâmetros que influi na atividade pozolânica. A norma indiana IS – 1344 permite no máximo 12% de partículas grossas acima de  $45\mu\text{m}$ .

MEHTA (1992) sugere um valor de 20% para o material retido na peneira de  $45\mu\text{m}$ , garantindo desta forma que os 80% de pozolana adicionada ao concreto seja de fato reativa.

**g) Índice de Atividade Pozolânica**

A maioria das normas de especificação fixa um valor mínimo para uma propriedade conhecida como índice de atividade pozolânica. Este índice é obtido experimentalmente, através de diferentes tipos de ensaio. Entretanto, não existe um consenso entre as diferentes normas sobre qual é a forma mais adequada de avaliar tal propriedade. Sabe-se que a resistência de uma pasta

de cimento endurecida depende basicamente da porosidade, ou seja, da relação água/aglomerante, e da diminuição progressiva dos espaços porosos pelo preenchimento com produtos de hidratação. Dessa forma, qualquer tipo de ensaio onde a relação água/aglomerante não seja mantida constante, que é o caso da grande maioria dos propostos por distintas normas internacionais que fixam a quantidade de água da mistura através de testes de consistência, pode levar a conclusões distorcidas a respeito desta propriedade.

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), a medida do índice de atividade pozolânica de uma adição mineral com cimento Portland é, em geral, realizada através de ensaio acelerado em argamassas, onde parte do cimento Portland é substituído pela pozolana, utilizando-se cura com temperatura elevada e controlada. A norma inglesa determina o valor de 30% em massa para substituição de cimento pelo aditivo mineral. As normas canadense e americana, com base na ASTM C 311, exigem uma substituição de cimento pelo aditivo mineral de 35% em volume. A ASTM C 311 também determina 1 dia de cura úmida em temperatura normal, seguido por 6 a 27 dias de cura a 38°C. Na norma canadense, o teste acelerado é feito com cubos de argamassa que são armazenados por 1 dia em temperatura normal, seguido por 6 dias aos 65°C. Porém, a cura acelerada com temperatura acima de 50°C não é indicada, pois distorce os resultados da reação pozolânica.

Para DAFICO (2001), os ensaios de índice de atividade pozolânica medem quanto se pode substituir de cimento por pozolana para fabricação de cimentos com adições. Este é um número influenciado pelo conteúdo de sílica amorfa, principalmente pela superfície específica deste material. Segundo ele, o mais adequado para estudar o desempenho de pozolanas no concreto seria através de um ensaio que medisse sua atividade química. Uma alternativa seria o ensaio de LUXAN (1989), que mede a variação da condutividade de uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  antes, e após 2 minutos da adição, e mistura continuada de 5g de pozolana em 200ml da solução.

GAVA (1999), em sua dissertação de mestrado, apresenta um resumo dos principais métodos para determinação do índice de atividade pozolânica, aqui reproduzido de uma forma ainda mais sintética.

- 1- NBR 5752/92 – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica.

Nesta metodologia, são confeccionadas duas argamassas com traço 1:3 (cimento : areia normal). Na primeira argamassa é usado apenas cimento Portland e, na segunda, 35% do volume absoluto do cimento é substituído pela pozolana. A consistência da argamassa, medida na mesa de consistência (*flow table*), é controlada pela adição de água e deve ficar compreendida entre  $(225\pm 5)$ mm. Na mistura, moldagem, capeamento e ruptura dos corpos-de-prova cilíndricos (5x10)cm são adotadas as recomendações da NBR 7215/96. São moldados três corpos-de-prova para cada argamassa. A cura inicial ocorre dentro dos moldes, em câmara úmida, com temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Após 24 horas, os corpos-de-prova são desmoldados e colocados em ambiente hermeticamente fechado, permanecendo estanques com temperatura de  $(38\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , por um período de 27 dias. Aos 28 dias, os corpos-de-prova, já resfriados, são capeados e realiza-se o ensaio de resistência à compressão. O índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência média dos corpos-de-prova moldados com a substituição de pozolana pela resistência média dos corpos-de-prova moldados com cimento, sendo seu resultado apresentado em percentual. Uma limitação deste tipo de ensaio é que os resultados podem ser influenciados pela composição do cimento usado e pela variação da relação água/materiais cimentantes, que é determinada pelo teste de consistência padrão.

- 2- NBR 5751/92 – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal.

Prepara-se uma argamassa de cal no traço 1:9 (hidróxido de cálcio : areia normal) em massa. Coloca-se, para a quantidade do material pozolânico a ser testado, o dobro do volume absoluto de hidróxido de cálcio, ou seja,  $(2 \times (\text{massa específica da pozolana} / \text{massa específica do hidróxido de cálcio}) \times \text{massa do hidróxido de cálcio})$ . A água utilizada na mistura deve ser suficiente para atingir uma consistência de  $(225\pm 5)$ mm. São moldados três corpos-de-prova. A cura é realizada dentro dos moldes, durante sete dias. Nas primeiras 24 horas de cura, a temperatura deve ser de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e nos demais dias de  $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova são desmoldados 4 horas e 30 minutos antes do ensaio de resistência à compressão, para que sejam resfriados até a temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e

capeados, conforme a NBR 7215/96. O índice de atividade pozolânica é obtido pela média da resistência à compressão dos três corpos-de-prova, e seu resultado é expresso em MPa. Devido à variação da qualidade da cal, e seus efeitos no resultado do teste, a maioria dos pesquisadores não mais utiliza este ensaio.

3- MB 1154/91 – Cimento Portland Pozolânico – Determinação da pozolanicidade – Método de Fratini

Compara-se a quantidade expressa em milimol CaO/l de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de hidróxido de cálcio capaz de saturar um meio com a mesma alcalinidade. O método possui uma curva de saturação do hidróxido em função da alcalinidade. Para o material ser considerado pozolânico, deve estar representado abaixo desta curva de saturação (CINCOTTO, 1988).

4- Método Chapelle Modificado - IPT

A pozolanicidade do material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana. Neste teste, são comparadas duas misturas: uma possui pozolana com hidróxido de cálcio e outra sem a presença de pozolana. As misturas ficam em um equipamento padronizado, em ebulição a 90°C por um período de 16 horas. Depois, mede-se a quantidade de óxido de cálcio que não reagiu. A pozolanicidade do material será maior, quanto mais elevado for o consumo de CaO e o resultado deste ensaio é expresso pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico.

5- ASTM C 311/93 – Metodologia de Ensaio para Amostragem e Teste de Cinza Volante ou Pozolanas Naturais para uso como Adição Mineral em Concreto de Cimento Portland.

São preparadas duas argamassas com traço 1:2,75 (cimento : areia normal). A primeira argamassa é de controle e possui apenas cimento, com relação água/cimento de 0,48. A segunda argamassa possui 20% da massa do cimento substituída pela pozolana e a quantidade de água é aquela necessária para atingir uma consistência de ( $\pm 5$ )mm sobre o valor da consistência da argamassa de controle. São moldados três corpos-de-prova para cada idade de ensaio, podendo-se optar por 7 ou 28 dias. Os corpos-de-prova são

moldados e deixados em câmara úmida por 24 horas, com temperatura de  $(23\pm 1,7)^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova são desmoldados e curados até a data do ensaio em água de cal. Na idade determinada, é feito o capeamento com mistura de enxofre e o ensaio de resistência à compressão. O resultado do ensaio de pozolanicidade é dado pela razão entre as médias da resistência à compressão da argamassa com pozolana e a argamassa de controle, expresso em porcentagem. GAVA (1999) comenta que a substituição em massa parece ser um retrocesso apresentado nesta versão da norma, pois em função da menor massa específica das pozolanas, esta substituição tende a ocasionar maior volume de aglomerante total, aumentando a demanda de água e, conseqüentemente, afetando de forma prejudicial os resultados.

Neste estudo, para avaliação da pozolanicidade das cinzas de casca do arroz, foram realizados apenas o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, segundo a NBR 5752/92 e o ensaio de LUXAN (1989), um teste que mede principalmente o potencial de reação química da pozolana com hidróxido de cálcio, que se encontra descrito no Capítulo 4.

### 3. CINZA DA CASCA DE ARROZ

#### 3.1 Casca de Arroz

Segundo HOUSTON (1972), aproximadamente um quinto do peso da colheita de arroz é de cascas, podendo variar pela diferença entre os cultivos, a estação do ano, temperatura e localização geográfica. A disposição deste subproduto enfrenta dificuldades, em função da sua forte consistência lenhosa, natureza abrasiva das cascas, baixas propriedades nutritivas, resistência ao intemperismo e grande volume. Segundo o autor, desde 1871 são encontradas publicações abordando a composição, propriedades e usos planejados da casca de arroz. A queima consiste num dos métodos mais antigos para realizar o descarte das cascas. Elas podem ser usadas como combustível em processos de secagem, moagem e parboilização (cozimento leve) nas fábricas de arroz, com a vantagem de que as cascas são consumidas onde são produzidas, e somente a cinza necessita local para disposição.

MEHTA (1983) relatou que, para cada 1000 kg de arroz, são produzidas 200 kg de cascas, que após a combustão produzem cerca de 40 kg de cinza.

ISAIA (1997) comenta que o Brasil colhe em torno de 11 milhões de toneladas de arroz por ano, produzindo cerca de 2 milhões de toneladas de casca que, na maioria das vezes, são queimadas a céu aberto, poluindo o meio ambiente.

A produção anual de arroz no Brasil, referente ao ano de 2000, foi de 11.144.123 toneladas (IBGE, 2001). Embora a produção de arroz seja bastante difundida, apenas sete estados produzem o equivalente a 80% da quantidade total. São eles: Rio Grande do Sul, Maranhão, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Santa Catarina. A maior parte do arroz é processada na região produtora por pequenas indústrias. Apenas 17% do arroz é processado em regiões diferentes da produção de origem. Sendo assim, a casca está disponível principalmente nas regiões Sul e Sudeste (CINCOTO, AGOPYAN e JOHN, 1990).

A casca, assim como outros materiais orgânicos, absorve ou perde umidade, tendendo a entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Mas a elevada concentração de sílica opalina na

camada exterior deve reduzir as alterações da umidade e conferir uma dureza na escala de Mohs de 6,5. Os valores da tabela de Mohs são medidos para resistência relativa ao risco, sugerindo um relativo desgaste. Quando a dureza moderada é adicionada à grande proporção de fragmentos angulares que são o resultado do esmagamento das cascas, conferem ao material uma natureza abrasiva (HOUSTON, 1972). A FIGURA 3.1 mostra uma micrografia feita por DAFICO (2001), onde é possível observar a porosidade da casca de arroz. Após a operação de moagem, estes poros tendem a se fechar. Na FIGURA 3.2 também realizada por DAFICO (2001), observa-se a cobertura lenhosa da casca.

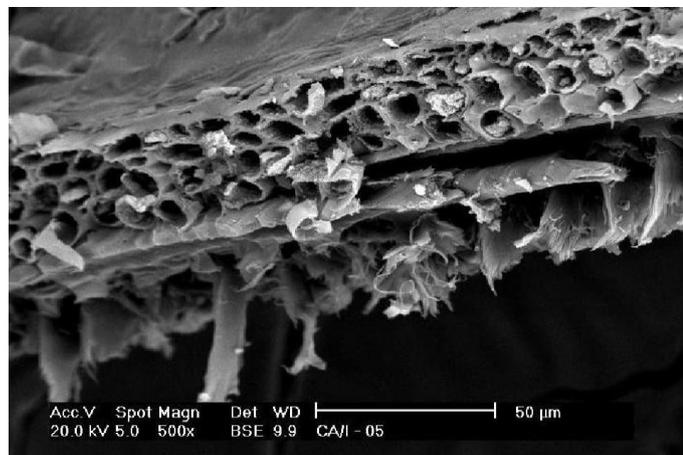


FIGURA 3.1: Micrografia de uma amostra de casca de arroz, evidenciando sua porosidade - Magnificação de 500 (DAFICO, 2001).

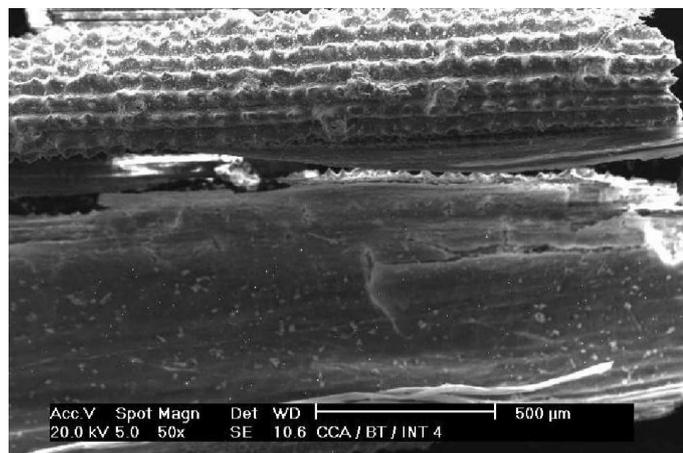


FIGURA 3.2: Micrografia de uma amostra de casca de arroz, evidenciando sua cobertura lenhosa - Magnificação de 50 (DAFICO, 2001).

HOUSTON (1972) identificou na casca uma cobertura lenhosa e áspera ao redor do núcleo, que consiste em dois meios entrelaçados. É dura e altamente silicosa, sendo composta por quatro camadas estruturais: 1) epiderme: uma grossa cutícula exterior; 2) fibras hipodérmicas entrelaçadas também com paredes grossas e um pouco lignificadas; 3) células esponjosas e; 4) epiderme interna das células. As fibras da casca têm em média 0,56 mm no comprimento e o comprimento da casca varia entre 5 e 10 mm. Dentre os componentes orgânicos da casca encontram-se o amido (1,76%), a proteína (7,96%), lignina da casca de arroz crua (40,02%) e que possuem elevadas porcentagens de celulose ou cinza, lignina purificada (24,10%), vitamina B, ácidos orgânicos e elementos inorgânicos.

AL-KHALAF e YOUSIFT (1984) relatam que análises químicas das cascas indicam que os maiores constituintes são as cinzas (13 a 39% em peso), lignina, celulose e umidade. Através de combustão controlada, a celulose e a lignina são removidas, permanecendo a sílica em forma vítrea e microporosa de alta superfície específica (MEHTA, 1992).

### **3.2 Cinza da Casca de Arroz**

As cinzas da casca de arroz são um subproduto do arroz em casca tratado industrialmente. Segundo DAFICO (2001), a cinza da casca de arroz, que é considerada uma superpozolana, é o maior resíduo agrícola produzido no mundo e, mesmo assim, seu uso ainda é incipiente.

Vários são os fatores que influenciam o uso da cinza da casca de arroz em grande escala. Para DASS (1983), uma das principais razões, que impedem o uso deste material, é a variação da qualidade pozolânica da cinza, obtida de fontes diferentes, e com diferentes temperaturas de queima. Para ISAIA (1997), o principal fator que compromete o uso da cinza da casca de arroz em concreto é a falta do seu beneficiamento, para obtenção de pó com finura adequada para ser misturado ao cimento ou concreto. E segundo DAFICO (2001), um dos principais motivos é que o material queimado nas fornalhas de leito fluidizado, que é o melhor método atualmente utilizado para queima de biomassa, produz cinzas com elevados teores de carbono residual e, conseqüentemente, seu uso em concreto acarreta uma coloração escura, implicando a sua rejeição comercial.

O componente predominante da cinza é a sílica, com aproximadamente 94 a 96%; valores próximos ou abaixo de 90% costumam indicar uma mistura de farelo ou outro material com baixa quantidade de sílica na amostra. Em geral, a cinza pode ser considerada sílica ligeiramente impura. Os elementos úteis, como nutrientes da planta, aparecem em pequenas quantidades (HOUSTON, 1972).

Segundo MEHTA (1992), a coloração da cinza é atribuída ao seu conteúdo de carbono, à presença de impurezas e até mesmo às condições de queima, podendo ser negra, cinza, púrpura ou branca. Amostras de cinzas coletadas em várias regiões do mundo apresentam um conteúdo de sílica entre 90 e 95% e as principais impurezas são os álcalis  $K_2O$  e  $Na_2O$ . O conteúdo de  $K_2O$  pode variar entre 1 e 5% e depende da quantidade de fertilizantes usados na plantação. Pequenas quantidades de outras impurezas como  $CaO$ ,  $MgO$  e  $P_2O_5$  também são encontradas.

As cinzas recuperadas do interior de grandes massas de cascas queimadas, onde o acesso de ar é restrito, apresentam uma coloração delicada em rosa-lilás. Quando o carbono livre é queimado com um adequado suprimento de ar, a cinza é menos colorida. Quantidades maiores de carbono residual fornecem produtos que variam sua coloração entre o cinza e o preto (HOUSTON, 1972).

Para MALHOTRA (1993), as cinzas produzidas por combustão sem controle são normalmente cristalinas e de baixo valor pozolânico. A combustão controlada em cerca de 500 a 700°C produz uma cinza altamente pozolânica. A superfície específica da cinza incinerada é de 60 a 100  $m^2/g$ , quando determinada por adsorção de nitrogênio, e as análises químicas das cinzas produzidas pela incineração das cascas de arroz mostram um conteúdo de carbono não queimado de 3 a 18%.

Segundo AL-KHALAF e YOUSIFT (1984), quando a cinza da casca de arroz apresenta elevada reatividade, pode ser usada mesmo sem tratamento adequado para fazer cimento hidráulico, como um bom aditivo redutor da expansibilidade decorrente da reação álcalis-silicato e como redutor da temperatura em concreto massa.

A FIGURA 3.3 apresenta a micrografia de uma cinza da casca de arroz feita por DAFICO (2001), onde é possível observar a sua elevada porosidade antes do processo de moagem.

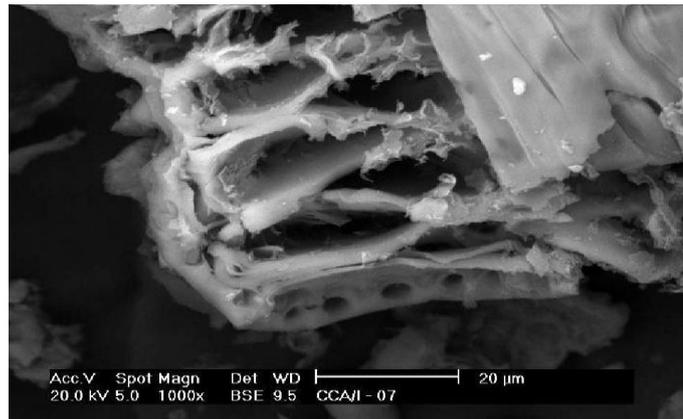


FIGURA 3.3: Micrografia de uma amostra de cinza de casca de arroz, evidenciando sua porosidade - Magnificação de 1000 (DAFICO, 2001).

### 3.3 Influência do Tratamento Térmico e do Grau de Moagem

A pozzolanicidade da cinza depende do processo térmico que é dado à casca na sua obtenção, segundo SILVEIRA, FERREIRA e DAL MOLIN (1997). Mas é importante ressaltar que o tamanho da partícula também apresenta grande influência sobre a atividade pozzolânica da cinza, pois as mais importantes características físicas estão relacionadas ao seu grau de moagem.

Vale mencionar as especificações do Comitê 73-SBC da RILEM, que criou duas categorias para a cinza da casca de arroz: a primeira com controle de temperatura e a segunda queimada a céu aberto ou sem controle, enquadrando a primeira como altamente pozzolânica e a segunda em “outros”, por considerar pequena a quantidade de material não cristalino. Apesar disso, pesquisas recentes mostraram bons resultados em concretos elaborados com cinza de casca de arroz obtida sem controle de temperatura, como ISAIA (1997), SANTOS (1997) e GAVA (1999).

