

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO DE POZOLANA COM BAIXO
TEOR DE CARBONO OBTIDA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ
RESIDUAL PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Sílvia Santos

Orientador Profº Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis (SC), abril de 2006.

Sílvia Santos

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO DE POZOLANA COM BAIXO
TEOR DE CARBONO OBTIDA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ
RESIDUAL PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

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

Florianópolis (SC)

2006

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO DE POZOLANA COM BAIXO
TEOR DE CARBONO OBTIDA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ
RESIDUAL PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Sílvia Santos

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Professor Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior

SANTOS, Sílvia. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Florianópolis, 2006, 267f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof^o Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior

Data da defesa: 07/04/2006

Os benefícios da utilização da cinza de casca de arroz como adição pozolânica em argamassas e concretos têm sido amplamente discutidos e divulgados por diversos pesquisadores nas últimas décadas. Entretanto, ao contrário de outras pozolanas, a utilização da cinza de casca de arroz não alcançou o mesmo sucesso comercial. A barreira imposta pelo mercado consumidor está relacionada, em parte, à coloração escura (preta) que o material confere aos produtos à base de cimento Portland com ele confeccionados. Isto se deve ao elevado teor de carbono presente na cinza de casca de arroz residual. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi viabilizar a fabricação e utilização de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para a produção de concreto de alto desempenho. Para a retirada do carbono empregou-se um sistema industrial desenvolvido em parceria com uma indústria local. O sistema é constituído por um forno rotativo contínuo capaz de reduzir o teor de carbono da cinza de casca de arroz residual pela requeima do material sob condições controladas de temperatura e tempo de retenção do material no interior do forno. Foram consideradas 4 temperaturas, 3 tempos de retenção e 2 condições de moagem. Uma avaliação estatística, com base em resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa, moldados com as diferentes cinzas produzidas, permitiu classificar os materiais sob o ponto de vista técnico. Coube a empresa, em função de fatores como consumo energético e facilidade na manutenção da temperatura do sistema, selecionar o material que seria produzido em escala. Com o material selecionado produziu-se concreto de alto desempenho. Além da resistência mecânica, o material foi avaliado quanto a aspectos relativos à durabilidade: comportamento frente ao ataque por sulfatos e reação álcali-agregado. Os concretos com cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono selecionada apresentaram resultados compatíveis aos concretos produzidos com sílica ativa e superiores aos concretos de referência (sem adição pozolânica), tanto com relação à resistência mecânica como no comportamento frente ao ataque por sulfatos. Com relação à reação álcali-agregado, a exemplo da sílica ativa, o material foi considerado inócuo. Finalmente, as evidências experimentais corroboram a viabilidade da produção de um material com reduzidos teores de carbono e boa reatividade, obtido a partir da cinza de casca de arroz residual, capaz de ser utilizado comercialmente para a produção de concretos de alto desempenho.

Palavras-chave: pozolana, cinza de casca de arroz residual, concreto de alto desempenho, durabilidade.



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Tese defendida e aprovada em 07 de abril de 2006, pela comissão examinadora:

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

Prof^o Dr. Geraldo Cechella Isaia – UFSM

Prof^a Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin – UFRGS

Prof^a Dra. Janaíde Cavalcante Rocha – UFSC

Prof^o Dr. Philippe Jean Paul Gleize - UFSC

Prof^o Dr. Wellington Longuini Repette - UFSC

*Àqueles que sempre acreditaram:
meus pais, Valmor e Santilha, minha
irmã adorada, Silvana e minha
prima do coração, Ana Rosa.*

*“Caminhante, não há caminho, o
caminho se faz ao andar.*

*Ao andar se faz o caminho e
ao olhar para trás, se vê a senda
que nunca vai se voltar a trilhar.*

*Caminhante, não há caminho,
somente estrelas do mar”.*

(Antônio Machado)

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de pesquisa, em especial quando se trata de um trabalho experimental, nunca se faz sozinho, de forma isolada. Sempre há aquelas pessoas e instituições que, de uma forma ou de outra se tornam fundamentais e indispensáveis à sua realização. Agora, ao olhar para traz, é gratificante lembrar de tantas pessoas engajadas e determinadas a colaborar para o êxito deste trabalho.

Acima de tudo, sou grata a Deus pela vida e pela coragem que sempre me acompanha a cada novo desafio, pela família que recebi e pelos amigos que colocou em meu caminho.

À minha família, pelos valores que me foram passados, pela confiança, carinho e apoio incondicionais ao longo de todos os meus anos de estudo e, de forma especial, neste longo período de realização do doutorado.

Ao orientador, Professor Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr, pela dedicação, seriedade, competência e incentivo demonstrado antes e durante a realização deste trabalho.

À Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda pela parceria e confiança que tornaram viáveis a realização deste estudo.

À Polimix Concreto Ltda, à Degussa *Chemical Construction*®, à Companhia de Cimento Itambé® e à Votorantin Cimentos®, pela doação de material e realização de ensaios de caracterização de alguns materiais utilizados na pesquisa.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições tanto no exame de qualificação quanto na defesa da Tese.

Ao coordenador do curso de Engenharia Civil da Fundação Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Professor Luís Fernando Pedrosa Sales, acima de tudo, um amigo.

Aos colegas de trabalho da UNIVALI, em especial aos Professores André Matte Sagave Andriei José Beber. Sem a disponibilidade, o apoio, as idéias e o carinho de vocês eu teria esmorecido.

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia da Construção Civil - LATEC/UNIVALI, Reinaldo Ramos Furtado Filho e Cláudio Alfredo Galvez e aos bolsistas Adelchi César Cecchinell, André Capri Bigarela, Dayse Christiane Pereira,

Larissa Dadan, Rafael Fabris Ranieri Dadan e Vanessa Borges pelo apoio e ajuda irrestritos durante a fase experimental da pesquisa.

Aos funcionários e colegas do Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar - CTTMar/UNIVALI, Maicon Ramos Furtado, Maria Onete Vitorino dos Santos, Marcelo Máximo, Romélia de Souza Agostinho e Thaís Simas Machado, pelo apoio, compreensão e pela infra-estrutura sempre à disposição.

Aos colegas do GTec/UFSC, em especial às amigas Juliana Machado Casali e Giovanna Patrícia Gava, pelo suporte logístico, pelas discussões técnicas, pelo trabalho braçal e, principalmente, pelas muitas viagens e gargalhadas durante todo o período de nossa convivência.

As amigas, engenheiras, Byanca Amorim, Sabrina Robeck e Silviane Cristina Cervi e suas respectivas famílias, por vezes também *minhas famílias*, pela amizade, pela companhia, pela confiança, pelo carinho, pela preocupação e pelo cuidado nos momentos bons e naqueles mais delicados.

As amigas e irmãs, Cínara Kleinhempel, Márica Réus e Valdirene Corrêa, ao meu lado em todos os momentos, sempre com uma palavra de esperança, um olhar carinhoso, uma prece.

E a todos aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho, muito obrigada.

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XVII
RESUMO	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Problema e relevância da pesquisa	1
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Geral	10
1.2.2 Específicos	10
1.3 Organização do Trabalho.....	11
2. DURABILIDADE DO CONCRETO	12
2.1 Terminologia.....	12
2.1.1 Pozolanas.....	12
2.1.2 Adições Minerais.....	12
2.2 Aspectos Gerais.....	12
2.3 Degradação do Concreto.....	14
2.4 A Importância do Uso das Pozolanas no Concreto	16
2.5 O Ataque por Sulfatos.....	18
2.5.1 As pozolanas e o ataque por sulfatos	24
2.5.2 Determinação da resistência ao ataque por sulfatos.....	26
2.6 Reação Álcali-Agregado - RAA.....	29
2.6.1 As pozolanas e a reação álcali-agregado.....	32
2.6.2 Determinação da reação álcali-agregado.....	35
3. CINZA DE CASCA DE ARROZ	39
3.1 Terminologia.....	39
3.1.1 Cinza de casca de arroz	39
3.1.2 Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono.....	39
3.2 Considerações iniciais e características.....	39

3.3	Processos de obtenção da CCA	42
3.4	Obtenção da CCA com baixo teor de carbono	44
3.5	Métodos para Determinação da Reatividade.....	60
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1	Programa Experimental	67
4.2	Materiais Utilizados	69
4.3	1ª Etapa: Determinação das condições de queima.....	71
4.4	Determinação do teor de carbono	81
4.5	Determinação da granulometria e massa específica	81
4.6	Determinação da reatividade do material.....	81
4.7	Determinação da melhor CCA.....	85
4.8	2ª Etapa: Produção de CAD com CCA de baixo teor de carbono	88
4.9	Investigação do Concreto Submetido ao ataque por Sulfatos.....	91
4.9.1	Preparação dos concretos	91
4.9.2	Cura em solução agressiva de sulfato de sódio	92
4.9.3	Avaliação da expansibilidade dos concretos.....	93
4.9.4	Avaliação da resistência à flexão dos concretos	96
4.10	Investigação do Concreto Submetido à RAA.....	97
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	100
5.1	Avaliação do teor de carbono	100
5.2	Avaliação da granulometria e massa específica.....	101
5.3	Avaliação da reatividade do material.....	103
5.4	Seleção do melhor material	111
5.5	Caracterização do material selecionado.....	118
5.6	Avaliação colorimétrica	121
5.7	Índice de atividade pozolânica com cimento.....	123
5.8	Expansibilidade a quente.....	125
5.9	Fluidificação da pasta frente ao uso de aditivo redutor de água - superplastificante	125
5.10	Resistência mecânica dos concretos.....	128
5.11	Avaliação dos concretos submetidos ao ataque por sulfatos	131