Em pesquisa recente, PRUDÊNCIO e SANTOS (1997) relataram que o controle da temperatura de queima, que governa o teor de sílica amorfa e, conseqüentemente, sua atividade pozzolânica, ainda representa um dos fatores limitantes do uso da cinza de casca de arroz, e cada pesquisa indica um tempo e uma temperatura de queima de acordo com as condições impostas no momento de seu desenvolvimento. Os autores ressaltam ainda que materiais que contêm sílica amorfa não representam risco à saúde. Caso a temperatura de queima da casca seja muito alta, a sílica amorfa presente na cinza passa para sua forma cristalina, ou seja, tridimita e cristobalita. A

cinza que contém sílica sob a forma cristalina é menos reativa e é considerada prejudicial à saúde humana.

MEHTA (1992) preconiza que, através do controle das condições de tempo e temperatura de queima da casca de arroz, é possível que a sílica permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, propiciando a produção de uma cinza de altíssima reatividade. Porém, geralmente possui alto teor de carbono, resultando em uma cinza de cor preta e, portanto, de baixo valor comercial.

SILVEIRA e RUARO (1995) relataram que as condições de queima da casca de arroz (temperatura e tempo de exposição) influenciam na formação de proporções relativas de sílica na forma amorfa (vítrea) e polimórfica, que compreende estruturas cristalinas diferentes, como o quartzo, a cristobalita e a tridimita. Entre as temperaturas de 400°C e 500°C, a sílica presente na cinza é ativa numa fase amorfa. Acima de 600°C, pode-se, em alguns casos, detectar a presença de quartzo. Aumentando-se a temperatura de queima, a conversão para outras formas cristalinas de sílica também progride, formando inicialmente a cristobalita e, posteriormente, a tridimita. Acima dos 800°C, a sílica produzida é essencialmente cristalina e, portanto, não reativa.

Entretanto, HOUSTON (1972) recomenda que, como a cinza não é sinterizada, sua combustão deve ser realizada com temperaturas inferiores à fusão da cristobalita, que é de 1713°C. Este valor encontra-se abaixo da temperatura de combustão de equilíbrio, calculada em aproximadamente 1870°C para cascas, considerando que não há perdas de calor. O autor ressalta que, quando a cristobalita é aquecida entre 900°C e 1400°C, tende a se converter em tridimita. Sendo assim, as proporções relativas das formas de sílica dependem da intensidade e duração da combustão. Haverá formação de sílica caso a temperatura seja elevada e, se a temperatura de queima for baixa, haverá a formação de quartzo. Comenta ainda que a cinza constituída de tridimita e cristobalita apresenta uma coloração rosa.

DASS (1983), em seu trabalho, concluiu que a reatividade da cinza da casca de arroz à cal é afetada desfavoravelmente com o aumento da temperatura de queima e do tempo de exposição. Acima dos 700°C, os efeitos da temperatura e do tempo de exposição são mais pronunciados na descarbonização da cinza e aos 1100°C, as propriedades pozolânicas da cinza são quase que

completamente perdidas. Outro fator importante durante a combustão é a disponibilidade de ar e a substituição do dióxido de carbono causando um profundo efeito na velocidade de separação dos minerais da casca de arroz da celulose e da matriz de lignina. Estas condições controlam a velocidade de descarbonização da cinza e, conseqüente início das mudanças na estrutura física da sílica.

AL-KHALAF e YOUSIFT (1984) pesquisaram a reatividade pozolânica de diversas cinzas, queimando 200 g de casca em várias temperaturas: 450, 500, 550, 600, 700 e 800°C. Para cada temperatura de queima, as amostras foram retiradas do forno com 30 minutos, 1 hora, 1 hora e 30 minutos, 2, 3, 4 e 5 horas. As amostras foram então moídas em uma máquina Los-Angeles Modificada. A moagem foi feita através de dois métodos: o primeiro utilizando-se bolas de aço, e o segundo adicionando-se 2 metros de corrente de aço com peso de 450g/m. O segundo método apresentou melhores resultados no teste de finura Blaine. Com relação ao tempo de moagem, concluíram que a finura, expressa em superfície específica, aumenta com o aumento do tempo de moagem em todas as temperaturas de queima. Em alguns casos, houve uma considerável redução na superfície específica, com o aumento da temperatura de queima. Esta redução na área específica pode ser devida à diminuição no conteúdo de carbono, com o aumento da temperatura, indicando que as partículas de carbono também são finas e têm elevada superfície específica, em comparação com as partículas de silicato. Através das análises de difração de raios-X, observou-se que as cinzas queimadas entre 450°C e 700°C, por um período de 2, 3 ou 4 horas permaneceram amorfas, ou seja, não foram encontradas formas cristalinas de sílica. Porém, amostras queimadas à temperatura de 850°C por 2 horas indicaram a presença de quartzo, que é uma forma de sílica em fase cristalina. Como a forma cristalina de sílica é menos reativa que a amorfa, os autores recomendam que a combustão da casca de arroz seja feita com temperaturas inferiores a 850°C.

SILVEIRA e RUARO (1995) avaliaram o tratamento térmico aplicado à casca de arroz e sua influência na produção de cinza e na incorporação de 10% da mesma em relação à massa do cimento, em ensaios de resistência à compressão de concretos moldados com cimento CP V – ARI, utilizando dois tipos de cinza e relação água/aglomerante de 0,50. A cinza 1 foi obtida por queima de casca em caldeira à temperatura de 800°C e a cinza 2, obtida através de leito fluidizado à temperatura de 560°C. As duas cinzas foram moídas a seco, em moinho de porcelana com esferas de alumina durante 1 hora e 30 minutos. Para detectar a pozolanicidade do

material, foi feito ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, segundo a NBR 5752/92. Os ensaios de resistência à compressão nos corpos-de-prova cilíndricos de concreto foram realizados com 3, 7 e 28 dias. Aos 28 dias a resistência à compressão da cinza 2 (560°C) apresentou melhor desempenho quando comparada à cinza 1 (800°C), com acréscimo de resistência na ordem de 15,6%. A característica amorfa da cinza 2 (560°C) refletiu em aumento de resistência à compressão nas três idades, com valores aproximados de 26% aos 3 dias, 29% aos 7 dias e 27% aos 28 dias, em comparação aos corpos-de-prova sem adição. Os resultados deste estudo podem ser observados na FIGURA 3.4.

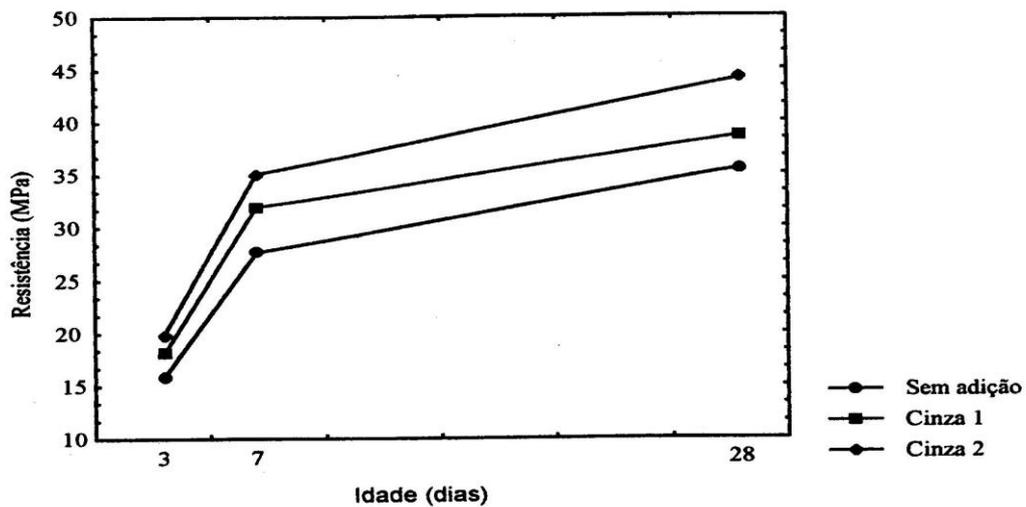


FIGURA 3.4: Gráfico das médias das resistências à compressão para os diferentes tipos de adição em função da idade (SILVEIRA e RUARO, 1995).

FARIAS e RECENA (1990) desenvolveram cimento hidráulico através da mistura de cinza da casca de arroz, cal e cimento Portland comum. A casca de arroz foi obtida por queima industrial em forno de alvenaria. Para verificar a influência da moagem na resistência à compressão, a cinza foi moída em moinho de anel por 9, 15, 22 e 30 minutos. Foram moldadas argamassas com corpos-de-prova de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, na proporção 1:3 (mistura : areia normal). Foi realizada cura úmida e as idades de ruptura foram 3, 7 e 28 dias. Concluíram que é possível utilizar cinzas de casca de arroz queimadas em forno de alvenaria na fabricação de cimento, desde que o conteúdo de carbono seja baixo. Observaram também que o aumento da finura da cinza melhorava a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia nas argamassas.

PITT (1976) propôs um aparato para incineração de materiais de resíduos orgânicos, que apresentam um potencial combustível, mas que dificilmente são convertidos em energia aproveitável. Estes materiais, cuja casca de arroz é o exemplo típico, possuem elevados teores de sílica biogênica, que é a ocorrência de sílica nas células da sua estrutura. O esquema do processo desenvolvido por PITT é mostrado na FIGURA 3.5.

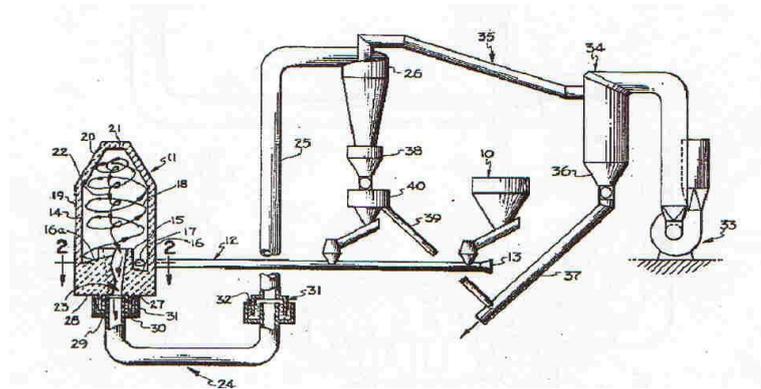


FIGURA 3.5: Esquema do processo para preparação de cinzas silicosas (PITT, 1976).

SUGITA (1994) desenvolveu um método para produção de cinza de casca de arroz ativa, onde uma pilha de casca é colocada sobre uma plataforma oca, cuja laje possui vários buracos pequenos, permitindo a entrada da cinza após sua queima. A casca fica posicionada ao redor da chaminé, que se localiza no meio do equipamento. O ar entra pela pilha de cascas, participa da combustão e sai pela chaminé. O esquema é apresentado na FIGURA 3.6

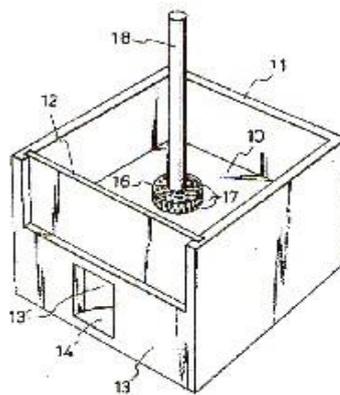


FIGURA 3.6: Método para produção de cinza de casca de arroz ativa (SUGITA, 1994).

Em sua pesquisa, SANTOS (1997) cita diferentes processos de produção da cinza de casca de arroz, em beneficiadoras situadas no Sul do estado de Santa Catarina. Entre eles encontram-se os processos artesanal, semi-industrial e industrializado, conforme segue:

- a) Processo artesanal: a cinza é gerada pelo sistema de grelhas. A casca é queimada sem controle da temperatura, em grelhas dispostas paralelamente, sendo a cinza coletada no final da grelha e normalmente transportada por água (cinza via úmida), até um depósito intermediário. Segundo determinação da FATMA – Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente de Santa Catarina, depois de acumulado um certo volume, a cinza é transferida para um depósito definitivo.
- b) Processo semi-industrial: o ar é injetado através de dutos metálicos para o interior de um cilindro onde a casca cai e é incinerada. A cinza resultante é recolhida através de canais de água, ou via seca, através de pás, na medida em que vai sendo produzida.
- c) Processo industrializado: não é feito o controle da temperatura de queima, mas o controle da pressão de vapor gerada em função desta queima. Quando as caldeiras do processo de beneficiamento de arroz necessitam de mais pressão, a quantidade de casca liberada para queima é maior e vice-versa. Neste processo, a cinza pode ser recolhida via úmida, através de canais de água corrente, onde ela cai e é transportada, ou pode ser recolhida por ciclones, via seca, e depositada em silos de armazenamento. Teoricamente, a cinza obtida através deste processo possui melhores características pozolânicas, já que as condições de queima da casca são, embora que parcialmente, controladas.

DAFICO (2001) elaborou um processo de queima da casca de arroz para produzir sílica ativa branca, com baixo teor de carbono residual, numa taxa inferior a 3% e reatividade medida através do ensaio de índice de atividade pozolânica (NBR 5752/92), maior que 100%. Através do programa experimental foram encontrados bons resultados de pozolanicidade, moabilidade e teor final de carbono. O material permaneceu essencialmente amorfo, fato este comprovado por difratogramas de raios-X. Foram desenvolvidas várias experiências, entre elas, a segunda queima da cinza da casca de arroz; porém, em escala de laboratório. A FIGURA 3.7 mostra um corte horizontal e vertical da minifornalha de leito fixo.

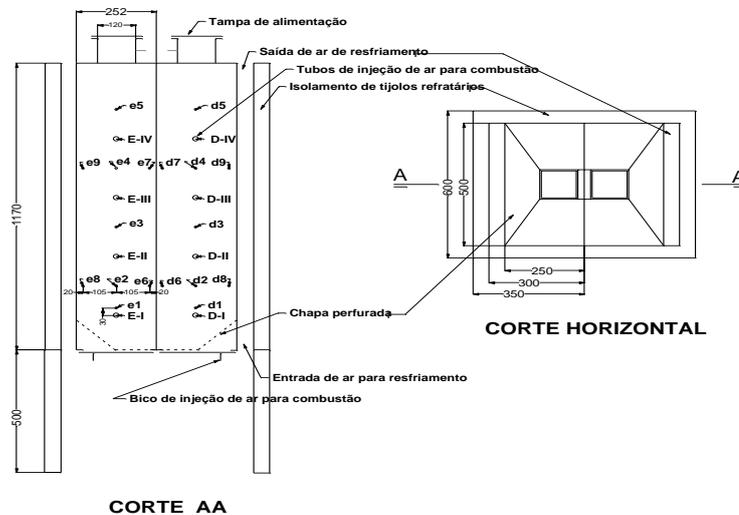


FIGURA 3.7: Cortes horizontal e vertical da minifornalha de leito fixo (DAFICO, 2001).

Segundo DAFICO (2001), um dos principais problemas com relação ao elevado teor de carbono na cinza da casca de arroz é o resfriamento rápido do material após a diminuição do conteúdo energético. O projeto da fornalha é composto por duas câmaras separadas por uma chapa de aço, sendo possível iniciar o processo de combustão em uma câmara quando a outra já estivesse em resfriamento. Dessa forma, quando a taxa de combustão em uma câmara diminuísse, a combustão seria mantida, até a queima completa do carbono remanescente, através do calor fornecido pela outra câmara. O conjunto formado pelas duas câmaras funciona como uma fornalha de queima contínua, apesar das duas câmaras funcionarem separadamente como fornalhas intermitentes.

A minifornalha de leito fixo, desenvolvida por DAFICO (2001), foi isolada externamente com tijolos refratários. Em cada câmara foi instalada uma resistência blindada de 1000 watts para dar início à combustão. O fluxo de ar comprimido foi controlado com válvulas de acionamento manual ligadas a dois rotômetros. A entrada do ar poderia ser feita por baixo e distribuída através de chapas perfuradas, instaladas no fundo da câmara, ou através de quatro tubos perfurados de alumínio que atravessavam cada câmara. Para registrar as temperaturas de queima foram instalados, em cada câmara, nove termopares, sendo que um destes foi ligado a uma válvula automática de fechamento de fluxo, para que a temperatura de 550°C, estipulada para a queima, não fosse ultrapassada. O tempo de queima de 275 minutos foi considerado grande, mas

necessário para que a temperatura não fosse elevada. A amostra de casca necessária para realizar este ensaio de combustão foi de 700g e seu volume aparente reduzido a 20% do original após a queima. A cinza resultante apresentou cor branca, com exceção do material localizado próximo à periferia da minifornalha. Na FIGURA 3.8 tem-se uma foto da minifornalha de leito fixo.



FIGURA 3.8: Fornalha protótipo desenvolvida por DAFICO (2001).

O trabalho realizado por DAFICO (2001) serviu como base para realização desta pesquisa e, guardadas as devidas proporções, pode ser considerado como uma continuidade natural do estudo do processo de queima da cinza da casca de arroz. Uma das maiores diferenças entre estas duas pesquisas reside no fato desta ter sido elaborada para extrapolar o ambiente laboratorial, partindo para uma escala industrial. A maior prova desta filosofia foi a construção do forno para realizar a combustão da cinza, que possui capacidade para  $1\text{m}^3$  de material e foi construído dentro de uma empresa de pré-moldados em concreto, na região da Grande Florianópolis-SC. Outro diferencial refere-se ao estudo da pozolanicidade das cinzas pura e modificada, com diversos tempos de moagem. Todas estas inovações podem ser observadas na seqüência deste trabalho.

## **4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 Desenvolvimento**

O programa experimental deste trabalho foi elaborado de forma a atender aos objetivos propostos no capítulo 1:

- a) Efetuar a construção de um forno em alvenaria para realização da segunda queima na cinza da casca de arroz, de forma a obter um material com elevado valor pozolânico e baixo teor de carbono.
- b) Realizar experimentos com diferentes dosagens de casca e cinza “in natura” a fim de obter uma queima mais homogênea do produto final.
- c) Efetuar moagem da cinza da casca de arroz “in natura” e modificada em diversas granulometrias.
- d) Comparar o desempenho entre a argamassa padrão (sem substituição) e as argamassas confeccionadas com variados teores de substituição de cimento, em volume absoluto, utilizando cinza de casca de arroz “in natura” e modificada, em diferentes graus de moagem.
- e) Realizar ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento determinando a pozolanicidade das cinzas.
- f) Realizar ensaio de Luxan, classificando as cinzas quanto a sua diferença de condutividade.

### **4.2 Escolha da Casca e da Cinza da Casca de Arroz**

Tanto a casca como a cinza da casca de arroz, utilizadas neste trabalho, foram doadas pela empresa beneficiadora de arroz Cerealista Fumacense Indústria e Comércio Ltda., que fica localizada no município de Morro da Fumaça, em Santa Catarina. Sua escolha deu-se

principalmente pelos resultados apresentados por SANTOS (1997), que em seu estudo sobre os sistemas de produção de cinza de casca de arroz em Santa Catarina, classificou esta cinza como proveniente da indústria F, ou seja, com sistema de produção industrializado, via seca. Neste sistema a queima da casca de arroz é feita por processo automatizado de geração de calor, que é utilizado na parboilização dos grãos. A cinza resultante deste processo é residual, não havendo controle da temperatura de queima, bem como do tempo de exposição, existindo apenas o controle da pressão de vapor gerado em função desta queima. A injeção de casca a ser queimada depende da necessidade de maior ou menor pressão das caldeiras de beneficiamento do arroz. A coleta da cinza é realizada a seco, através de ciclones, e armazenada em silos, conforme a FIGURA 4.1. A FIGURA 4.2 mostra o forno no momento da queima da casca de arroz para produção de energia e conseqüente obtenção da cinza residual. A amostragem foi realizada uma única vez, sendo coletada toda a quantidade de casca e da cinza utilizadas neste trabalho. Esta cinza seca foi acondicionada em quatro caixas de pvc com tampa e capacidade de 1000 litros cada. A casca também seca foi acondicionada em uma caixa com as mesmas especificações. Os materiais permaneceram armazenados nas caixas até a sua queima.