5.12 Avaliação da CCA com baixo teor de carbono na redução da reação álcali-agregado	143
5.13 Sobre a produção em escala da CCA com baixo teor de carbono	147
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
6.1 Em relação aos objetivos do trabalho.....	150
6.2 Sugestões para novos trabalhos.....	151
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Depósito clandestino de CCA – Criciúma, sul de Santa Catarina (Fonte: SANTOS, 1997).....	4
Figura 1.2 – Consumo de cimento das concreteiras por região do Brasil, em mil toneladas, em 2004. (Fonte: SNIC, 2005).....	6
Figura 2.2: Fissura Tipo mapa em bloco de fundação (Fonte: Revista RECUPERAR nº65).....	35
Figura 2.3: Método químico - Classificação da potencialidade do agregado (Fonte: NBR 9774/1987).....	37
Figura 3.1 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz (Fonte: DAFICO, 2001).....	40
Figura 3.3 – Difração de Raios-X das cinzas obtidas com tratamento ácido – (1) 1 N HCl; (2) 3 N HCl; (3) 5 N HCl e (4) CCA não tratada (Fonte: CHAKRAVERTY <i>et al.</i> ,1988).	49
Figura 3.4 – Diagrama esquemático do sistema de queima patenteado por Sugita (1992).	50
Figura 3.5 – Diagrama esquemático do método dos dois passos (Fonte: SUGITA, 1992).....	51
Figura 3.6 – Fornalha de leito fixo usada para queima de casca de arroz (Fonte: DAFICO, 2001).	53
Figura 3.7 – (a) Primeira etapa e (b) segunda etapa de queima da casca de arroz em leito fixo (Fonte: DAFICO, 2001).	54
Figura 3.8 – Corte vertical da câmara de combustão da fornalha: I, II, III e IV – tubos injetores de ar; 1, 2, 3, 4 e 5 - termopares (Fonte: DAFICO, 2001).	54
Figura 3.9 – Temperaturas medidas pelos termopares (Fonte: DAFICO, 2001).	55
Figura 3.10 – Vista geral do forno piloto de Weber (2001): (a) Vista geral do Forno (b) Depósito da cinza após a queima, destacando a localização das resistências blindadas.	

(c) Detalhe da grelha deslizante e (d) Vista interna do forno, mostrando a tubulação de ar comprimido.	56
Figura 3.11 – Variação de temperatura no interior do forno piloto, para uma mistura de 50% de casca crua e 50% de CCA residual (Fonte: WEBER, 2001).	57
Figura 3.12 – Croqui do forno rotativo idealizado	58
Figura 3.13 – Desenho esquemático do forno rotativo idealizado.....	58
Figura 3.14 – Protótipo do forno rotativo idealizado (a) vista externa; (b) vista do fundo; (c) detalhe do revestimento interno com material refratário.	59
Figura 3.15 – Resistência das argamassas contendo diferentes teores de CCA (Adaptado de SANTOS, 1997)	65
Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental.....	68
Figura 4.2 – Queimador compacto tipo “Biocham”	72
Figura 4.3 – (a) Difratoograma de raios – X da CCA bruta; (b) Ilustraçãoi da identificação dos fases com o programa Philips Identify.....	74
Figura 4.4 – Posicionamento dos termopares no interior do forno – (T1) temperatura do forno; (T2) temperatura do fluxo de ar; (T3) temperatura do material; (T4) temperatura na descarga.	77
Figura 4.5 – Controle da temperatura da CCA 500/80/1	78
Figura 4.6 – Difratoograma de Raios-X das CCA’s produzidas sob diferentes temperaturas	80
Figura 4.7 – Equipamento para ensaio de Cone de Kantro.....	87
Figura 4.8 - Concreto com CCA, a/c = 0,4	90
Figura 4.9 – Fatias de concreto para avaliação do ataque por sulfato	91
Figura 4.10 – Elongômetro utilizado para as medidas de expansão por ataque de sulfatos	93
Figura 4.11 – Fatia de concreto preparada para o ensaio de expansão por ataque de sulfatos	94
Figura 4.12 – Medida de expansão dos concretos submetidos ao ataque por sulfatos ..	94