### **4.3 Construção do Forno**

A construção do forno utilizado nos experimentos deu-se nas dependências da empresa Toniolo Pré-Moldados, localizada no município de Palhoça, em Santa Catarina. O forno, mostrado nas FIGURAS 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 (a) e (b) possui três elementos distintos: depósito de cinzas, câmara de combustão e chaminé. O depósito da cinza modificada foi executado, utilizando-se blocos de alvenaria estrutural em concreto, da empresa Toniolo. Possui internamente uma gaveta em aço para armazenar a cinza e sua vedação foi feita com borracha. Na sua parte superior, próxima da câmara de combustão, foram instaladas cinco resistências blindadas de 1000 watts cada uma, como mostra a FIGURA 4.7. A câmara de combustão foi feita em alvenaria de tijolos refratários, possuindo capacidade para um metro cúbico de material. Na sua parte inferior, foi colocada uma grelha deslizante, mostrada na FIGURA 4.8, com estrutura em perfil de aço extrudado T, preenchida com refratários para infravermelho da marca Jackwal e tijolos refratários. Ao longo da câmara de combustão, foram instalados 16 tubos de aço inox com diâmetro de ½". Em cada tubo, foram feitos quatro furos de 2mm a cada 20mm para permitir a entrada de ar comprimido,

conforme se observa na FIGURA 4.9. A chaminé foi executada em alvenaria estrutural de blocos de concreto. Uma vista geral do forno pode ser observada na FIGURA 4.10.

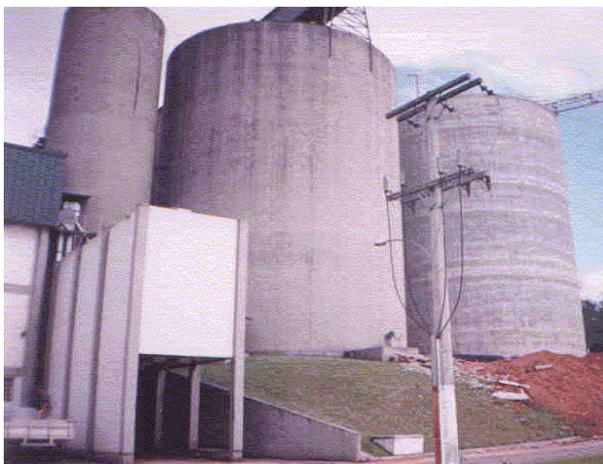
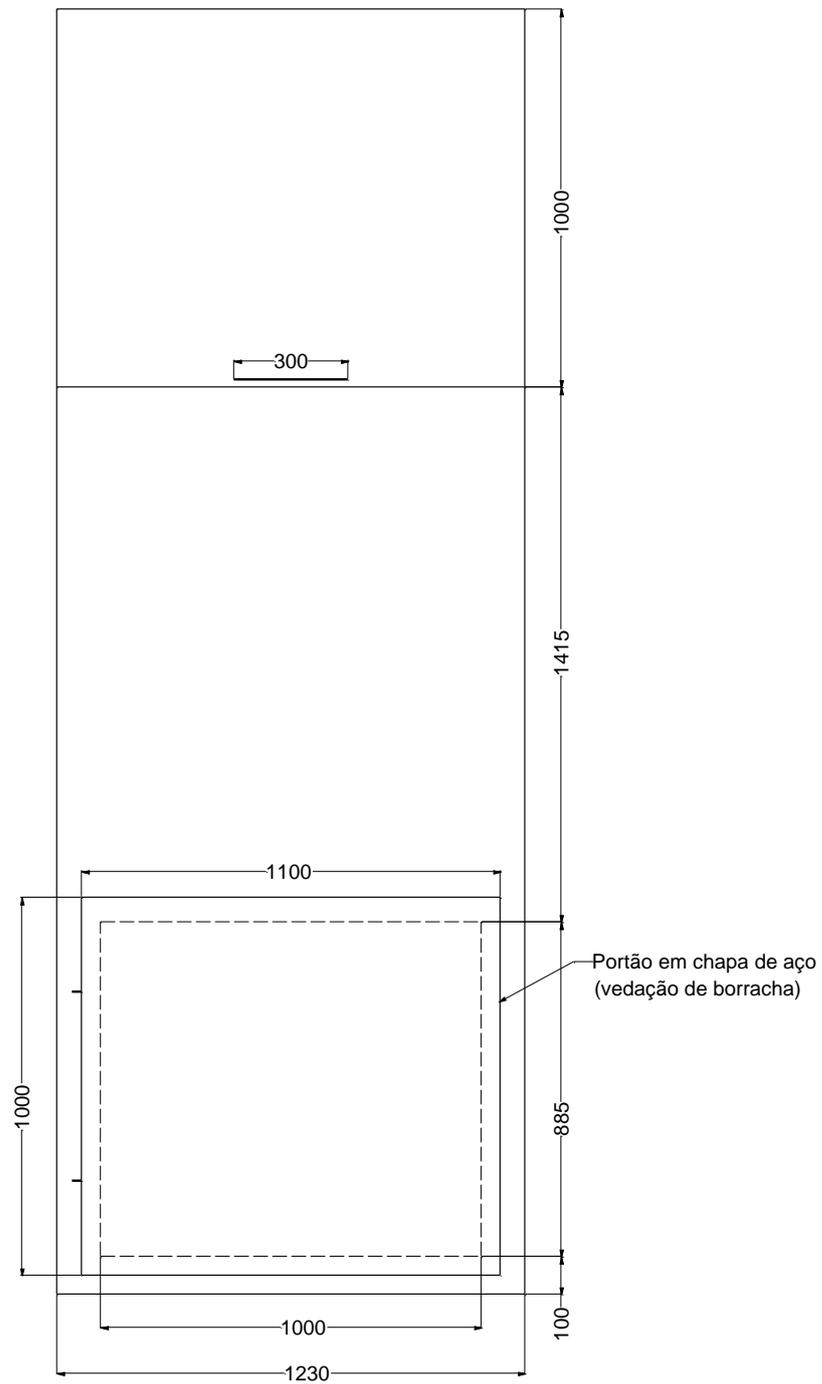


FIGURA 4.1: Silos de armazenamento da cinza de casca de arroz na indústria beneficiadora.



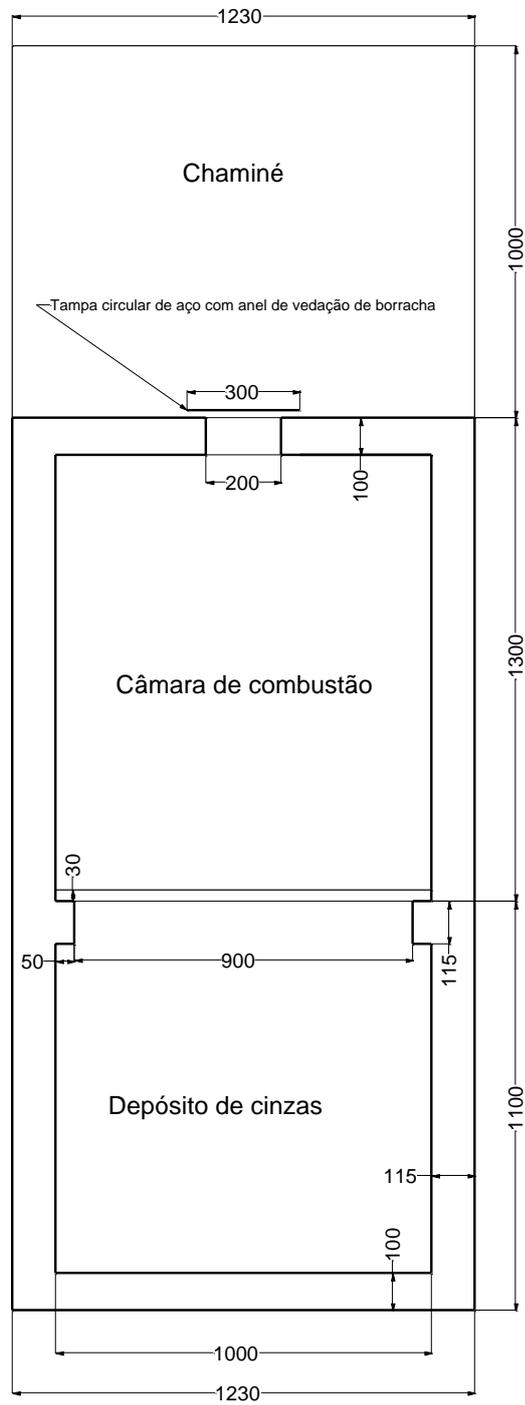
FIGURA 4.2: Detalhe da combustão da casca de arroz na indústria beneficiadora.



VISTA FRONTAL

esc.: 1:20

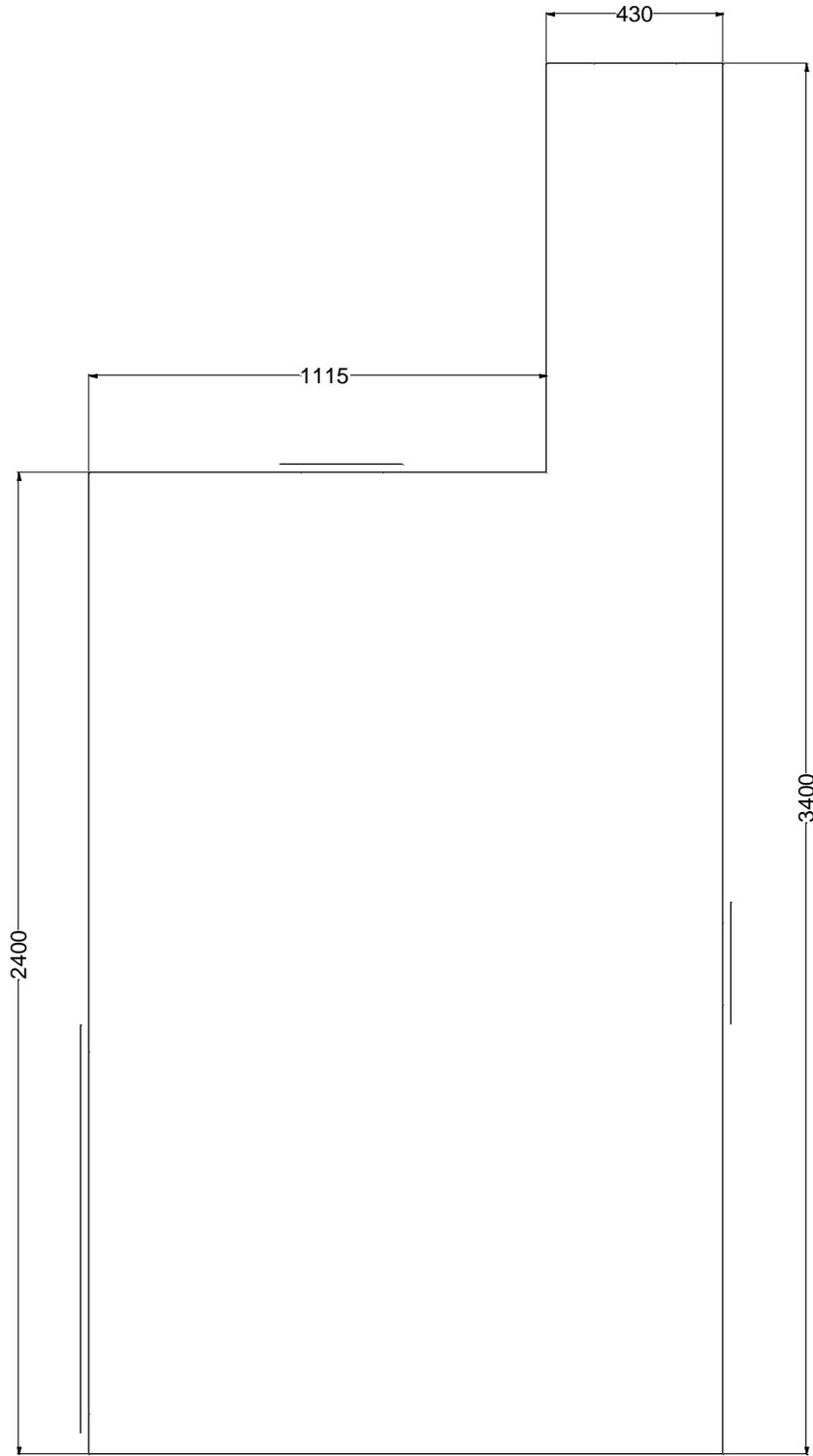
FIGURA 4.3: Vista frontal do forno.



### CORTE FRONTAL

esc.: 1:20

FIGURA 4.4: Corte frontal do forno.

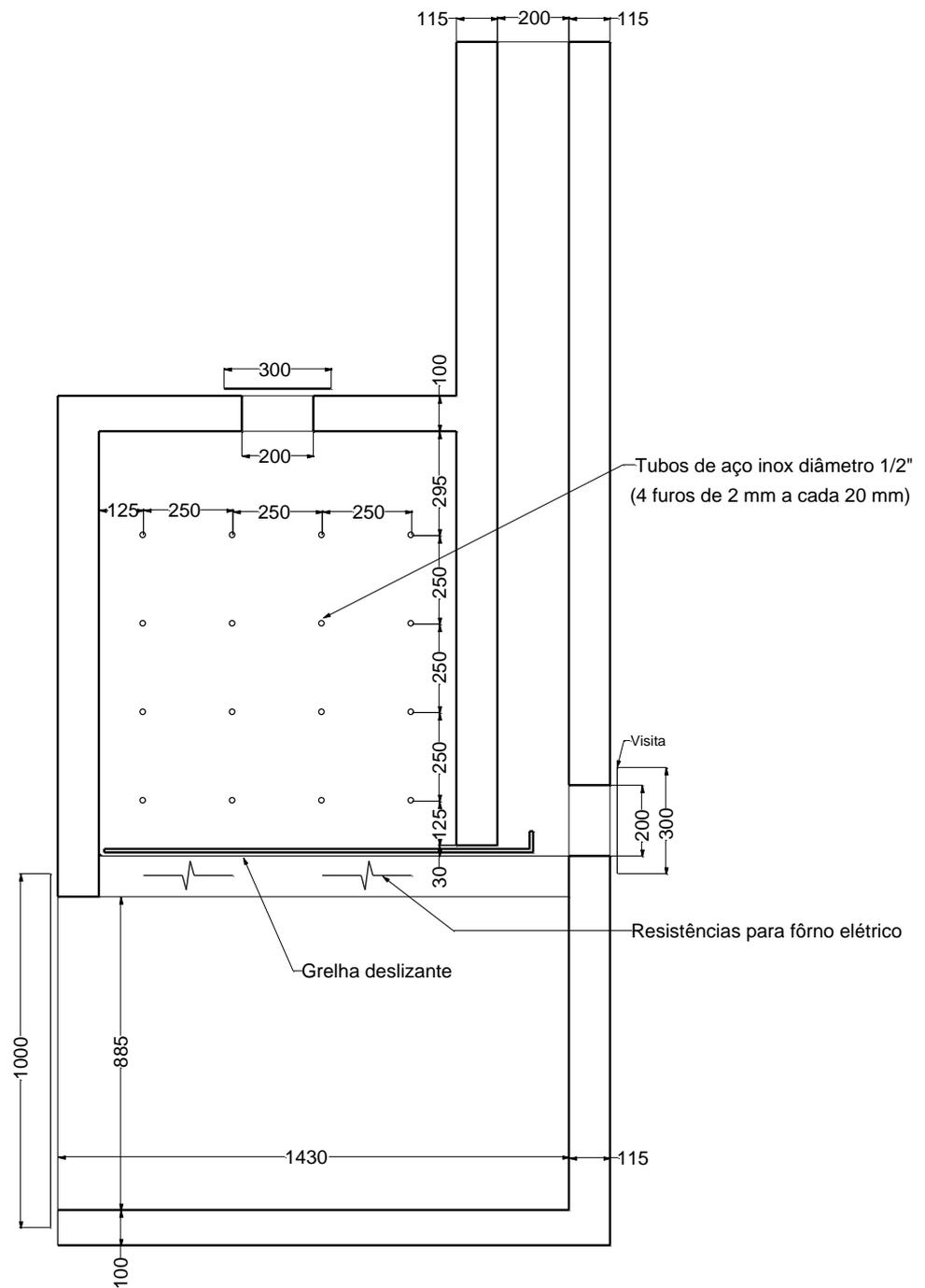


VISTA LATERAL

esc.: 1:20

FIGURA 4.5: Vista lateral do forno.





## CORTE LATERAL

### Detalhes das Instalações

esc.: 1:20

FIGURA 4.6(b): Corte lateral do forno com detalhamento das instalações.



FIGURA 4.7: Depósito da cinza após sua segunda queima, destacando a localização das resistências blindadas.



FIGURA 4.8: Detalhe da grelha deslizante.



FIGURA 4.9: Vista interna do forno, com destaque para a tubulação de ar comprimido.



FIGURA 4.10: Vista geral do forno.

Junto ao forno foi construída uma sala de instrumentação, onde foi instalada uma bancada para distribuição do ar e aquisição dos dados da combustão. O esquema de posicionamento dos termopares no forno é mostrado na FIGURA 4.11. A parede escolhida para colocação dos termopares é oposta à entrada do ar comprimido. Os termopares 1, 5, 6 e 8 foram posicionados próximos das tubulações de ar comprimido.

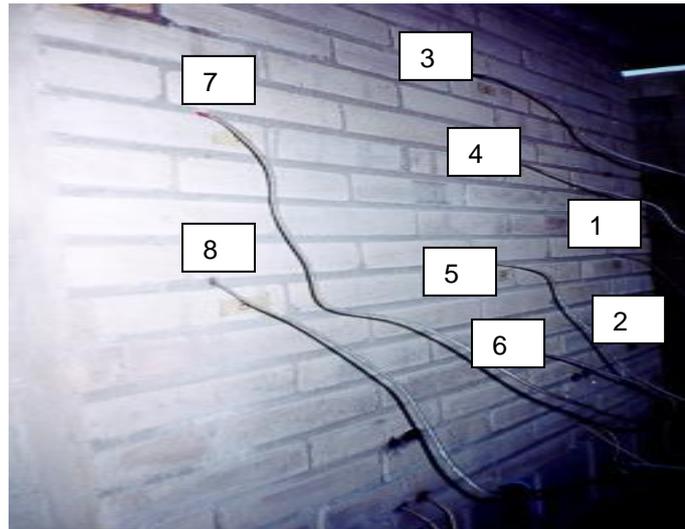


FIGURA 4.11: Esquema de posicionamento dos termopares na parede do forno.