Figura 4.13 – Representação esquemática do ensaio de resistência à flexão (Fonte: PRUDÊNCIO Jr, 1993)	96
Figura 4.14 – Amostra preparada para o ensaio de ensaio de resistência à flexão	96
Figura 4.15 – Argamassa de referência, no dia da desmoldagem.....	98
Figura 4.16 – Argamassa com CCA no dia da desmoldagem	98
Figura 4.17 – Argamassa com SA no dia da desmoldagem.....	98
Figura 4.18 – Retirada das barras do tanque para leitura inicial.....	99
Figura 4.19 – Medida da barra realizada no conjunto suporte e relógio comparador digital	99
Figura 5.1 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa de referência, para o aditivo N	106
Figura 5.2 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa de referência, para o aditivo P	106
sílica ativa, aditivo N.....	107
Figura 5.3 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo N.....	107
Figura 5.4 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo M	108
Figura 5.5 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo P.....	108
Figura 5.6 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo N.....	109
Figura 5.7 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo M.....	110
Figura 5.8 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo P	110
Figura 5.9 – Difratoograma de raios-X da CCA selecionada	121
Figura 5.10 – Cor da CCA selecionada em relação às amostras de referência.....	122

Figura 5.11 – Pozolanicidade com cimento: NBR 5752/1992 e ensaio adaptado	124
Figura 5.12 – Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teores utilizados para a produção das argamassas.....	126
Figura 5.13 – Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teor mínimo indicado pelo fabricante.....	127
Figura 5.14 – Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teor máximo indicado pelo fabricante.....	127
Figura 5.15 – Desenvolvimento de resistência à compressão axial dos concretos ao longo do tempo.....	129
Figura 5.16 – Padrão de ruptura das fatias de concreto	132
Figura 5.17 – Comportamento dos concretos curados em hidróxido de cálcio, ao longo do tempo.....	133
Figura 5.18 – Amostras do concreto com CCA, curadas em solução de hidróxido de cálcio: (a) início do ensaio; (b) 180 dias de ensaio	134
Figura 5.19 – Comportamento dos concretos curados em sulfato de sódio.....	134
Figura 5.20 – Amostras do concreto de referência, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a) 15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio: detalhe da degradação observada	138
Figura 5.21 – Amostras do concreto com CCA, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a)15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio.....	139
Figura 5.22 – Amostras do concreto com SA, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a) 15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio.....	139
Figura 5.23 – Expansão dos concretos curados na solução de hidróxido de cálcio.....	140
Figura 5.24 – Expansão dos concretos submetidos ao ataque por sulfato de sódio.....	141
Figura 5.25 – Medidas de expansão para avaliação potencial da RAA	143
Figura 5.26 – (a) Barras da argamassa de referência aos 30 dias de ensaio; (b) detalhe da fissura em uma das barras	144
Figura 5.27 – (a) Barras da argamassa com sílica ativa; (b) Barras da argamassa com cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola.....	2
Tabela 1.2 – Disponibilidade de cinza: safra 2004/2005.	3
Tabela 2.1 – Características dos principais tipos de sais selenitosos	20
Tabela 3.1 – Efeito do tratamento ácido sobre a temperatura e tempo de exposição, necessários para produção de CCA branca amorfa.....	48
Tabela 3.2 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade (LÚXAN, 1989)	63
Tabela 4.1 - Caracterização do agregado miúdo (NBR 7211/1983).....	69
Tabela 4.2 – Caracterização do agregado graúdo	70
Tabela 4.3 – Caracterização do cimento (ANEXO 1).....	70
Tabela 4.4 – Caracterização dos aditivos redutores de água.....	71
Tabela 4.5 - Caracterização da sílica ativa.....	71
Tabela 4.6 – Caracterização da CCA bruta	73
Tabela 4.7 – Picos principais da difração de raios-X – CCA bruta	73
Tabela 4.8 – Requeima do material em laboratório	75
Tabela 4.9 – Programa de produção da cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono.....	76
Tabela 4.10 – Temperatura média de requeima para as diferentes condições de produção.....	78
Tabela 4.11 – Picos principais da difração de raios-X.....	79
Tabela 4.12 – Argamassa de referência	84
Tabela 4.13 – Argamassa com sílica ativa	84
Tabela 4.14 – Argamassa com CCA bruta, pré-moagem 1h.....	84
Tabela 4.15 – Argamassa com CCA bruta, pré-moagem 2h.....	85
Tabela 4.16 – Quantidade de material para 1m ³ de concreto.....	89