#### 4.4 Experimentos de Combustão

Para realizar a segunda queima da cinza de casca de arroz residual, foi necessário fazer uma mistura de casca de arroz com a cinza residual produzida na indústria, para que houvesse a combustão. Inicialmente, experimentou-se misturar 80% de cinza e 20% de casca, em volume, mas o material não entrou em combustão, mesmo após 330 minutos de queima. Após a retirada da gaveta do depósito, observou-se que a cinza ainda apresentava coloração escura. Os dados desta primeira tentativa podem ser observados na FIGURA 4.12. Mesmo submetido ao processo térmico, o material não apresentou combustão, e portanto, não foi analisado. O monitoramento das temperaturas será explicado mais adiante.

Como os resultados da primeira tentativa de queima não foram satisfatórios, fez-se uma nova tentativa, utilizando-se a mesma proporção, ou seja, 80% de cinza e 20% de casca de arroz, em volume. A ignição foi bastante lenta e o processo de queima ocorreu durante 1500 minutos. O

gráfico apresentado na FIGURA 4.13 mostra que os termopares localizados mais próximos das tubulações de ar comprimido, apresentaram temperaturas mais elevadas, como já era esperado. Todavia, o produto resultante não se apresentava homogêneo queimado, apresentando grumos de material branco, entre a cinza mais escura.

Até esta etapa, as resistências estavam localizadas acima da grelha deslizante. Para realizar a terceira tentativa de queima, as resistências foram colocadas abaixo da grelha e a mistura utilizada foi de 50% de cinza e 50% de casca, em volume. Esta mistura resultou num produto homogêneo e todos os procedimentos realizados para sua obtenção são descritos a seguir:

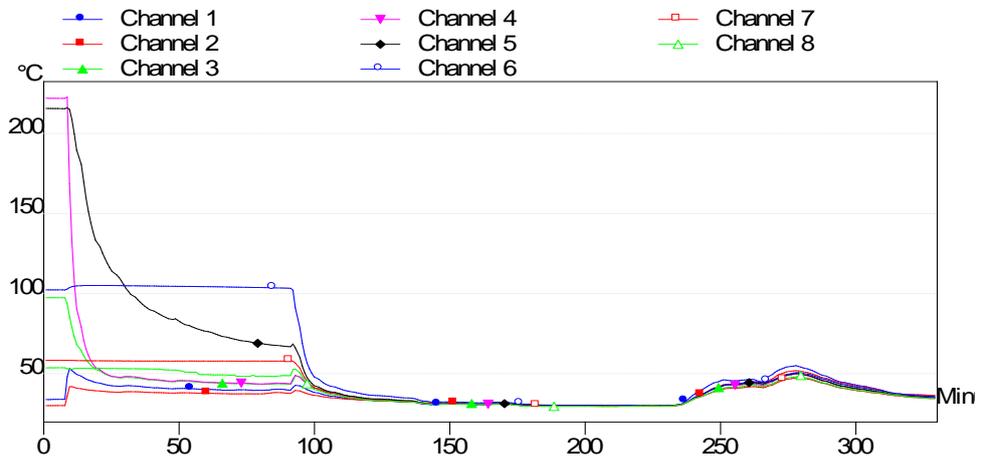


FIGURA 4.12: Resultado da primeira tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca de arroz, em volume.

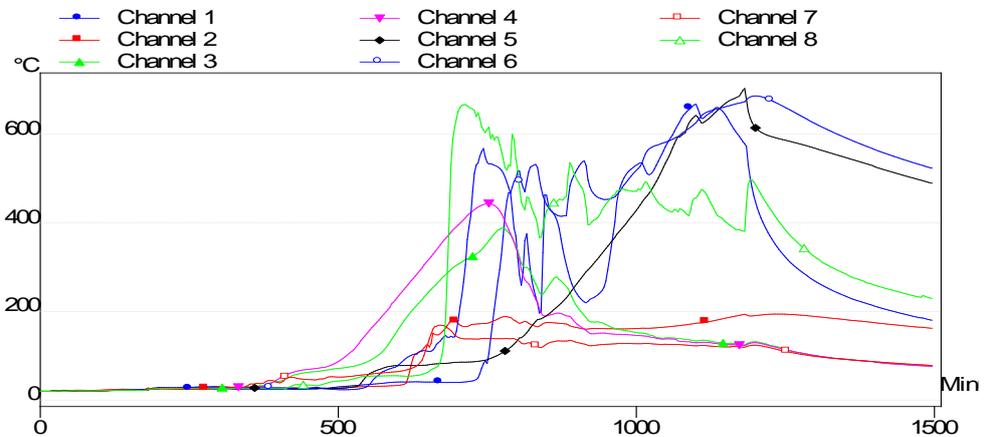


FIGURA 4.13: Resultado da segunda tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca de arroz, em volume.

#### 4.4.1 Procedimentos Para Realização da Combustão

a) O ensaio de massa unitária foi feito segundo a NBR 7251/82, sendo obtidas as quantidades de 100 kg cinza e 80 kg casca. Para realizar as pesagens, foi utilizada balança da marca Marte, com capacidade para 10.000g e precisão de 0,01g.

b) A cinza e a casca em estado seco foram misturadas, utilizando-se uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros, com motor de potência  $\frac{1}{4}$  HP, da marca Menegotti, durante um tempo médio de 5 minutos. A betoneira foi fechada com um saco plástico, durante a mistura, para evitar perdas de material. A FIGURA 4.14 enfatiza a mistura e descarga do material, que apresenta uma certa dificuldade de manuseio conferida às partículas de pó da cinza “in natura”, acarretando inclusive uma pequena perda de material, durante o processo de mistura.

c) Foram colocados inicialmente, no forno, 30 kg de casca para fazer uma camada, com a finalidade de auxiliar na ignição. Logo depois, a mistura de casca com cinza “in natura” foi colocada no forno. Foram misturados 10 litros de álcool, juntamente com a casca, para auxiliar na ignição, e junto à grelha deslizante foi colocado papel jornal também embebido em álcool, com a mesma finalidade. A entrada do material foi realizada pela laje superior do forno.

d) O ar comprimido foi fornecido pelo compressor da fábrica e trazido por mangueira da marca Spiraflex SPT 250 3/4”, até chegar ao aparelho medidor de vazão, tipo rotâmetro, da marca Conaut, modelo 440, localizado na bancada, conforme mostrado pela FIGURA 4.15 e usado para regular a entrada de ar no forno. Ao abrir o registro do rotâmetro, o ar era conduzido através de mangueira da marca Spiraflex SPT 250 3/8”, às quatro tubulações principais (FIGURA 4.16), seguindo pelas ramificações secundárias através dos tubos de aço inox perfurados, permitindo a chegada do ar em toda a extensão do forno, tornando a queima mais homogênea.

e) Foram usados oito termopares blindados do tipo K (Chromel alumel) para captação da temperatura interna do forno. Os termopares do tipo K podem registrar temperaturas de  $-270^{\circ}\text{C}$  até  $1370^{\circ}\text{C}$  (RAMOS, ZARO e DIAS, 1986). A escolha deste tipo de termopar deu-se também pela sua boa resistência mecânica, térmica e à oxidação. Os termopares tipo K são especialmente desenvolvidos para altas temperaturas, mas sua aplicação mais importante reside na faixa de temperatura entre  $700^{\circ}\text{C}$  e  $1260^{\circ}\text{C}$ . Na indústria são geralmente usados fios n° 8 ou n° 14. O

termopar tipo K pode alcançar regimes de até 1400°C com fio n° 6 (BORCHARDT e GOMES, 1979).

f) Os termopares foram instalados na parede oposta à entrada do ar comprimido e ligados a uma placa de aquisição de dados do programa Pico Log for Windows 16 bits, que foi instalada ao microcomputador da marca Toshiba, Pentium 233 MHz, conforme mostra a FIGURA 4.17. Todo o comportamento da queima foi registrado através do software Pico Log for Windows 16 bits, que foi programado para monitorar os dados a cada minuto de queima. Um dos termopares foi instalado diretamente no termostato, da marca Salvi Casagrande, que se encontrava regulado para a temperatura máxima de 700°C. Este aparelho, por sua vez, estava ligado a uma válvula solenóide. Dessa forma, sempre que o ar comprimido estivesse ligado e a temperatura de queima excedesse à temperatura prevista de 700°C, a célula solenóide interrompia o fluxo de ar, deixando-o no modo de segurança previamente estabelecido em 15 m<sup>3</sup>/h de ar.

g) O software Pico Log for Windows 16 bits foi programado para registrar as temperaturas indicadas pelos termopares localizados no interior do forno a cada minuto da combustão. No ANEXO 1, são mostradas as planilhas de processamento dos dados da combustão, sempre que havia interferência na vazão do ar comprimido ou quando as resistências eram ligadas ou desligadas. No gráfico mostrado na FIGURA 4.18, percebe-se o crescimento paulatino das temperaturas no interior do forno, até atingir o tempo previamente programado de 4320 minutos. Novamente percebe-se que os termopares localizados mais próximos das tubulações de ar comprimido apresentaram temperaturas mais elevadas.

h) Ao término da operação de queima e resfriamento, o material foi retirado do forno, ainda com temperatura de aproximadamente 60°C. A cinza resultante desta segunda queima apresentava-se homogeneamente queimada e com coloração cinza claro. Tomou-se o cuidado de passar o material na peneira com abertura de malha quadrada 2,4 mm da série normal, retirando as impurezas maiores geradas durante a queima, como restos de papel jornal. Observou-se também que não há necessidade de colocar papel jornal ou o material embebido em álcool, pois dada a ignição, a casca auto-sustenta a combustão, sem necessitar de outros recursos. Logo após a queima, a cinza modificada foi armazenada numa das caixas até a próxima etapa do trabalho.



FIGURA 4.14: Mistura de 50% de cinza “in natura” com 50% de casca de arroz, em volume.

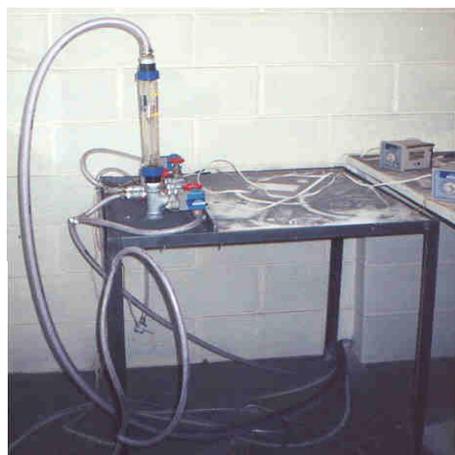


FIGURA 4.15: Controle da vazão do ar comprimido através dos equipamentos da bancada.



FIGURA 4.16: Chegada do ar comprimido às tubulações principais.

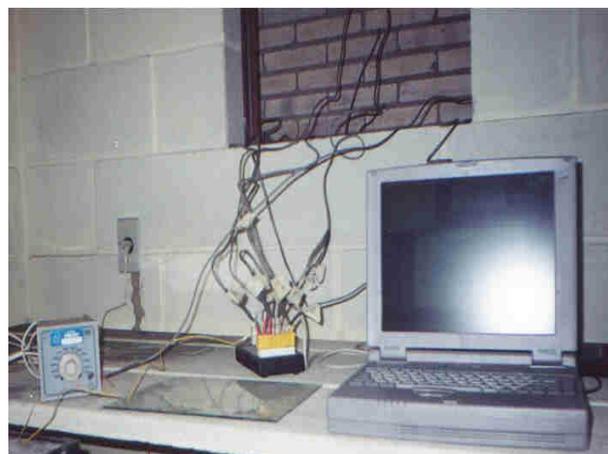


FIGURA 4.17: Processamento dos dados da combustão.

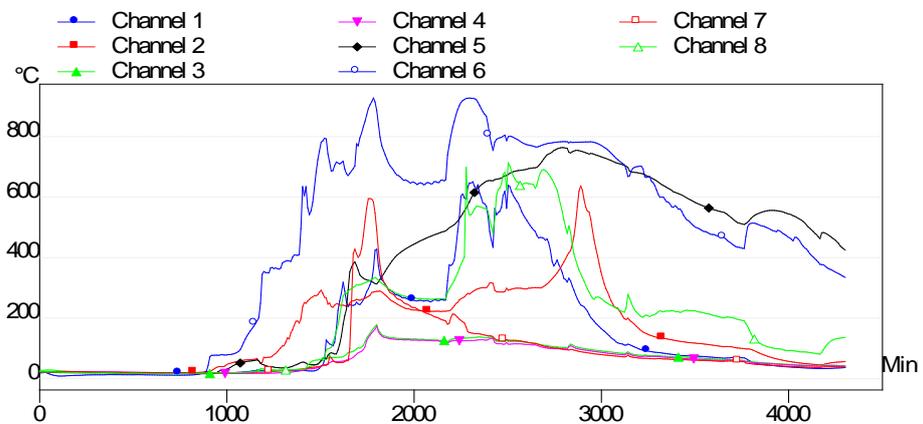


FIGURA 4.18: Tentativa de queima, utilizando 50% de cinza e 50% de casca, em volume.

#### 4.5 Moagem das Cinzas “In Natura” e Modificada

Foram estabelecidos tempos de moagem 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas para cada uma das cinzas, com base no trabalho desenvolvido por SANTOS (1997). A operação de moagem foi realizada no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) – Centro de Educação e Tecnologia de Tijucas, na cidade de Tijucas, em Santa Catarina. O moinho utilizado possui capacidade para um volume de 175 litros, e é revestido internamente com alumina. Possui carga graduada também em alumina e velocidade de giro de 44 rpm. Neste tipo de moinho, as esferas de alumina, além de sofrerem menor desgaste, não contaminam o material, segundo SILVEIRA e RUARO (1995). O equipamento é mostrado na FIGURA 4.19.



FIGURA 4.19: Moinho giratório usado na moagem das cinza “in natura” e modificada.

O procedimento de moagem iniciava com a colocação no moinho de 8kg de material, que era moído por 5 minutos, com a finalidade de reduzir o volume do material. Após este período, colocava-se mais 8kg de material, e prosseguia-se com a moagem nos tempos determinados. Os 16kg de material ficavam em processo de moagem até completar o tempo de 18h. Procedia-se, então, com a descarga de todo o conteúdo do moinho e pesava-se 7kg. O restante do material, juntamente com as esferas de alumina, retornava para o moinho onde se completava o período de mais 6h, totalizando 24h de moagem. Nesta segunda descarga, eram retirados aproximadamente 7kg de material observando-se que cerca de 2kg eram perdidos durante o processo. Procedeu-se da mesma forma para retirar cinza moída com 6 e 12 horas, e finalmente, com 2 e 4 horas. Esta seqüência de atividades foi executada na realização da moagem das duas cinzas. Após cada descarga do moinho, o material era pesado e colocado em sacos plásticos de 1kg, onde permanecia até a próxima etapa do trabalho, observando-se as recomendações da NBR 8952/92.

Após a moagem, a diferença de cores entre as cinzas tornou-se bastante nítida. Na TABELA 4.1, pode-se observar a cor preta da cinza de casca de arroz “in natura” bem como a coloração cinza claro da cinza de casca de arroz modificada. Visualmente percebe-se que o objetivo de produzir uma pozolana com reduzido teor de carbono foi atingido.

TABELA 4.1: Comparação de cores das cinzas “in natura” e modificada, após a moagem.

<b>Comparação de coloração entre as cinzas</b>	
<b>Cinza de casca de arroz</b>	<b>Cor</b>
“In natura”	
Modificada	

## **4.6 Caracterização dos Materiais**

### **4.6.1 Caracterização Física e Química das Cinzas de Casca de Arroz**

As análises físicas e químicas das cinzas “in natura” e modificada foram realizadas nos laboratórios da Cia. de Cimento Portland Rio Branco - Votoran, localizada na cidade de Rio Branco do Sul, no Paraná. Salienta-se que as amostras de cinza modificada enviadas para análise

são pertinentes à terceira tentativa de queima, ou seja, são resultado da mistura de 50% de casca de arroz e 50% de cinza residual em, em volume, conforme já foi mencionado anteriormente. Todas as amostras foram enviadas moídas com os tempos de moagem especificados em 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas. A análise física da cinza de casca de arroz “in natura” é mostrada na TABELA 4.2, onde se observam variações nos resultados, conforme seu tempo de moagem. A análise química mostrada na TABELA 4.3 é uma média dos resultados dos vários tempos de moagem, pois a granulometria diferenciada não influi neste tipo de análise. A tabela completa é mostrada no ANEXO 2.

TABELA 4.2: Análise física da cinza de casca de arroz “in natura”.

<b>Análise Física</b>							
<b>Ensaio</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>12 h</b>	<b>18 h</b>	<b>24 h</b>	<b>Unidade</b>
Peneira # 0,075 mm (# 200)	2,8	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	%
Peneira # 0,045 mm (#325)	12,2	1,4	1,7	0,7	0,2	3,8	%
Massa específica	1,98	2,06	2,06	2,06	2,06	2,02	g/cm <sup>3</sup>
Tamanho médio da partícula	36,05	23,43	23,41	7,40	6,66	6,52	µm
Superfície específica - Blaine	960	1759	1739	2461	2415	2488	m <sup>2</sup> /kg

TABELA 4.3: Análise química da cinza de casca de arroz “in natura”.

<b>Análise Química</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Teor</b>	<b>Unidade</b>
SiO <sub>2</sub>	79,23	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,71	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	%
CaO	0,08	%
MgO	0,07	%
K <sub>2</sub> O	0,48	%
Na <sub>2</sub> O	0,04	%
Resíduo insolúvel	80,18	%
Perda ao fogo	17,90	%

A análise física da cinza de casca de arroz modificada é apresentada na TABELA 4.4, também apresentando variações segundo sua granulometria. Na TABELA 4.5 são mostrados os valores médios referentes aos resultados da análise química da cinza de casca de arroz modificada, sendo que a tabela completa, com a repetição da análise em cada tempo de moagem e que serviu apenas como garantia dos resultados, também pode ser encontrada no ANEXO 2.

TABELA 4.4: Análise física da cinza de casca de arroz modificada.

<b>Análise Física</b>							
<b>Ensaio</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>12 h</b>	<b>18 h</b>	<b>24 h</b>	<b>Unidade</b>
Peneira # 0,075 mm (# 200)	1,4	0,3	0,2	1,3	1,8	18,1	%
Peneira # 0,045 mm (# 325)	8,0	1,4	1,7	16,0	13,1	40,2	%
Massa específica	2,17	2,17	2,19	2,20	2,19	2,18	g/cm <sup>3</sup>
Tamanho médio da partícula	30,09	10,55	11,95	8,00	7,47	8,90	µm
Superfície específica - Blaine	1035	1559	1501	1976	1936	1705	m <sup>2</sup> /kg

TABELA 4.5: Análise química da cinza de casca de arroz modificada.

<b>Análise Química</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Teor</b>	<b>Unidade</b>
SiO <sub>2</sub>	94,85	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,49	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	%
CaO	0,09	%
MgO	0,01	%
K <sub>2</sub> O	0,59	%
Na <sub>2</sub> O	0,00	%
Resíduo insolúvel	95,62	%
Perda ao fogo	2,50	%

A difração de raios-X mostra a presença ou não de formas cristalinas, que diminuem a atividade pozolânica do material. Os ensaios de difração de raios-X também foram realizados na Cia de Cimento Portland Rio Branco – Votoran.

A difração de raios-X da cinza de casca de arroz “in natura” não apresenta grandes picos indicando a natureza amorfa do material, conforme mostra a FIGURA 4.20. Porém no difratograma da cinza de casca de arroz modificada, pode-se observar, conforme a FIGURA 4.21, a presença de picos mais destacados, como a cristobalita e maghemite, que são formas de sílica cristalina.