Tabela 5.1 – Perda ao fogo das diferentes CCA´s.....	100
Tabela 5.2 – Massa específica e tamanho das partículas.	102
Tabela 5.3 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 1h	104
Tabela 5.4 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 1h+3.....	104
Tabela 5.5 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 2h+3.....	105
Tabela 5.6 – Análise Aditivo N.....	112
Tabela 5.7 – Análise Aditivo M.....	112
Tabela 5.8 – Análise Aditivo P	113
Tabela 5.9 – Análise tempo de retenção 40 minutos.....	114
Tabela 5.10 – Análise tempo de retenção 60 minutos.....	114
Tabela 5.11 – Análise tempo de retenção 80 minutos.....	115
Tabela 5.12 – Classificação geral das argamassas em função da temperatura.	116
Tabela 5.13 – Classificação geral das argamassas em função dos aditivos.	116
Tabela 5.14 – Características das CCA´s selecionadas.....	117
Tabela 5.15 – Caracterização da cinza selecionada e produzida em escala.....	119
Tabela 5.16 – Caracterização da cinza selecionada e produzida em escala.....	120
Tabela 5.17 – Parâmetros colorimétricos médios das CCA´s e cimentos.....	121
Tabela 5.18 – Reatividade com cimento e classificação da CCA como pozolana.....	123
Tabela 5.19 – Expansibilidade à quente da CCA selecionada	125
Tabela 5.20 – Área de espalhamento das pastas com aditivo superplastificante	126
Tabela 5.21 – Resistência média à compressão axial dos concretos.....	129
Tabela 5.22 – Carga de ruptura dos concretos – ensaio dos quatro pontos.....	132
Tabela 5.23 – Expansões observadas ao longo do tempo	140
Tabela 5.24 Reatividade potencial das diferentes argamassas avaliadas.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CCA	Cinza de casca de arroz
CCA bruta	Cinza de casca de arroz residual, com elevado teor de carbono
CCA's	Cinzas de casca de arroz
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
FATMA	Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente
ABESC	Associação Brasileira das empresas de Serviços de Concretagem
CAD	Concreto de alto desempenho
GTec	Grupo de Tecnologia de Produtos à Base de Cimento Portland
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNIVALI	Fundação Universidade do Vale do Itajaí
NORIE	Núcleo Orientado pra Inovação da Edificação
LAPROM	Laboratório de Procesamento Mineral
LATEC	Laboratório de Tecnologia de Construção Civil
CT	Centro de Tecnologia
CTTMar	Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar
γ pozolana	Massa específica da pozolana
γ cal	Massa específica da cal

RESUMO

Os benefícios da utilização da cinza de casca de arroz como adição pozolânica em argamassas e concretos têm sido amplamente discutidos e divulgados por diversos pesquisadores nas últimas décadas. Entretanto, ao contrário de outras pozolanas, a utilização da cinza de casca de arroz não alcançou o mesmo sucesso comercial. A barreira imposta pelo mercado consumidor está relacionada, em parte, à coloração escura (preta) que o material confere aos produtos à base de cimento Portland com ele confeccionados. Isto se deve ao elevado teor de carbono presente na cinza de casca de arroz residual. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi viabilizar a fabricação e utilização de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para a produção de concreto de alto desempenho. Para a retirada do carbono empregou-se um sistema industrial desenvolvido em parceria com uma indústria local. O sistema é constituído por um forno rotativo contínuo capaz de reduzir o teor de carbono da cinza de casca de arroz residual pela requeima do material sob condições controladas de temperatura e tempo de retenção do material no interior do forno. Foram consideradas 4 temperaturas, 3 tempos de retenção e 2 condições de moagem. Uma avaliação estatística, com base em resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa, moldados com as diferentes cinzas produzidas, permitiu classificar os materiais sob o ponto de vista técnico. Coube a empresa, em função de fatores como consumo energético e facilidade na manutenção da temperatura do sistema, selecionar o material que seria produzido em escala. Com o material selecionado produziu-se concreto de alto desempenho. Além da resistência mecânica, o material foi avaliado quanto a aspectos relativos à durabilidade: comportamento frente ao ataque por sulfatos e reação álcali-agregado. Os concretos com cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono selecionada apresentaram resultados compatíveis aos concretos produzidos com sílica ativa e superiores aos concretos de referência (sem adição pozolânica), tanto com relação à resistência mecânica como no comportamento frente ao ataque por sulfatos. Com relação à reação álcali-agregado, a exemplo da sílica ativa, o material foi considerado inócuo. Finalmente, as evidências experimentais corroboram a viabilidade da produção de um material com reduzidos teores de carbono e boa reatividade, obtido a partir da cinza de casca de arroz residual, capaz de ser utilizado comercialmente para a produção de concretos de alto desempenho.

ABSTRACT

The benefits of using rice husk ash for pozzolanic addition in mortar and concretes have been widely discussed and spread by several researchers during the last decades. Meanwhile, in opposition to other types of pozzolans, the use of rice husk ash did not have the same market acceptance. The commercial barrier imposed by consumers is partly related to the black colour that this substance inflicts on Portland cement based products. This colour results from the high carbon content present in the rice husk ash. In consequence, this study aims to elaborate and apply low carbon content pozzolan obtained from residual rice husk ash to produce high-performance concrete. Carbon removal was possible due to the development of an industrial system coordinated with a local plant. The system consists of a continually rotating furnace that reduces the high carbon content present in the residual husk ash through reburning the material under controlled temperature and time conditions inside the furnace. Four different temperature levels were considered, three in-furnace retention periods and two milling conditions. Statistical evaluation made it possible to classify materials from the technical viewpoint. This statistical evaluation was based on the mortar specimens compression results. The specimens were molded from various ashes produced. Then, the company had to select the best resulting material for scale production. Various factors such as power consumption and the capacity to keep the system temperature level stable were taken into consideration. They also selected the material to be produced in scale. High-performance concrete was made using this material. Apart from having its mechanic strength evaluated, the resulting substance had its durability tested as well: i.e. sulphate attack reaction and alkali-aggregate reaction. Selected concretes containing low carbon range rice husk ash showed results compatible with silica fume concretes and superior to the reference concretes (without pozzolanic mixture), in relation to mechanical strength as well as in reaction to sulphate attack. Considering alkali-aggregate reactions, the material was considered innocuous such as silica fume. Finally experimental evidences prove that it is possible to produce a low range carbon content material with good reactivity from residual rice husk ash and that it can be commercially used for high-performance concrete production.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problema e relevância da pesquisa

Nas últimas décadas, a humanidade tem passado por uma crescente demanda de alimentos e produtos, ocasionando um aumento na transformação de matérias-primas em bens de consumo, tendo como consequência uma produção de maiores quantidades de resíduos. A disposição destes resíduos, seja ela adequada ou não, compromete o meio ambiente de muitas formas.

O beneficiamento de resíduos de forma concreta enfrenta problemas econômicos, políticos e administrativos. No entanto, o principal problema está na falta de um processo eficaz, compatível com as particularidades e características das regiões interessadas na sua solução.

Com o objetivo de reduzir o volume de resíduos gerados nos processos industriais e agrícolas, em especial aqueles considerados poluentes, um grande número de pesquisadores tem se dedicado a trabalhar com o intuito de utilizar os resíduos gerados durante um determinado processo no próprio processo produtivo (reciclagem) ou utilizá-los como matéria-prima na elaboração de outros materiais (DELLA, 2001). Desta forma, a transformação destes materiais, que inicialmente representava um problema, passa a ser uma fonte de renda ou, no mínimo, de redução de despesas com sua disposição final.

A indústria agrícola é responsável pela geração de um grande volume de resíduos. O resíduo agro-industrial que representa um dos maiores volumes de material disposto na natureza é a casca de arroz.

Sem valor comercial por sua dureza, fibrosidade e abrasividade, a deposição da casca de arroz ocupa grandes áreas e, por sua lenta biodeterioração, permanece inalterada por longos períodos de tempo, representando um grande dano ao meio ambiente. Todavia, a casca de arroz possui um poder calorífico elevado, muito embora variável, em função da umidade e das condições de plantio. Agopyan (1991) encontrou valores de 13045 kJ/kg, trabalhando com cinzas oriundas do estado de São Paulo. Já Della (2001) aponta valores da ordem de 16720 kJ/kg para cinzas produzidas em Santa Catarina. Este valor representa 33% da capacidade térmica do petróleo (KAPUR, 1985). Essa propriedade

faz com que ela seja utilizada como fonte para obtenção da energia. Este processo, por sua vez, gera um outro resíduo: a cinza de casca de arroz - CCA.

Em muitos dos países produtores de arroz, o volume de cinza produzido é bastante grande e apenas a indústria da construção civil poderia consumir tal quantidade de resíduo. Na Tabela 1.1 observa-se que nenhum outro resíduo da agricultura produz tanta quantidade de cinza quando queimado.

Tabela 1.1 – Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola

Cereal	Parte da Planta	Cinza (% em massa)
milho	folha	12
arroz	casca	20
arroz	palha	14
cana de açúcar	bagaço	15
girassol	folhas e talo	11
trigo	folhas	10

Fonte: MEHTA (1992)

Uma vez realizada a queima da casca, a cinza oriunda deste processo é um material de cor variável, muitas vezes preta, pobre em nutrientes, contendo entre 93 e 95% de sílica amorfa e/ou cristalina (HOUSTON, 1972). Este elevado teor de sílica amorfa torna o material atrativo à indústria da construção civil, uma vez que apresenta propriedades pozolânicas, capazes de melhorar muito as características dos concretos e argamassas com ele produzidos.