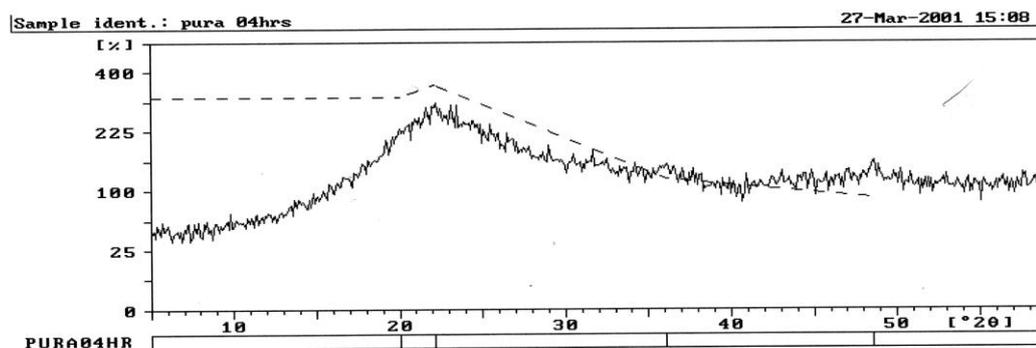


FIGURA 4.20: Difração de raios-X da cinza da casca de arroz “in natura”, com 4 horas de moagem.

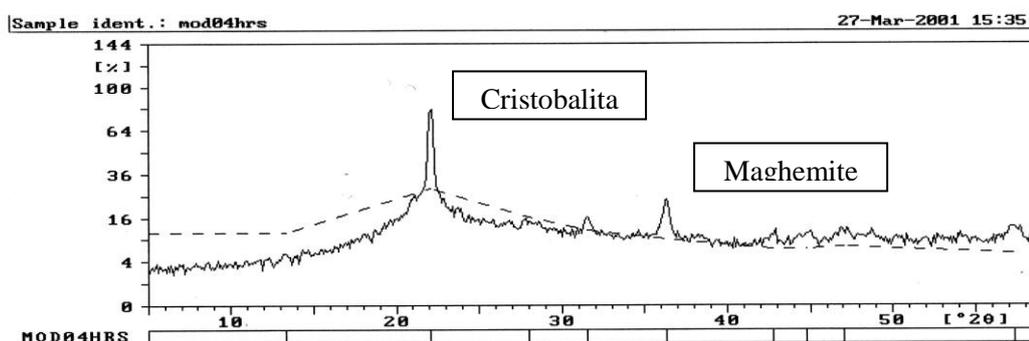


FIGURA 4.21: Difração de raios-X da cinza da casca de arroz modificada, com 4 horas de moagem.

#### 4.6.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V – ARI (alta resistência inicial), doado pela empresa Votoran, que também forneceu o resultado dos ensaios, conforme TABELAS 4.6, 4.7 e 4.8.

TABELA 4.6: Análise física do cimento CP V – ARI – Votoran.

<b>Análise Física</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Teor</b>	<b>Unidade</b>
Peneira # 0,075 mm (# 200)	0,00	%
Peneira # 0,045 mm (#325)	0,40	%
Água da pasta de consistência normal	32,10	%
Superfície específica - Blaine	531,00	m <sup>2</sup> /kg
Início de pega	3h 19min	h/min
Fim de pega	4h 34min	h/min
Expansibilidade a quente	0,5	mm
Massa específica	3,14	g/cm <sup>3</sup>

TABELA 4.7: Análise química do cimento CP V – ARI – Votoran.

<b>Análise Química</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Teor</b>	<b>Unidade</b>
SiO <sub>2</sub>	18,10	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,35	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,70	%
CaO	60,58	%
MgO	5,90	%
K <sub>2</sub> O	1,24	%
Na <sub>2</sub> O	0,07	%
SO <sub>3</sub>	3,76	%
CO <sub>2</sub>	1,75	%
Perda ao fogo	2,80	%
Resíduo insolúvel	0,84	%

TABELA 4.8: Análise mecânica do cimento CP V – ARI – Votoran.

<b>Análise mecânica</b>		
<b>Idade</b>	<b>Resistência</b>	<b>Unidade</b>
1 dia	32,10	MPa
3 dias	35,30	MPa
7 dias	39,40	MPa
28 dias	46,90	MPa

### 4.6.3 Agregado

Para o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento - IAP, foi utilizada areia normalizada pela ABNT e produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)–SP, conforme a NBR 7214/82. O agregado usado na confecção das argamassas foi doado pela empresa Betonbrás Concreto Ltda, localizada na cidade de São José, em Santa Catarina e ensaiado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. O material apresenta origem quartzosa sendo classificado como areia média (zona 3) segundo a NBR 7211/83, e suas características são mostradas nas TABELAS 4.9 e 4.10.

TABELA 4.9: Composição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7217/82).

<b>Peneiras # (mm)</b>	<b>Material retido (g)</b>	<b>Retido na malha (%)</b>	<b>Retido acumulado (%)</b>
9,5	---	---	---
6,3	0,54	00	00
4,8	0,25	00	00
2,4	14,89	02	02
1,2	193,91	25	27
0,6	227,47	30	57
0,3	180,94	23	80
0,15	94,99	12	92
Fundo	58,43	08	100
Total	771,42	100	---

TABELA 4.10: Caracterização do agregado miúdo (NBR 7217/82).

<b>Determinação</b>	<b>Valor obtido</b>
Módulo de finura	2,58
Dimensão máxima característica	2,4 mm
Massa específica aparente	2,60 kg/dm <sup>3</sup>
Material pulverulento	1,7%
Matéria orgânica	< 300 ppm
Massa unitária	1,39 kg/dm <sup>3</sup>

#### 4.6.4 Água

Para confecção dos corpos-de-prova de argamassa, foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento público local, CASAN.

#### 4.6.5 Aditivos Redutores de Água

O aditivo plastificante utilizado na pesquisa foi o PLASTIMIXER N, fornecido pela empresa SIKA, e sua escolha deu-se em função dos bons resultados verificados em pesquisas de concreto de alto desempenho com pozolanas realizados por PAZ (1998) e GAVA (1999).

O PLASTIMIXER N é um aditivo plastificante, redutor de água de amassamento e de tempo de pega normal, classificado, segundo a NBR 11768/92 (EB 1763/92), como (Tipo P). A dosagem recomendada pelo fabricante varia de 0,2% a 0,5% em massa do cimento, podendo ser lançado diretamente no concreto ou junto com a água de amassamento. Quimicamente é denominado plastificante para concreto, e apresenta-se na forma líquida, com cor castanho escuro e odor enjoativo. Sua classificação química é de licor negro (lixiviação da celulose). Quanto à solubilidade, trata-se de um produto solúvel em água. Outras informações podem ser observadas na TABELA 4.11, que mostra dados dos ensaios físicos do aditivo, na temperatura de 25°C. Os ensaios foram realizados nos laboratórios do fabricante.

TABELA 4.11: Dados físicos do aditivo plastificante.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade	1,165 - 1,170	g/ml
Viscosidade (SP1, V100)	20,00	cPs
PH	12,00 - 14,00	---
Teor de sólidos	34 - 37	%
Permanência do efeito	40	min

#### 4.6.6 Hidróxido de Cálcio

Para realizar a cura úmida dos corpos-de-prova ensaiados à compressão axial, utilizou-se uma solução saturada de hidróxido de cálcio, da marca Minersol - CH III.

#### 4.7 Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento - IAP

Antes da determinação da pozolanicidade, as cinzas foram secas em estufa por 24 horas, à temperatura média de 110°C, conforme recomendado pela NBR 5752/92. A estufa usada é da marca Memmert - Modell 800 D 06064. Na seqüência, foi realizado ensaio de massa específica das cinzas “in natura” e modificada, utilizando-se o Frasco de Le Chatelier, observando-se as recomendações da NBR NM 23/98. Este ensaio foi realizado em sala climatizada, obedecendo-se aos valores de temperatura e umidade citados na norma, através do aparelho da marca Novus. Os valores médios encontram-se na TABELA 4.12.

TABELA 4.12: Resultados médios dos valores de massa específica das cinzas “in natura” e modificada.

<b>Massa Específica (<math>\delta</math>)</b>	
Cinza “in natura”	2,07 (g/cm <sup>3</sup> )
Cinza modificada	2,20 (g/cm <sup>3</sup> )

O ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento foi realizado nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Curso de Engenharia Civil, da UFSC, seguindo-se as recomendações da NBR 5752/92. Utilizou-se os dois tipos de cinzas, com seus diferentes tempos de moagem para determinação do melhor índice de pozolanicidade, confeccionando-se três argamassas: a primeira argamassa é de referência, com traço 1:3 (cimento : areia) em massa e quantidade de água suficiente para gerar uma consistência variável entre 220 e 230mm, verificada através de ensaio na mesa de consistência (*flow table*); a segunda argamassa teve uma substituição de 35% em volume absoluto do cimento da argamassa de referência pela cinza “in natura” mantendo-se os mesmos parâmetros para a consistência; e seguindo-se o mesmo padrão da segunda argamassa, a terceira foi produzida usando-se a cinza modificada.

Para a argamassa de referência, foram moldados três corpos-de-prova. Para as argamassas com substituição de cinza “in natura” e modificada, também foram moldados três corpos-de-prova para cada tempo de moagem, totalizando 39 corpos-de-prova. A cura dos corpos-de-prova foi realizada em ambiente hermeticamente fechado, com temperatura controlada entre  $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$ , pelo período de 28 dias. Este ambiente foi elaborado usando-se uma caixa de poliestireno expandido com dimensões internas de (88,0 x 48,8 x 41,0) cm, da marca Icebox. Para o aquecimento do ambiente, foi utilizado um aquecedor para aquário, com relação de uso de 1w/l da marca Master, em conjunto com um termostato da marca Thermic 0-40 25A e lâmina d’água de aproximadamente 8cm, ou seja, cerca de 35 litros. Foram realizadas duas leituras diárias da temperatura no interior da caixa, utilizando um termômetro da marca Incoterm tipo III, com escala de  $80^\circ\text{C}$ . A FIGURA 4.22 mostra a cura dos corpos-de-prova do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento (IAP).

Passados os 27 dias de cura térmica acelerada, os corpos-de-prova foram retirados da caixa com antecedência de 1 hora, para o ensaio de resistência à compressão axial, sendo capeados com enxofre, conforme recomendado pela NBR 7215/96. O índice de atividade pozolânica é determinado pela razão entre a resistência média da argamassa com cinza “in natura” ou modificada, e a resistência média da argamassa de referência, expresso em porcentagem. As dosagens são mostradas nas TABELAS 4.13 e 4.14, observando-se que a NBR 12653/92 exige que o índice de atividade pozolânica com cimento, aos 28 dias, em relação à argamassa de

controle, deve ser no mínimo de 75%. Os resultados do índice de atividade pozolânica com cimento encontram-se no Capítulo 5.

TABELA 4.13: Índice de atividade pozolânica com cimento para cinza “in natura”.

	<b>Ref.</b>	<b>2h</b>	<b>4h</b>	<b>6h</b>	<b>12h</b>	<b>18h</b>	<b>24h</b>
Cimento (g)	312,00	202,80	202,80	202,80	202,80	202,80	202,80
Areia (g)	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00
CCA “in natura” (g)	---	71,99	71,99	71,99	71,99	71,99	71,99
Água (g)	168,00	191,26	186,43	181,10	183,50	180,28	182,17
Consistência (mm)	221,00	228,00	227,00	222,00	230,00	220,00	226,00

TABELA 4.14: Índice de atividade pozolânica com cimento para cinza modificada.

	<b>Ref.</b>	<b>2h</b>	<b>4h</b>	<b>6h</b>	<b>12h</b>	<b>18h</b>	<b>24h</b>
Cimento (g)	312,00	202,80	202,80	202,80	202,80	202,80	202,80
Areia (g)	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00
CCA Modificada (g)	---	76,51	76,51	76,51	76,51	76,51	76,51
Água (g)	168,00	181,00	179,05	175,16	177,93	180,70	183,27
Consistência (mm)	221,00	223,00	224,00	222,00	226,00	221,00	228,00

#### 4.8 Ensaio de Luxan

Para DAFICO (2001), o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/92) mede quanto é possível substituir de cimento por pozolana para a fabricação de cimentos com adição, porém o valor resultante do ensaio é influenciado pelo conteúdo de sílica amorfa e, principalmente, pela superfície específica do material. Por isso recomenda, para o estudo do desempenho de pozolanas, um ensaio que meça sua atividade química, como o ensaio de LUXAN (1989), que avalia a reatividade do material, através da análise de sua condutividade.

GAVA (1999), em seu estudo sobre diversas metodologias para a determinação da pozolanicidade, inclusive o índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/92), ressalta que um fator importante como a relação água/aglomerante não é controlada. Em todos os métodos, o controle da consistência da argamassa é feito pela quantidade de água incorporada à mistura, alterando a relação água/aglomerante em função do tipo e teor de pozolana empregada. Conseqüentemente, com maior relação água/aglomerante, pozolanas com elevada área específica, mesmo sendo mais reativas, apresentam desempenho inferior pelo fato de consumirem mais água.

Diante dessas informações, decidiu-se realizar o ensaio de LUXAN (1989) e comparar seus resultados com o índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/92). A TABELA 4.15 mostra a classificação de materiais pozolânicos quanto à diferença de condutividade.

TABELA 4.15: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade (LUXAN, 1989).

<b>Pozolanicidade do material</b>	<b>Condutividade (mS/cm)</b>
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanicidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanicidade	> 1,2

Para o ensaio, utilizou-se um frasco de polietileno de 600ml, da marca Nalgon, com um termômetro e uma célula de medição de condutividade conectada a um condutivímetro portátil. O frasco é colocado sobre um misturador elétrico da marca Fisatom, modelo 752A, potência de 530w e 230v em um banho termicamente controlado com temperatura de  $(40\pm 1)^{\circ}\text{C}$ . Colocou-se, então, 200ml de solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , também à temperatura de  $(40\pm 1)^{\circ}\text{C}$ , dentro do frasco. A condutividade inicial foi medida com compensação térmica.

Foram pesadas amostras de 5g de cada uma das cinzas “in natura” e modificada, em seus diferentes graus de moagem, secas em estufa a  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ . Individualmente, a quantidade de 5g do material é adicionada à solução, que é mantida em constante mistura, através do misturador elétrico, durante o tempo de 120 segundos, realizando-se, então, a medição da condutividade. Finalmente, calculou-se a variação entre a condutividade inicial e final, obtida em mili Siemens

por centímetro (mS/cm). A FIGURA 4.23 mostra todo o aparato para a realização do ensaio. Os resultados encontram-se no Capítulo 5.



FIGURA 4.22: Cura térmica acelerada para o ensaio de pozolanicidade com cimento.



FIGURA 4.23: Ensaio de LUXAN (1989).

## 4.9 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Para comprovar a eficiência e aceitabilidade da cinza modificada, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial em corpos-de-prova de argamassa, com diferentes teores de substituição de cinza, em diferentes relações água/aglomerante, e nos seus diferentes graus de moagem. Foram feitos ensaios utilizando corpos-de-prova de referência, isto é, sem substituição de cinza e com cinza “in natura”, para que os resultados desses três tipos de argamassas fossem comparados.

### 4.9.1 Relação água/aglomerante

As relações água/aglomerante foram fixadas em volume absoluto, sendo 1,256 e 1,633, respectivamente representadas em massa equivalente pelos valores 0,40 e 0,52. As substituições do cimento pelas cinzas “in natura” e modificada foram feitas em volume absoluto, mantendo-se,

dessa forma, o mesmo volume de aglomerante na pasta. Assim como SANTOS (1997) e GAVA (1999), denominou-se a relação água/(cimento + cinza de casca de arroz) em massa equivalente como sendo a razão entre a massa da água e a massa de aglomerante sem substituição. Transformou-se a massa da cinza da casca de arroz adicionada em massa equivalente de cimento, multiplicando-a pela relação (massa específica de cimento)/(massa específica da cinza da casca de arroz).

#### **4.9.2 Teores de Substituição das Cinzas de Casca de Arroz**

Os teores de substituição foram definidos em 15% e 40%, a partir dos estudos realizados por SANTOS (1997), onde a cinza tipo F, com teor de 15%, aos 28 dias, apresentou resistência à compressão acima da resistência da argamassa de referência. No teor de 40% de substituição, a referida pesquisadora obteve uma resistência similar à argamassa de referência.

#### **4.9.3 Teor do Aditivo Químico**

Conforme já foi comentado no item 4.5.5, o aditivo utilizado foi o PLASTIMIXER N na dosagem de 0,3% da massa do cimento, da argamassa de referência, sendo colocado juntamente com a água de amassamento.

#### **4.9.4 Mistura dos Materiais**

Antes de iniciar o procedimento de mistura dos materiais, a areia e as cinzas “in natura” e modificada foram secas em estufa a  $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas. Todos os materiais foram pesados na balança eletrônica da marca Marte - As 5500, com capacidade para 5000g e precisão de 0,01g. Após a pesagem, os materiais eram colocados no misturador mecânico da marca Pavitest (C3010 – 146), 380v de eixo vertical, capacidade de 5 litros, com velocidade baixa (1) e alta (2) na seguinte ordem : inicialmente colocava-se toda a água de amassamento. Para as dosagens com plastificante, este era colocado juntamente com a água de amassamento. Em seguida, colocava-se toda a quantidade de cimento, quando se tratava da argamassa de

referência. Quando a argamassa tinha teor de substituição, a quantidade de cinza era colocada na sua totalidade, juntamente com todo o conteúdo de cimento. Ligava-se o misturador na velocidade 1, durante 30 segundos. Nos próximos 30 segundos, colocava-se areia. Ao término deste primeiro minuto de mistura, passava-se o misturador para a velocidade 2, onde permanecia por 30 segundos. Após este período, o misturador era desligado por 1 minuto e 30 segundos, sendo que nos 15 segundos iniciais fazia-se a limpeza das paredes da cuba e durante o tempo restante a argamassa descansava, tomando-se o cuidado de cobrir a cuba com um pano úmido. Finalmente, o misturador era ligado por mais 1 minuto na velocidade 2, prosseguindo-se imediatamente com o ensaio de consistência, na mesa de consistência (*flow table*).

#### **4.9.5 Consistência das Argamassas**

A consistência das argamassas foi fixada em  $(225\pm 5)$ mm (NBR 7215/96), e ajustada por incorporação de agregado miúdo. Se a consistência obtida estivesse dentro dos parâmetros fixados, a mistura retornava à cuba e era levada até a sala climatizada, onde a temperatura e a umidade estavam em concordância com a norma, para a moldagem dos corpos-de-prova. No caso da consistência obtida ser menor que a fixada, o material era jogado fora e era feita uma nova mistura. Entretanto, se a consistência estivesse acima do valor estabelecido, a mistura retornava ao misturador, onde se realizava a incorporação de areia seguida de nova homogeneização durante o período de 1 minuto na velocidade 1. Verificava-se novamente a consistência do material.

#### **4.9.6 Moldagem dos Corpos-de-prova**

Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada idade de ruptura (3, 7 e 28 dias), com dimensões de  $(50 \times 100)$ mm (diâmetro x altura), conforme recomendações da NBR 7215/96. Para a relação água/aglomerante equivalente de 0,52, a quantidade de material colocada no misturador resultava na moldagem de 5 corpos-de-prova. Já para a relação água/aglomerante equivalente de 0,40 foram moldados 6 corpos-de-prova por mistura. As TABELAS 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 mostram as dosagens para cada relação água/aglomerante equivalente.

TABELA 4.16: Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,52 para cinza de casca de arroz “in natura”, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.