Embora nas últimas décadas o material tenha sido amplamente testado e os benefícios oriundos do seu uso como adição aos componentes à base cimento Portland tenham sido comprovados, o uso do material ainda não se tornou comercial no Brasil. O baixo índice de utilização do material é, segundo Gava (1999), creditado às restrições normativas impostas para a seleção e classificação do material para o emprego em argamassas e concretos. Para Dafico (2001), a cinza de casca de arroz não tem sido utilizada comercialmente como pozolana nem no Brasil e pouco tem sido usada outros países pelo fato do mercado não ver com bons olhos um concreto produzido com uma cinza que provoca uma coloração preta ao material uma vez que, em muitas aplicações, sua cor é fator importante. Essa coloração se deve ao alto teor de carbono que o material apresenta (frequentemente superior a 15%). Além disso, teores de carbono

relativamente elevados tendem a provocar um aumento na demanda de água do material, em função de sua elevada superfície específica, demandando, conseqüentemente, um maior consumo de cimento no concreto.

A produção mundial de arroz em casca na safra de 2004/2005 foi de 608,49 milhões de toneladas (ARROZ BRASILEIRO, 2006), sendo a China o maior produtor mundial, seguida pela Índia, Indonésia e Bangladesh. O Brasil, com uma produção de 13,2 milhões de toneladas ocupou o 9º lugar na lista dos produtores mundiais. O Estado líder na produção foi o Rio Grande do Sul, responsável por 47 % da referida safra e Santa Catarina ocupou o 3º lugar com 8,0% da produção nacional (CONAB, 2006). Como a cinza representa aproximadamente 4% em massa do arroz em casca, resultam os valores da Tabela 1.2 para a disponibilidade anual de cinza de casca de arroz:

Tabela 1.2 – Disponibilidade de cinza: safra 2004/2005.

Mundial	24,34 milhões de toneladas
Brasil	528 mil de toneladas
Rio Grande do Sul	248 mil de toneladas
Santa Catarina	42 mil toneladas

Fonte: ARROZ BRASILEIRO (2006) CONAB (2006)

Um dos setores industriais que teria capacidade para absorver este volume de resíduos seria a indústria cimenteira e de concreto dosado em central. Além de aspectos técnicos, oriundos da utilização de adições ativas no cimento, existem também aspectos econômicos e ecológicos bastante relevantes que têm levado ao aumento do interesse das cimenteiras pelo uso desses materiais.

Do ponto de vista econômico, estas adições exigem pouco ou nenhum beneficiamento para serem utilizadas o que pode representar maior tempo de exploração das jazidas, menor manutenção das plantas industriais com relativo aumento da produção sem necessidade de novos investimentos.

Pelo lado ecológico, o uso de menores teores de clínquer no cimento significa redução da emissão de CO₂, o que melhora a qualidade do ar e, conseqüentemente, minimiza os problemas sociais decorrentes de atividades industriais poluidoras.

É importante ressaltar ainda que materiais ricos em sílica reativa (amorfa) têm diversos usos potenciais em outros setores industriais, destacando-se a indústria de vidros e materiais cerâmicos.

Atualmente, a queima da casca do arroz para obtenção de energia calorífica junto das beneficiadoras do cereal, a partir de sistemas com ou sem controle das condições de queima, é amplamente utilizado no Brasil, tendo em vista que a utilização de outros combustíveis torna o processo muito caro. Dessa queima, resulta a cinza da casca de arroz residual, na maioria das vezes, com alto teor de carbono (cor preta), denominada, no âmbito desse trabalho, cinza bruta – CCA bruta.

Como grande parte das beneficiadoras de arroz são empresas de pequeno porte, não possuem processos para aproveitamento e/ou descarte adequado das cinzas produzidas. Em geral as cinzas são depositadas em terrenos baldios ou lançadas em cursos d'água, levando à poluição e contaminação de mananciais. Para minimizar o problema, órgãos ambientais têm buscado regulamentar o descarte destas cinzas. No Estado de Santa Catarina, por exemplo, a Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente - FATMA exige a instalação de um sistema constituído de silo separador e decantação para reter a cinza junto às beneficiadoras, evitando, desta forma, que a mesma seja lançada no meio ambiente. Como não há destino ou uso para a cinza recolhida, este material estocado acaba sendo lançado de maneira clandestina no meio ambiente, muitas vezes, ao longo de estradas vicinais como ilustra a Figura 1.1.