CCA “in natura” 0,52								
	Teor de substituição	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Plast. (g)	Areia (g)	Traço Final	Consistência (mm)
Ref.	---	650,00	---	338,00	---	1562,00	1 : 2,40	223,00
2h	15%	552,50	64,28	338,00	---	1322,94	1 : 2,04	223,00
4h	15%	552,50	64,28	338,00	---	1386,26	1 : 2,13	223,00
6h	15%	552,50	64,28	338,00	1,95	1400,00	1 : 2,15	225,00
2h	40%	390,00	171,40	338,00	---	1120,00	1 : 1,72	229,00
4h	40%	390,00	171,40	338,00	---	1203,68	1 : 1,85	228,00
6h	40%	390,00	171,40	338,00	---	1218,73	1 : 1,87	226,00

TABELA 4.17: Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,52 para cinza de casca de arroz modificada, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.

CCA Modificada 0,52								
	Teor de substituição	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Plast. (g)	Areia (g)	Traço Final	Consistência (mm)
Ref.	---	650,00	---	338,00	---	1562,00	1 : 2,40	223,00
2h	15%	552,50	68,31	338,00	---	1440,00	1 : 2,22	224,00
4h	15%	552,50	68,31	338,00	---	1500,00	1 : 2,31	224,00
6h	15%	552,50	68,31	338,00	1,95	1500,00	1 : 2,31	224,00
2h	40%	390,00	182,17	338,00	---	1277,20	1 : 1,96	228,00
4h	40%	390,00	182,17	338,00	---	1357,30	1 : 2,09	223,00
6h	40%	390,00	182,17	338,00	---	1400,00	1 : 2,15	222,00

TABELA 4.18: Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,40 para cinza de casca de arroz “in natura”, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.

CCA “in natura” 0,40								
	Teor de substituição	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Plast. (g)	Areia (g)	Traço Final	Consistência (mm)
Ref.	---	1200,00	---	480,00	---	1815,13	1 : 1,51	223,00
2h	15%	1020,00	118,66	480,00	---	1500,00	1 : 1,25	224,00
4h	15%	1020,00	118,66	480,00	---	1554,00	1 : 1,30	221,00
6h	15%	1020,00	118,66	480,00	3,60	1554,00	1 : 1,30	223,00
2h	40%	720,00	316,43	480,00	---	1000,00	1 : 0,83	225,00
4h	40%	720,00	316,43	480,00	---	1000,00	1 : 0,83	227,00
6h	40%	720,00	316,43	480,00	---	1000,00	1 : 0,83	229,00

TABELA 4.19: Dosagem de argamassa com relação água/aglomerante equivalente de 0,40 para cinza de casca de arroz modificada, em seus diversos graus de moagem e teores de substituição.

CCA Modificada 0,40								
	Teor de substituição	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Plast. (g)	Areia (g)	Traço Final	Consistência (mm)
Ref.	---	1200,00	---	480,00	---	1815,13	1 : 1,51	223,00
2h	15%	1020,00	126,11	480,00	---	1500,00	1 : 1,25	230,00
4h	15%	1020,00	126,11	480,00	---	1646,00	1 : 1,37	224,00
6h	15%	1020,00	126,11	480,00	3,60	1650,00	1 : 1,38	222,00
2h	40%	720,00	336,31	480,00	---	1106,20	1 : 0,92	226,00
4h	40%	720,00	336,31	480,00	---	1320,00	1 : 1,10	227,00
6h	40%	720,00	336,31	480,00	---	1350,00	1 : 1,13	228,00

#### 4.9.7 Idades dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial

As idades de ruptura foram determinadas em 3, 7 e 28 dias. Esta determinação teve como base a revisão bibliográfica, onde vários autores também trabalharam com estes parâmetros. Outro fator determinante foi a NBR 12653/92, que estabelece a pozolanicidade com cimento aos 28 dias.

#### 4.9.8 Cura

Após a desforma dos corpos-de-prova, os mesmos foram identificados, conforme mostra a FIGURA 4.24, podendo-se observar também, a diferença de coloração entre as argamassas. Todos os corpos-de-prova foram curados em solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), em condições normais de temperatura alguns constituintes do cimento Portland iniciam sua hidratação, conforme é adicionada a água; porém, as reações de hidratação são consideravelmente retardadas quando os produtos de hidratação cobrem os grãos de cimento anidro, sendo, portanto, bastante satisfatória a hidratação em condições de saturação.

#### 4.9.9 Ruptura dos Corpos-de-prova

Terminado o período de cura para cada uma das idades especificadas, os corpos-de-prova eram retirados da água para receberem o capeamento com enxofre. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado na prensa da marca Shimadzu Corporation, modelo UH-2000 KNA, com capacidade para 2000, 1000, 400, 200, 100 e 40KN, como mostra a FIGURA 4.25. A velocidade empregada nos ensaios foi a recomendada pela NBR 7215/96. Os resultados dos ensaios de resistência são apresentados no Capítulo 5.

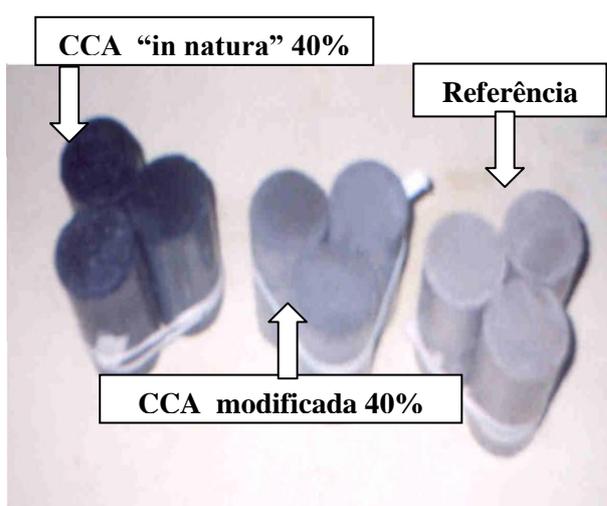


FIGURA 4.24: Identificação dos corpos-de-prova após a moldagem.



FIGURA 4.25: Prensa para realização do ensaio de resistência.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento

Sendo o principal objetivo deste trabalho produzir um material altamente pozolânico e de reduzido teor de carbono, através do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, procurou-se verificar a adequabilidade deste novo material às exigências normativas. A TABELA 5.1 mostra os resultados do ensaio.

TABELA 5.1: Resultados do ensaio de índice de atividade pozolânica (NBR 5752/92).

<b>Argamassa</b>	<b>Tempo de moagem (h)</b>	<b>Consistência (mm)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Resistência média (MPa)</b>	<b>IAP médio (%)</b>
Referência	---	221,00	168,00	43,43	---
Cinza de casca de arroz “in natura”	2	228,00	191,26	35,68	82,16
	4	227,00	186,43	35,91	82,68
	6	222,00	181,10	34,42	79,75
	12	230,00	183,50	36,69	84,48
	18	220,00	180,28	35,48	81,69
	24	226,00	182,17	40,09	92,91
Cinza de casca de arroz modificada	2	223,00	181,00	35,72	82,25
	4	224,00	179,05	35,89	82,62
	6	222,00	175,16	40,88	94,13
	12	226,00	177,93	39,85	91,76
	18	221,00	180,70	44,08	101,50
	24	228,00	183,27	42,90	98,78

Quando não foi possível adotar o valor da resistência média dos três corpos-de-prova analisados no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, considerou-se a resistência potencial das argamassas, ou seja, se o valor da resistência atingido por um corpo-de-prova fosse maior

que a média dos outros dois corpos-de-prova majorados em 10%, então este seria o valor adotado.

Os resultados obtidos apresentaram uma série de peculiaridades que necessitam ser analisadas com bastante cautela. Uma primeira constatação que merece destaque refere-se aos valores dos índices de atividade pozolânica (IAP), apresentados na TABELA 5.1. Os valores obtidos foram quase todos menores que 100%, mas superiores ao limite mínimo especificado pela norma brasileira para pozolanas destinadas à fabricação de cimentos pozolânicos, que é de 75%. Estes valores, entretanto, não significam um baixo desempenho, pois, devido às características do próprio ensaio, a quantidade de água empregada é variável e foi sempre maior para as argamassas contendo cinza do que a de referência, conforme apresentado nas TABELAS 4.13 e 4.14. Um fato marcante foi o decréscimo progressivo da demanda de água das argamassas contendo cinza com o aumento do tempo de moagem, até 6 horas. Após este tempo, no caso das argamassas com cinza “in natura”, a demanda de água aumentou ligeiramente, enquanto que no das argamassas com cinza modificada, este comportamento foi praticamente constante. Para o caso das cinzas “in natura”, este fato já havia sido detectado por SANTOS (1997) e GUEDERT (1991) e pode ser explicado por uma possível formação de grumos das partículas muito finas de cinza, principalmente daquelas com alto teor de carbono.

Na TABELA 5.1, ainda pode ser observado que os valores de IAP referentes às cinzas modificadas foram ligeiramente mais elevados do que os obtidos com as cinzas “in natura”. Novamente, a maior demanda de água das cinzas “in natura” explica este aparente pior desempenho, pois, na realidade, não se está comparando argamassas com mesma relação volumétrica entre água e aglomerantes. Fazendo-se um paralelo com os resultados obtidos em argamassas onde foi fixada esta relação (TABELAS 5.2 a 5.5 e FIGURAS 5.1 a 5.4), pode-se notar que os valores de IAP não devem ser tomados como um parâmetro limitante do uso de pozolanas, conforme já demonstrado por GAVA (1999).

TABELA 5.2: Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante de 0,52.

<b>CCA “in natura” 0,52</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
Ref.	37,48	39,16	44,24
2h 15%	35,62	39,26	43,94
4h 15%	37,31	42,62	49,50
6h 15%	36,82	41,45	47,33
2h 40%	26,03	31,55	40,00
4h 40%	28,34	35,15	40,01
6h 40%	23,16	34,47	39,22

TABELA 5.3: Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante de 0,52.

<b>CCA Modificada 0,52</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
Ref.	37,48	39,16	44,24
2h 15%	32,02	35,78	41,13
4h 15%	34,16	38,71	44,36
6h 15%	32,55	37,09	43,25
2h 40%	25,89	34,83	40,00
4h 40%	27,50	35,99	41,51
6h 40%	26,67	35,87	40,82

TABELA 5.4: Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante de 0,40.

<b>CCA “in natura” 0,40</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
Ref.	49,76	52,88	55,77
2h 15%	45,89	46,89	58,77
4h 15%	52,88	55,52	57,79
6h 15%	48,35	53,15	56,87
2h 40%	37,36	43,95	46,29
4h 40%	40,88	47,91	48,16
6h 40%	40,70	45,77	46,84

TABELA 5.5: Resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15% e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante de 0,40.

<b>CCA Modificada 0,40</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
Ref.	49,76	52,88	55,77
2h 15%	42,64	47,83	53,07
4h 15%	46,17	52,89	54,94
6h 15%	48,64	51,18	53,94
2h 40%	36,40	48,87	50,02
4h 40%	44,00	49,61	56,06
6h 40%	43,21	49,56	55,11

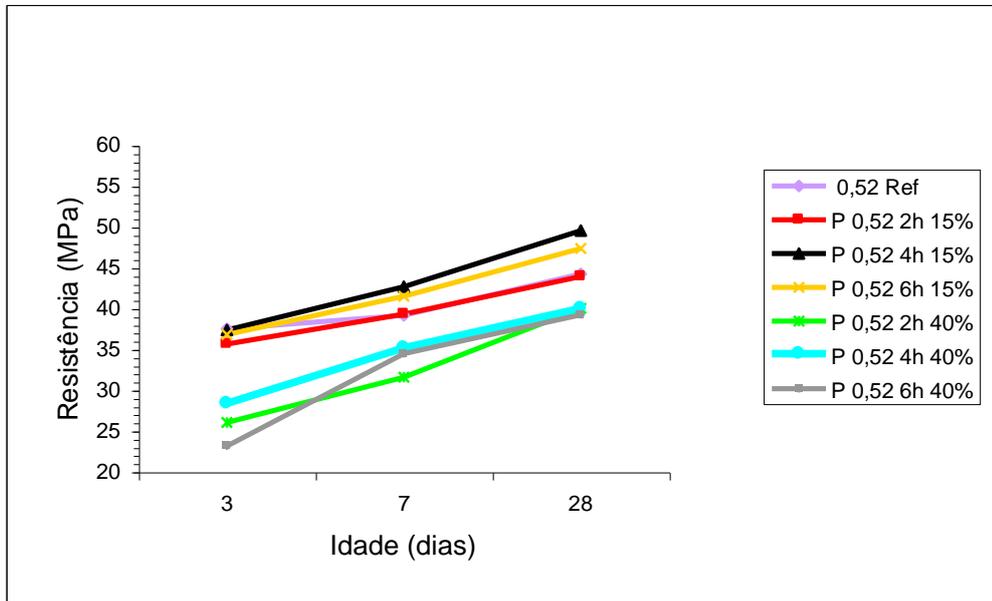


FIGURA 5.1: Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante 0,52.

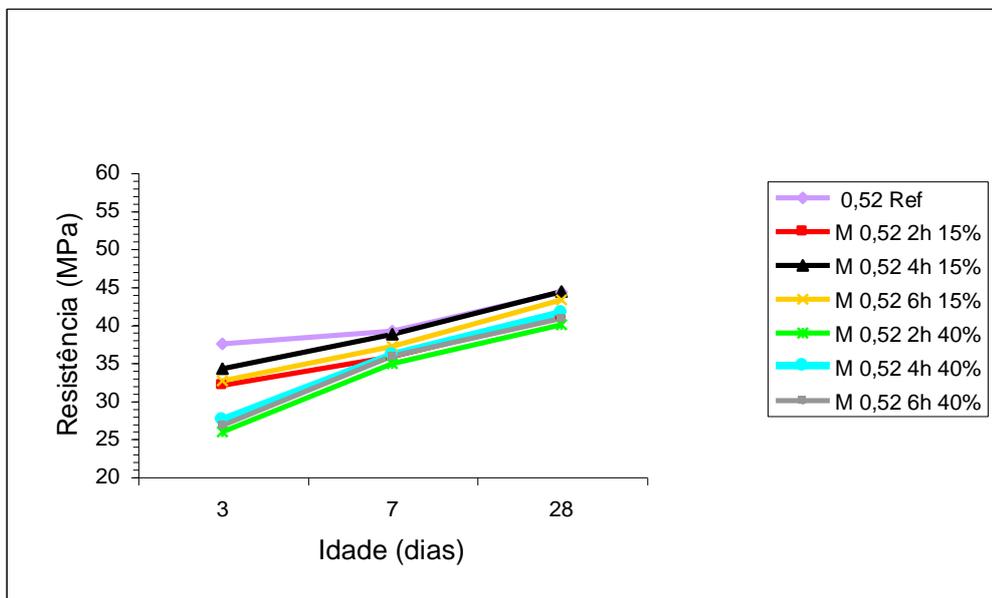


FIGURA 5.2: Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante 0,52.

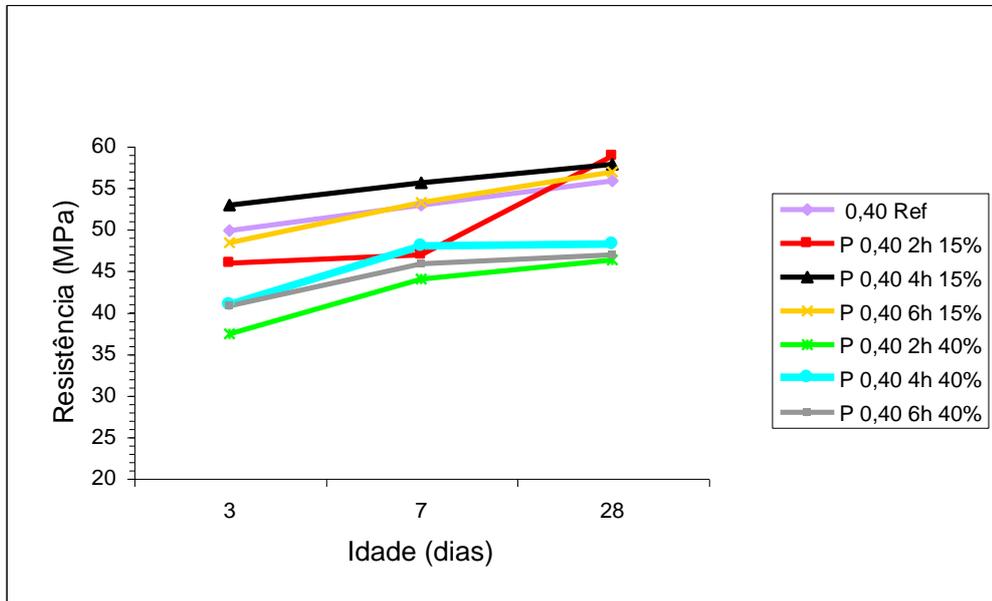


FIGURA 5.3: Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz “in natura”, com relação água/aglomerante 0,40.

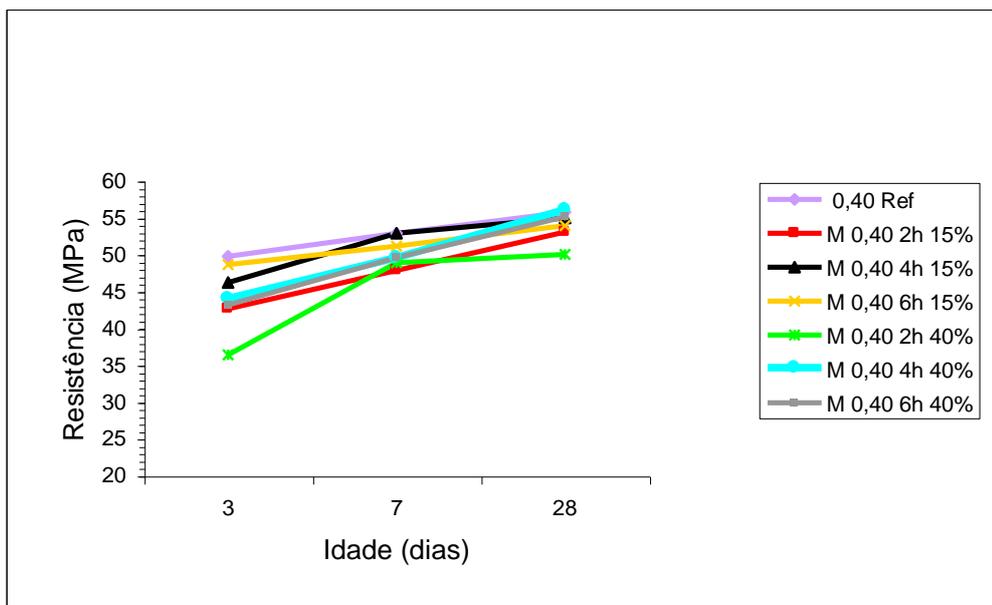


FIGURA 5.4: Evolução da resistência da argamassa de referência e das argamassas com substituição de 15 e 40% de cinza de casca de arroz modificada, com relação água/aglomerante 0,40.

## 5.2 Ensaio de Luxan

Como já foi exposto, no ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica com cimento, a consistência da argamassa é controlada pela incorporação de água, alterando a relação água/aglomerante. Em função disso, resolveu-se realizar um ensaio que medisse quimicamente a pozolanicidade das cinzas analisadas. A TABELA 5.6 mostra os resultados obtidos através do ensaio de LUXAN (1989), comentado no Capítulo 4.

TABELA 5.6: Resultados referentes ao ensaio de LUXAN (1989).

<b>Material ensaiado</b>	<b>Tempo de moagem (h)</b>	<b>Leitura Inicial (mS/cm)</b>	<b>Leitura Final (mS/cm)</b>	<b>Condutividade (mS/cm)</b>	<b>Classificação quanto a pozolanicidade</b>
Cinza de casca de arroz “in natura”	02	7,46	4,69	2,77	Boa
	04	7,37	4,60	2,77	Boa
	06	7,20	4,47	2,73	Boa
	12	7,16	4,82	2,34	Boa
	18	7,15	4,66	2,49	Boa
	24	7,17	4,70	2,47	Boa
Cinza de casca de arroz modificada	02	7,50	6,39	1,11	Variável
	04	7,61	6,49	1,12	Variável
	06	7,57	6,42	1,15	Variável
	12	7,49	6,47	1,02	Variável
	18	7,41	6,22	1,19	Variável
	24	7,18	6,46	0,72	Variável

Os resultados de desempenho referentes às cinzas “in natura” foram consistentemente superiores aos das cinzas modificadas, contradizendo os de IAP e mesmo os obtidos em argamassas com relação água/aglomerante constante. Uma explicação provável seria a influência da presença do carbono nas medidas de condutividade feitas no ensaio. Além disso, a estrutura mineralógica da cinza modificada, como descrita a seguir, pode também ter influenciado estes resultados.

### 5.3 Ensaio de Difração de Raios-X das Cinzas de Casca de Arroz

A estrutura cristalina das cinzas mostra-se diferenciada, como se pode observar através das difrações de raios-X, nas FIGURAS 4.20 e 4.21. Salienta-se que o processo de requeima das cinzas, nas temperaturas utilizadas, apresentou picos mais definidos de cristais de cristobalita, tornando esta cinza teoricamente menos reativa. Este resultado, entretanto, pode ser considerado inesperado, pois DAFICO (2001), utilizando cinzas “in natura” de mesma fonte, que foram posteriormente submetidas a processo de requeima similar ao realizado neste trabalho, observou a não ocorrência de mudança de mineralogia das cinzas, conforme mostrado na FIGURA 5.5.

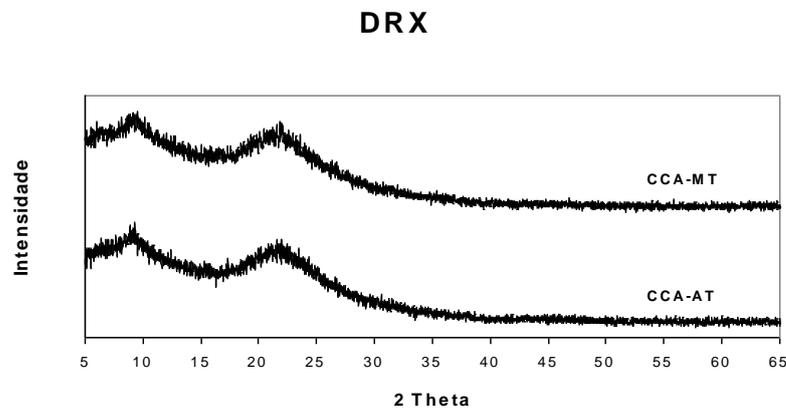


FIGURA 5.5: Comparação dos difratogramas de raios-X das cinzas de casca de arroz “in natura” (CCA AT) e modificada (CCA MT) (DAFICO, 2001).

### 5.4 Ensaio de Resistência à Compressão Axial das Argamassas

Na confecção das argamassas, foi feita incorporação de areia até que a consistência de  $(225\pm 5)$  mm fosse atingida e as relações água/aglomerante equivalente foram mantidas fixas. Os traços foram calculados em relação à massa total de aglomerante. A massa do cimento, adicionada à massa da pozolana transformada em massa equivalente de cimento, representa a massa total do aglomerante. As TABELAS 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 mostram os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial das argamassas. Os ensaios foram realizados com 3, 7 e 28 dias de idade. Tanto para a cinza “in natura” como para a cinza modificada, foram adotadas as relações água/aglomerante equivalente de 0,52 e 0,40. Os teores de substituição das cinzas foram

estipulados em 15% e 40%, nos diferentes tempos de moagem. A evolução da resistência das argamassas pode ser observada, também, nas FIGURAS 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Outros resultados interessantes do trabalho estão relacionados com os testes realizados em argamassas com relação água/aglomerante em volume constante. Pode-se notar, inicialmente, nas TABELAS 4.16 e 4.17 que a quantidade de agregado incorporado, no caso do uso das cinzas modificadas, foi sempre maior do que o verificado quando do uso de cinza “in natura”. Este resultado reafirma os maiores valores de demanda de água observados para as cinzas com alto teor de carbono, quando foram realizados os ensaios de IAP. Portanto o uso da cinza de casca de arroz modificada torna-se mais barato que a cinza “in natura”.

Na TABELA 5.2, pode-se observar que os valores de resistência obtidos com argamassas contendo 15% de cinza “in natura” e relação água/aglomerantes equivalente de 0,52 foram bastante expressivos, quando comparados aos da argamassa de referência. Apenas para o caso de moagem por 2 horas, o valor da resistência foi inferior. Os demais foram similares para todos os tempos de moagem na idade de 3 dias e superiores nas idades de 7 e 28 dias.

No caso da substituição de 40%, os valores foram inferiores aos da argamassa de referência em todas as idades ensaiadas, mas nota-se uma tendência à aproximação das curvas (FIGURA 5.1). Além disso, o tempo de moagem das cinzas não pareceu afetar a resistência obtida para este nível de substituição. Para esta relação água/aglomerante, os valores obtidos com as argamassas de cinza modificada foram praticamente os mesmos dos observados com as argamassas de cinza “in natura”.

No caso da relação água/aglomerante equivalente igual a 0,40, os resultados obtidos com o uso das cinzas foram ainda mais promissores. No caso das cinzas “in natura”, pode-se observar melhoras na resistência com a substituição de 15% do cimento, praticamente para todas as idades, quando o tempo de moagem foi superior a 4 horas. Ao comparar os resultados apresentados nas TABELAS 5.4 e 5.5, nota-se um ligeiro menor desempenho das cinzas modificadas, principalmente nas idades menores, quando comparado às cinzas “in natura”. Contudo, no caso de substituição de 40%, o desempenho das cinzas modificadas foi superior e pode-se notar um ganho de resistência nas argamassas, quando as cinzas moídas por mais tempo foram utilizadas. Deve-se enfatizar, entretanto, que o uso da cinza modificada mostrou-se sempre

mais vantajoso, do ponto de vista econômico, pela capacidade superior de incorporação de agregados verificada nas argamassas, ou seja, pela sua inferior demanda de água para atingir-se uma dada consistência.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a revisão bibliográfica e os resultados obtidos nos ensaios realizados no programa experimental desta dissertação, são apresentadas a seguir, algumas conclusões que devem ser consideradas especificamente válidas para este trabalho, como também suas limitações, ensaios e materiais utilizados na pesquisa.

São apresentadas também, algumas sugestões de novos trabalhos que possam incentivar uma maior aplicação de materiais pozolânicos como a cinza da casca de arroz, em argamassas e concretos.

### 6.1 Influência da Combustão nas Cinzas de Casca de Arroz

A combustão da casca de arroz tem como seu principal objetivo remover, por oxidação controlada, a celulose e a lignina, mantendo a sua estrutura celular. Neste contexto, a temperatura de queima é responsável pela reatividade da cinza de casca de arroz pois, através dela, será definido o teor de sílica amorfa.

A cinza “in natura” utilizada, que foi obtida sem controle de temperatura e tempo de exposição, apresentava uma coloração preta devido ao seu elevado teor de carbono, possuindo um teor médio de perda ao fogo de 18% e a presença de impurezas como os álcalis  $K_2O$  e  $Na_2O$  em teores médios de 0,48% e 0,04%, respectivamente. Outras impurezas, como  $CaO$  e  $MgO$ , também foram detectadas e seus valores médios foram de 0,08% e 0,07%. O teor médio de sílica foi de 79,23%, abaixo dos valores mostrados na bibliografia.

Na cinza modificada, que apresentou coloração cinza claro, o teor médio de perda ao fogo foi de 2,5%. Foi encontrado um valor médio de álcalis, sua principal impureza, de 0,59% ( $K_2O$ ), não sendo detectada a presença de  $Na_2O$ . As outras impurezas apresentaram valores médios de 0,09% ( $CaO$ ) e 0,01% ( $MgO$ ). O valor médio da sílica foi de 95%.

## 6.2 Influência do Grau de Moagem nas Cinzas de Casca de Arroz

A finura e a forma da cinza da casca de arroz influenciam na relação água/aglomerante, na capacidade de incorporação de agregados, quando da confecção de argamassas e concretos. As cinzas estudadas foram moídas a seco por grandes períodos de tempo, originando carga estática. Tanto a cinza “in natura” como a modificada apresentaram grande finura, aumentando sua capacidade de absorção de umidade e, conseqüentemente, a formação de grumos, dificultando sua passagem na peneira 0,045mm (#325). As superfícies específicas - Blaine, como já foi comentado anteriormente, apresentaram elevados valores, principalmente ao serem comparados com o cimento, de 531m<sup>2</sup>/kg. A superfície específica - Blaine apresentou uma variação em seus resultados, provavelmente em função de como foram realizados os procedimentos de moagem. Conforme já foi comentado, na moagem das cinzas foi colocada toda a quantidade de material a ser moído com 24h sendo retirada a quantidade necessária com 18h e a moagem prosseguia por mais 6h até concluir o período das 24h. Esta variação da moagem ser feita ora com carga total e ora com meia-carga, pode ter influenciado nos resultados.

## 6.3 Ensaio de Pozolanicidade das Cinzas de Casca de Arroz

O fato do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento ter apresentado valores baixos, explica-se pela maior porosidade das misturas que contêm cinza. Nas TABELAS 4.13 e 4.14, percebe-se que a quantidade de água utilizada é maior nas argamassas com cinza “in natura”. Enquanto a água adicionada foi de 168g para a argamassa de referência, para as demais chegou a 190g, com a maioria passando de 185g. Mesmo apresentando maior demanda de água, as argamassas com cinza “in natura” apresentaram desempenhos tão bons e, em certos casos, melhores do que o da cinza modificada. Este comportamento pode ser explicado pelo efeito filler, que as minúsculas partículas de carbono devem estar realizando na pasta e também pela característica mais amorfa desta cinza conforme mostrado na FIGURA 4.21 no difratograma de raios-X, que apresenta picos mais definidos de cristais de cristobalita, que pode reduzir sua atividade pozolânica. No entanto, não foram observados prejuízos no seu desempenho enquanto adição.

#### **6.4 Resistência à Compressão Axial das Argamassas**

A cinza da casca de arroz modificada mostrou-se economicamente viável na substituição do cimento Portland nas argamassas estudadas, por apresentar capacidade superior de incorporação de agregados, ou seja, pela sua inferior demanda de água necessária para atingir uma determinada consistência. Não foi observada influência do aditivo nos resultados de resistência à compressão das argamassas.

#### **6.5 Sugestões para Trabalhos Futuros**

O foco deste trabalho foi centrado no desenvolvimento da resistência à compressão axial de argamassas, mas sabe-se que existem diferenças entre o desenvolvimento da resistência de argamassas e concretos, principalmente devido à existência da interface pasta/agregado graúdo. Portanto, seria adequado realizar um estudo comparando-se o desenvolvimento da resistência da cinza da casca de arroz “in natura” e modificada em concreto de alto desempenho, analisando os fatores que mais influenciam as reações pozolânicas.

Um novo estudo poderia avaliar outras dosagens para cinza residual bem como para as cascas antes de efetivar a segunda combustão.

Com relação ao forno construído para realização da combustão, sugere-se que, em futuras pesquisas, o acesso da entrada de ar comprimido possa ser individualizado para cada tubo de aço inox perfurado, permitindo um melhor controle da temperatura de queima. Sugere-se ainda uma nova disposição para os termopares, talvez com pontos em cada uma das paredes do forno, auxiliando no melhor controle da temperatura. Poderia também ser instalada uma pequena janela de inspeção, feita com vidro de segurança, para melhor observação da mudança de cor da cinza.

Em trabalhos futuros, para condições de moagem semelhantes, sugere-se o uso de aditivos específicos, como o dietileno glicol ou trietanolamina, que são antiestáticos e devem ser colocados durante o processo de moagem com dosagem de 0,05% em relação à massa da cinza, evitando a formação de grumos. Industrialmente, também seria mais interessante trabalhar com

tempos menores de moagem, considerando um consumo menor de energia, apresentando-se como uma solução técnica e economicamente viável.

Outra linha de trabalhos que pode ser seguida é a referente a estudos de durabilidade dos concretos contendo estes tipos de cinza, uma vez que esta é uma propriedade vital quando se trata de concretos de alto desempenho.

Pode-se também pesquisar a influência das cinzas “in natura” e modificada, no módulo de elasticidade em concretos de alto desempenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-KHALAF, Moayad N.; YOUSIFT, Hana A. Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, n° 4, 1984, p. 241-248.
- ALMEIDA, Ivan Ramalho. Concretos de alto desempenho, a evolução tecnológica dos concretos tradicionais. In: **Concreto de alto desempenho** CD-ROM, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, versão 1.0, 1997.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Specification for Portland cement**. ASTM C 150 Philadelphia, 1994.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. ASTM C 618. Philadelphia, 1995. 3p
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete**. ASTM C 311. Philadelphia, 1993.6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para concreto de cimento Portland**. NBR 11768 (EB – 1763/92). Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária**. NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982. 3 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. NBR 7214. Rio de Janeiro, 1982, 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação de massa específica**. NBR NM 23. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico – Determinação da pozolanicidade**. MB 1154. Rio de Janeiro, 1991, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Coleta e preparação de amostras de materiais pozolânicos**. NBR 8952. Rio de Janeiro, 1992, 3p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da composição granulométrica dos agregados.** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1982, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de cimento Portland – Método de ensaio.** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Especificação.** NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992. 3 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento.** NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal.** NBR 5751. Rio de Janeiro, 1992, 3p.
- BORCHARDT, Ildon Guilherme; GOMES, Álvaro Ferreira. **Termometria Termoeétrica – Termopares.** Porto Alegre: SAGRA., 1979, 81 p.
- CALLEJA, J. Adiciones y cementos com adiciones. *Materiales de Construcción*, n° 190-191, Madrid, 1983, p. 25-52.
- CINCOTO, Maria Alba, AGOPYAN, Vahan e JOHN, V. M. Optimization of rice husk ash production. In: H. S. SOBRAL (ed) **Proceedings of the second international RILEM symposium.** Salvador, 1990, p. 334-342.
- CINCOTTO, Maria Alba. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção Civil **Tecnologia de Edificações**, PINI, São Paulo, 1988, p. 71-74.
- CINCOTTO, Maria Alba; KAUPATEZ, Ros Mary Zenha. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. **Tecnologia de Edificações**, PINI, São Paulo, 1988, p. 23-26.
- DAFICO, Dario de Araújo. Contribuição ao Estudo da Dosagem do Concreto de Alto Desempenho. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001, 179 p.
- DASS, Arjun. Pozzolanicite of rice husk ash. In: **CIB Congress, 9<sup>th</sup>. To build and take care of what we have built with limited resources – building materials and Components.** Stocholm, CIB 83, V. 4, 1983, P. 85-96.
- FARIAS, J. S. A.; RECENA, F. A. P. Study for Brazilian rice husk ash cement. In: H. S. SOBRAL (ed) **Proceedings of the second international RILEM symposium.** Salvador, 1990, p. 360-369.

- GAVA, Giovana Patrícia. **Estudo Comparativo de Diferentes Metodologias para a Avaliação de Atividade Pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999, 118 p.
- GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção e sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1989, 147 p.
- HOUSTON, David, F. Rice Hulls. In: **Rice: Chemistry and Technology. American Association of cereal Chemistry**. Minnessota, 1972, p. 301-352.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. – IPT. **Atividade Pozolânica: Método Chappelle Modificado**. Laboratório de química de materiais do IPT. 6 p.
- ISAIA, Geraldo Cechella. Entraves e perspectivas para o uso de elevados teores de cinza volante e cinza de casca de arroz em concreto estrutural. In: **Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil**, Workshop. USP - São Paulo, 25-26 nov.,1996. **Anais**. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997, p. 45-50.
- KLOSS, Cesar Luiz. **Materiais para Construção Civil**. 2ª edição. Curitiba: Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 1996, 228 p.
- LUXAN, N. P.; XADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. In: CEMENT and CONCRETE RESEARCH, v. 19, p. 63-68, 1989, Pergamon.
- MALHOTRA, V. M. Fly Ash, Silica Fume, and Husk Ash in Concrete: A Review. In: **Concrete International**, april, 1993, p. 23-28.
- MALHOTRA, V. M.; MEHTA, Povindar Kumar. **Pozzolanic and Cimentitious Materials**. Advances in Concrete Technology. CANMET, Ottawa, Ontario, Canada, volume 1, Gordon and Breach Publishers, 1996, 191 p.
- MEHTA, Povindar Kumar. Natural Pozzolans. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. CANMET, Canadá, 1987, p. 3-31.
- MEHTA, Povindar Kumar. Pozzolanic and cementitious byproducts as mineral admixtures for concrete – A critical Review. In: MALHOTRA, V. M. **First International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral Byproducts in Concrete**, Montebello, 1983. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1983, 2v., v. 1, p. 1-46

- MEHTA, Povindar Kumar. Pozzolanic and PITT, Norman. A new process of rice husk utilization. In: **International Conference on the Utilization of Rice By-products**, Valencia, Spain, 1974. Proceedings... Valencia: IATA, 1977, p. 45-58.
- MEHTA, Povindar Kumar. Rice husk ash – A unique supplementary cementing material. In: MALHOTRA, V. M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa, CANMET, Canadá, 1992, p. 407-432.
- MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994, 573 p.
- MOHANTY, T.K. Use of rice husk ash in the manufacture of Portland cement. **CEMENT**, N° 1, v. 8, October, 1974, p. 13-15.
- NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição. São Paulo: PINI, 1997, 828 p.
- PAZ, Mário Arlindo da Silva. **Caracterização dos agregados graúdos da Grande Florianópolis e sua utilização em concretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 1998, 146 p.
- PRUDÊNCIO Jr, Luiz Roberto; SANTOS, Sílvia. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. In: **Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil**, Workshop. USP - São Paulo, 25-26 nov.,1996. **Anais**. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997, p. 51-60.
- RAMOS,Luiz Antônio Macedo; ZARO, Milton Antônio; DIAS, Rosa Leamar de Souza. **Termopares Teoria e Prática**. Porto Alegre: MERCADO ABERTO, 1986, 112 p.
- SANTOS, Sílvia. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza da casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 1997, 111p.
- SIKA TÉCNICA, Plastificante redutor para concreto. Disponível em: <http://www.sika.com.br>.
- SILVEIRA, Adriana A.; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. In: **I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Goiânia, 16, 17 e 18 de agosto, 1995. **Anais**. Goiânia, UFG/ANTAC, 1995, p. 15-24
- SILVEIRA, Adriana Augustin.; FERREIRA, Ângela A.; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. A cinza de casca de arroz como adição mineral. In: **Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil**, Workshop. USP - São Paulo, 25-26 nov.,1996. **Anais**. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997, p. 39-44.

- SILVEIRA, Adriana Augustin.; RUARO, Paulo. **Adição de cinza de casca de arroz em concretos – Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto.** Fundamentos para o desenvolvimento de novos materiais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995, 23 p.
- SWAMY, R. N. Fly ash and slag: standards and specifications – help or hindrances? **Materials and Structures**, v. 26, 1993, p. 600-613.
- UNITED STATES PATENT. PITT, Norman. **Process for the preparation of siliceous ashes.** N° 3,959,007. May 25, 1976.
- UNITED STATES PATENT. SUGITA, Shuichi. **Method of producing active rice husk ash.** N° 5,329,867. Jul. 19, 1994.
- WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microsilica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991, 145 p.

**ANEXOS**

## **ANEXO 1**

### **Planilhas de Processamento de Dados Referentes à Combustão**

Planilha de processamento dos dados referentes à primeira tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca, em volume.

Tempo (min)	Temperaturas (°C)								Observações
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	
1	34,55	30,73	98,19	222,75	216,37	103,06	59,09	54,33	Resistências ligadas
11	52,68	42,63	79,46	132,48	209,33	105,04	58,97	53,58	Ar ligado em 25m <sup>3</sup> /h
21	44,79	39,89	52,37	53,12	129,83	105,84	58,75	54,14	Resistências desligadas
30	43,07	39,37	48,31	48,83	106,26	105,68	58,65	53,90	Resistências ligadas
43	41,84	38,88	46,51	46,81	88,06	105,42	58,61	53,60	Ar desligado
48	41,27	38,60	45,74	45,98	84,57	105,33	58,60	52,94	Ar ligado em 15m <sup>3</sup> /h
49	41,38	38,62	45,78	46,16	85,00	105,32	58,61	52,96	Ar ligado em 30m <sup>3</sup> /h
55	41,33	38,68	45,83	46,22	80,06	105,20	58,62	51,70	Ar ligado em 25m <sup>3</sup> /h
85	40,79	38,73	44,18	44,58	68,59	104,36	58,59	49,05	Resistências desligadas
185	30,73	30,79	31,23	30,91	30,81	30,93	30,49	30,32	Ar desligado
186	30,68	30,74	31,18	30,89	30,76	30,81	30,44	30,28	Resistências ligadas
209	30,77	30,46	30,94	30,79	30,71	30,67	30,29	30,24	Ar ligado em 25m <sup>3</sup> /h
217	30,89	30,44	31,04	30,95	30,94	30,97	30,46	30,44	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
226	30,95	30,46	30,97	30,95	30,95	31,09	30,68	30,72	Resistências desligadas
265	45,99	44,50	43,98	43,93	44,83	45,49	42,34	43,13	Ar regulado em 20m <sup>3</sup> /h
305	42,61	42,07	40,70	40,47	40,56	41,56	39,44	39,75	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
330	36,56	37,14	35,85	35,66	35,64	36,25	35,17	35,22	Fim do experimento

Planilha de processamento dos dados referentes à segunda tentativa de queima, utilizando 80% de cinza e 20% de casca, em volume.

Tempo (min)	Temperaturas (°C)								Observações
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	
1	22,33	22,32	22,64	22,40	22,37	22,37	22,58	22,50	Resistências ligadas
10	22,37	22,34	22,64	22,40	22,33	22,32	22,57	22,50	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
39	23,02	23,62	23,06	22,87	22,96	23,28	22,94	23,06	Ar desligado
50	23,71	24,33	23,17	23,02	23,05	23,14	23,13	23,28	Resistências desligadas
91	23,75	24,58	23,58	23,38	23,55	24,34	23,50	23,68	Resistências ligadas
131	25,36	26,89	24,49	24,25	24,50	24,99	24,72	25,03	Resistências desligadas
161	25,51	26,99	24,95	24,68	25,11	26,22	24,89	24,98	Resistências ligadas
165	25,48	26,91	24,87	24,59	24,97	26,25	24,86	24,96	Ar ligado
169	25,35	26,79	24,78	24,48	24,83	26,24	24,69	24,88	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
170	25,25	26,71	24,72	24,44	24,76	26,24	24,61	24,85	Ar desligado
178	25,61	26,90	24,58	24,39	24,59	25,93	24,67	24,91	Resistências desligadas
208	30,08	27,66	28,80	28,63	30,07	29,27	29,60	28,90	Resistências ligadas
212	29,84	27,61	29,02	28,72	30,09	29,51	29,34	28,95	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
226	29,26	27,51	29,22	28,95	30,07	30,02	28,20	28,97	Ar desligado
240	28,41	27,61	29,23	29,13	30,08	30,60	27,60	28,84	Resistências desligadas
291	27,41	28,34	29,20	29,62	30,09	32,90	28,34	28,60	Ar ligado em 15m <sup>3</sup> /h
314	28,27	28,52	31,06	30,36	30,09	32,11	30,84	28,73	Ar regulado em 20m <sup>3</sup> /h
317	28,14	28,60	31,13	30,46	30,06	32,06	30,64	28,70	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
330	27,13	28,22	31,74	30,99	30,01	29,95	31,59	29,29	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
336	26,94	28,33	31,92	31,29	29,99	29,48	31,61	29,52	Ar regulado em 20m <sup>3</sup> /h
357	27,35	28,79	32,85	32,13	30,02	29,68	39,09	29,11	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
382	26,87	28,96	36,64	34,31	30,06	29,88	44,82	28,75	Ar regulado em 25m <sup>3</sup> /h
404	26,67	29,09	45,35	51,60	29,99	29,55	41,44	28,51	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
427	26,98	28,59	58,28	65,24	29,80	27,10	53,57	35,49	Resistências ligadas
428	26,95	28,57	58,79	65,64	29,82	27,01	53,49	36,07	Ar desligado
444	26,88	28,93	63,32	70,25	29,74	27,43	49,85	36,84	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
466	27,61	29,14	66,48	73,92	29,65	31,36	48,36	35,10	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
482	28,61	28,85	69,85	76,80	29,55	27,97	52,13	39,95	Resistências desligadas
789	467,17	190,02	382,00	390,04	117,40	485,92	141,25	526,55	Presença de fumaça

793	471,33	189,10	375,49	377,83	121,63	469,40	140,63	531,51	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
795	451,76	187,55	371,37	372,07	123,55	476,09	141,22	591,74	Resistências ligadas
798	402,31	183,74	362,38	362,90	127,57	492,89	141,65	595,46	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
799	390,01	182,69	359,27	359,51	128,87	496,46	141,39	590,02	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
805	324,05	177,70	340,76	334,95	138,07	520,01	137,93	520,68	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
806	309,28	176,80	336,64	330,27	139,93	524,31	137,34	511,02	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
807	296,32	175,93	331,11	324,57	141,68	526,30	136,47	499,93	Resistências desligadas
817	362,29	180,03	301,31	273,71	149,85	472,50	129,43	431,94	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
822	348,21	176,84	300,92	266,47	158,08	511,35	131,83	460,93	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
825	307,53	174,56	294,50	261,32	163,72	525,15	131,52	451,42	Resistências ligadas
837	226,57	168,22	259,58	225,13	182,97	534,87	123,93	409,19	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
855	450,08	177,65	257,51	192,92	195,16	439,00	130,43	433,10	Resistências desligadas
886	313,06	174,38	260,30	193,20	231,75	418,75	135,69	461,17	Resistências ligadas
888	302,71	174,02	256,94	192,10	234,73	419,23	135,64	462,66	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
889	297,74	173,67	255,63	192,03	236,28	432,30	135,77	484,46	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
918	223,15	162,77	192,06	161,65	288,74	542,51	128,65	461,20	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
940	240,86	163,95	179,14	153,61	322,76	459,44	127,11	415,92	Resistências desligadas
1188	581,80	196,60	127,66	125,27	706,28	676,59	121,70	385,14	Ar desligado
1500	182,74	164,58	78,90	78,78	491,96	526,05	80,86	232,02	Fim do experimento

Planilha de processamento dos dados referentes à terceira tentativa de queima, utilizando 50% de cinza e 50% de casca, em volume.

Tempo (min)	Temperaturas (°C)								Observações
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	
1	25,78	24,84	30,69	27,00	26,62	23,08	25,95	26,61	Resistências ligadas
30	25,52	24,70	31,31	27,09	26,60	24,04	25,90	26,36	Ar ligado
60	25,49	24,31	32,54	27,20	26,41	19,65	25,96	26,34	Resistências desligadas
90	25,59	23,95	31,22	27,28	26,24	14,41	26,38	25,96	Resistências ligadas
150	25,20	23,40	28,45	27,48	25,69	13,16	26,71	24,18	Resistências desligadas
200	24,70	23,22	26,88	27,43	25,39	14,68	26,38	23,93	Resistências ligadas
260	24,32	23,24	25,67	27,21	24,41	15,98	25,82	22,88	Resistências desligadas
261	24,32	23,24	25,65	27,21	24,40	16,00	25,81	22,87	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
643	21,63	23,77	20,76	23,98	21,18	15,97	22,56	19,85	Resistências ligadas
644	21,66	23,77	20,74	24,00	21,18	15,98	22,57	19,87	Ar regulado em 20m <sup>3</sup> /h
749	21,25	23,25	20,22	22,81	20,52	15,26	22,14	19,92	Resistências desligadas
750	21,23	23,24	20,22	22,80	20,49	15,25	22,13	19,89	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
755	21,15	23,23	20,18	22,75	20,45	15,23	22,09	19,80	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
780	21,46	23,24	20,14	22,49	20,46	15,51	22,28	20,54	Resistências ligadas
900	22,10	26,60	20,51	21,62	20,21	28,12	22,61	22,25	Resistências desligadas
964	22,79	42,85	20,74	21,34	27,11	80,99	22,95	22,78	Resistências ligadas
967	22,83	43,43	20,74	21,34	28,37	80,89	22,98	22,84	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
985	23,02	43,95	20,82	21,29	31,82	83,85	23,08	22,88	Faltou ar
987	22,96	44,10	20,82	21,28	32,12	83,97	23,08	22,91	Ar ligado em 15m <sup>3</sup> /h
991	23,08	43,86	20,84	21,28	31,85	82,66	23,11	22,94	Faltou ar
992	23,02	43,68	20,86	21,29	31,70	82,26	23,12	22,94	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
997	23,14	43,81	20,85	21,27	32,21	82,96	23,13	22,92	Faltou ar
998	23,07	44,19	20,85	21,24	32,50	82,98	23,13	22,91	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
1001	23,23	45,87	20,85	21,25	33,35	82,05	23,15	22,93	Faltou ar
1002	23,33	46,45	20,85	21,25	33,59	81,96	23,17	22,93	Ar ligado em 5m <sup>3</sup> /h
1085	25,09	62,98	21,23	21,30	56,08	103,37	23,94	24,39	Resistências desligadas
1170	31,98	70,26	25,96	21,57	65,55	192,16	25,33	29,50	Resistências ligadas
1171	32,06	70,36	26,02	21,59	65,55	193,33	25,34	29,56	Presença de fumaça

1184	31,97	58,48	35,85	21,61	59,23	210,12	25,32	28,60	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
1185	31,83	57,66	36,10	21,63	58,47	213,19	25,30	28,42	Muita fumaça
1188	31,52	55,82	36,65	21,62	56,29	232,18	25,25	27,88	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
1199	30,87	57,86	36,50	21,55	51,08	348,65	25,31	27,61	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
1399	31,01	186,64	33,42	29,22	54,86	412,86	34,75	34,67	Resistências desligadas
1400	31,03	185,84	33,46	29,30	55,26	412,33	34,81	34,71	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
1411	31,13	211,60	33,95	30,21	57,71	532,75	35,43	34,77	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
1421	30,94	252,63	34,35	31,60	59,07	627,62	35,99	34,26	Ar regulado em 25m <sup>3</sup> /h
1532	59,90	274,42	66,67	50,34	73,74	800,30	47,73	73,28	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
1641	293,67	245,46	80,13	63,15	212,32	696,44	59,89	285,97	Resistências ligadas
1642	289,20	245,07	80,63	63,40	215,15	694,21	60,24	286,17	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
1708	258,91	267,53	104,05	86,60	371,53	801,70	411,86	316,58	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
1716	244,98	260,36	106,52	90,95	355,23	762,88	393,78	310,68	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
1724	250,04	263,63	105,21	91,97	345,11	801,18	421,11	314,11	Ar regulado em 25m <sup>3</sup> /h
1807	450,10	294,31	175,62	168,04	316,97	921,18	532,12	339,26	Resistências desligadas
1810	473,25	295,06	182,01	179,26	315,79	918,55	518,58	340,06	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
1818	402,14	292,02	170,38	164,20	320,35	864,07	453,75	332,27	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
2182	263,97	226,55	129,01	126,99	492,29	661,69	194,13	267,73	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
2250	514,17	260,44	136,60	128,99	528,50	901,39	203,88	360,50	Resistências ligadas
2316	655,52	286,59	139,01	129,98	598,63	931,10	155,24	544,34	Faltou ar
2435	437,89	318,69	138,47	135,46	658,01	758,42	142,55	484,75	Resistências desligadas
2485	592,88	289,89	126,79	118,26	668,89	803,47	131,18	666,94	Faltou ar
2500	620,54	292,67	126,30	118,19	675,49	809,29	130,72	684,91	Ar ligado em 20m <sup>3</sup> /h
2620	522,74	300,71	122,96	116,65	696,60	776,19	124,26	649,71	Resistências ligadas
2799	365,43	373,78	107,15	101,74	767,15	786,94	102,73	573,61	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
2800	364,13	374,84	107,21	101,81	767,23	787,03	102,66	576,17	Resistências desligadas
3139	114,71	201,05	86,77	82,41	708,44	710,18	75,78	223,75	Ar regulado em 25m <sup>3</sup> /h
3145	114,66	199,48	88,01	84,88	706,34	700,17	76,48	232,70	Faltou ar
3159	118,01	202,39	92,12	87,37	697,26	670,21	81,55	283,05	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h
3237	97,91	158,15	80,41	76,45	680,93	703,84	70,84	205,76	Ar regulado em 25m <sup>3</sup> /h
3300	91,32	142,43	79,58	77,17	661,67	644,70	69,50	215,03	Ar regulado em 20m <sup>3</sup> /h
3360	86,67	135,80	77,76	74,46	637,40	592,76	68,85	226,86	Ar regulado em 15m <sup>3</sup> /h
3420	81,99	128,85	75,42	71,37	617,23	569,11	66,61	225,01	Ar regulado em 10m <sup>3</sup> /h
3720	73,67	108,67	66,99	65,11	530,48	446,40	62,01	204,86	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
3780	72,52	103,06	63,98	61,39	513,30	434,17	59,53	194,34	Ar regulado em 30m <sup>3</sup> /h

4184	36,95	49,20	45,86	44,14	467,45	382,84	39,92	84,81	Ar regulado em 5m <sup>3</sup> /h
4200	37,09	49,85	48,00	46,59	487,05	381,13	42,33	96,25	Janela aberta
4320	40,33	60,20	46,91	44,88	428,55	338,47	42,61	139,92	Fim do experimento

## **ANEXO 2**

### **Análise Química das Cinzas de Casca de Arroz**

## Análise química da cinza de casca de arroz “in natura”

Análise Química							
Ensaio	2 h	4 h	6 h	12 h	18 h	24 h	Unidade
SiO <sub>2</sub>	79,15	79,47	80,11	79,05	79,28	78,33	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	0,81	0,38	0,89	0,58	0,38	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	%
CaO	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,15	%
MgO	0,05	0,02	0,07	0,00	0,06	0,20	%
K <sub>2</sub> O	0,47	0,44	0,50	0,46	0,43	0,59	%
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,18	%
Resíduo insolúvel	80,47	80,40	80,55	79,83	80,10	79,70	%
Perda ao fogo	17,55	17,72	17,33	18,01	18,14	18,67	%

## Análise química da cinza de casca de arroz modificada

Análise Química							
Ensaio	2 h	4 h	6 h	12 h	18 h	24 h	Unidade
SiO <sub>2</sub>	95,20	95,19	94,57	95,33	94,72	94,11	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,56	0,34	0,93	0,00	0,46	0,64	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,07	0,02	0,02	0,21	0,10	%
CaO	0,07	0,07	0,11	0,07	0,10	0,10	%
MgO	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	%
K <sub>2</sub> O	0,58	0,61	0,56	0,60	0,58	0,62	%
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%
Resíduo insolúvel	95,69	95,70	95,86	95,66	95,51	95,29	%
Perda ao fogo	2,16	2,30	2,30	2,69	2,51	3,01	%

## **ANEXO 3**

### **Planilha de Resistência Potencial do Índice de Atividade Pozolânica com Cimento**

Para obter o valor do índice de atividade pozolânico com cimento, utilizou-se o seguinte critério: foi calculada a média dos dois valores mais baixos. Se o valor mais alto fosse superior a este valor médio majorado em 10%, adotava-se o valor mais alto, caso contrário, adotava-se a média dos três corpos-de-prova, pois está sendo avaliada a resistência potencial.

Resistência potencial do índice de atividade pozolânica com cimento para cinza de casca de arroz “in natura” aos 28 dias.

Argamassa	Amostra	Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (Kn)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	IAP (%)
Referência	1	5,01	19,71	92,46	46,90	43,43	---
	2	5,03	19,87	79,86	40,19		
	3	5,04	19,95	86,16	43,19		
2h	1	5,01	19,71	69,08	35,04	35,68	82,16
	2	5,00	19,63	69,54	35,42		
	3	5,01	19,71	72,12	36,58		
4h	1	5,00	19,63	54,40	27,71	35,91	82,68
	2	5,00	19,63	70,50	35,91		
	3	5,00	19,63	54,06	27,53		
6h	1	5,00	19,63	67,22	34,23	34,42	79,25
	2	5,00	19,63	73,22	37,29		
	3	5,00	19,63	62,32	31,74		
12h	1	5,00	19,63	67,28	34,27	36,69	84,48
	2	5,00	19,63	72,26	36,80		
	3	5,00	19,63	76,56	38,99		
18h	1	5,00	19,63	73,50	37,43	35,48	81,69
	2	5,00	19,63	66,28	33,76		
	3	5,00	19,63	69,20	35,24		
24h	1	5,00	19,63	71,30	36,31	40,09	92,31
	2	5,00	19,63	78,72	40,09		
	3	5,00	19,63	59,46	30,28		

Resistência potencial do índice de atividade pozolânica com cimento para cinza de casca de arroz modificada aos 28 dias.

Argamassa	Amostra	Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (Kn)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	IAP (%)
Referência	1	5,01	19,71	92,46	46,90	43,43	---
	2	5,03	19,87	79,86	40,19		
	3	5,04	19,95	86,16	43,19		
CCA Modificada 2h	1	5,01	19,71	69,72	35,37	35,72	82,25
	2	4,99	19,56	71,74	36,68		
	3	5,01	19,71	69,24	35,12		
4h	1	5,01	19,71	40,26	20,42	35,89	82,64
	2	5,02	19,79	56,00	28,29		
	3	5,01	19,71	70,76	35,89		
6h	1	5,01	19,71	66,48	33,72	40,51	93,28
	2	5,00	19,63	78,80	40,13		
	3	4,99	19,56	79,94	40,88		
12h	1	5,00	19,63	70,58	35,95	39,85	91,76
	2	5,00	19,63	78,24	39,85		
	3	4,99	19,56	61,86	31,63		
18h	1	5,00	19,63	85,24	43,41	44,08	101,50
	2	5,02	19,79	89,56	45,25		
	3	5,02	19,79	86,24	43,57		
24h	1	5,00	19,63	63,90	35,54	42,90	98,78
	2	5,01	19,71	84,58	42,90		
	3	5,01	19,71	62,04	31,47		