Figura 1.1 – Depósito clandestino de CCA – Criciúma, sul de Santa Catarina
(Fonte: SANTOS, 1997)

Muito embora o custo da CCA varie como a finalidade de seu uso, Dafico (2001) estima que se a cinza de casca de arroz gerada no Brasil apresentasse um teor de carbono reduzido, alterando sua cor de cinza escuro para cinza claro ou até branco, e alta reatividade, poderia ser comercializada, para o mercado da construção civil, ao preço da sílica ativa (US\$500.⁰⁰/tonelada) ou, na pior das hipóteses, ao preço do cimento (US\$100.⁰⁰/ton). Considerando o menor preço estimado por Dafico (2001) e utilizando os valores da safra 2004/2005 (Tabela 1.2), isso significaria um faturamento de US\$52,8 milhões de dólares no Brasil e US\$4,2 milhões de dólares em Santa Catarina, sem contar a redução dos custos com o sistema para deposição. Além disso, deixaria de ser o transtorno ambiental que é atualmente. Admitindo-se ainda que além da casca, a palha do arroz também pudesse ser queimada para gerar uma pozolana de alta qualidade, sabendo que a mesma equivale a 10 vezes a massa da casca produzida, grandes quantidades de cinza poderiam ser geradas.

Além dos beneficiadores de arroz, várias empresas no Brasil, de pequeno e grande porte, queimam ou já queimaram grandes quantidades de casca de arroz para produção de ar quente ou vapor utilizado em seus processos produtivos. Segundo Dafico (2001: 84),

uma grande empresa brasileira do setor de alimentos enlatados já chegou a queimar 5.000 toneladas de casca de arroz por mês. Hoje não passa de 500 toneladas porque substituiu a maior parte da casca de arroz por bagaço de cana que, apesar do custo mais alto devido ao transporte, gera menor quantidade de cinzas. Se essa empresa hoje dispusesse de um sistema adequado para a queima da casca de arroz que produzisse uma cinza de valor comparável à sílica ativa, as 5.000 toneladas/mês que queimava anteriormente poderiam gerar 12.000 toneladas de cinza por ano, que comercializadas a US\$500.⁰⁰/ton, daria um faturamento extra de 6 milhões de dólares por ano. Isso sem falar na eliminação do problema ambiental que hoje possui por produzir grandes quantidades de cinzas sem valor comercial.

No ano de 2004, o consumo de cimento pelas concreteiras brasileiras alcançou o patamar dos 4,607 milhões de toneladas (SNIC, 2005). A Figura 1.2 mostra o consumo de cimento das concreteiras, por região do Brasil, em mil toneladas.

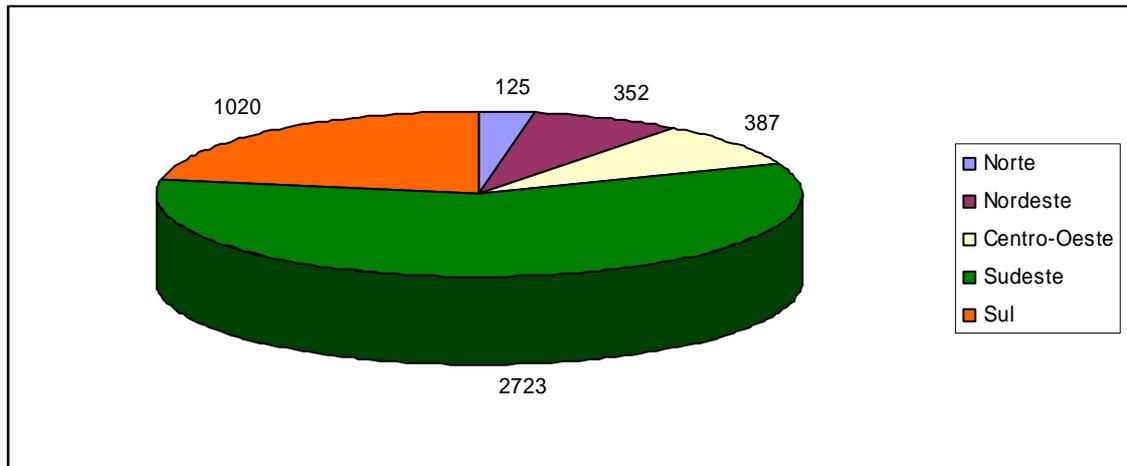


Figura 1.2 – Consumo de cimento das concreteiras por região do Brasil, em mil toneladas, em 2004. (Fonte: SNIC, 2005).

Considerando-se apenas os dados referentes à região sul, onde as concreteiras consumiram 1,020 milhões de toneladas de cimento em 2004 (SNIC, 2005), e admitindo-se um consumo médio de 350kg cimento/m³ de concreto, têm-se uma estimativa de que tenham sido produzidos 2,914 milhões de m³ de concreto neste período.

Segundo dados obtidos em entrevista realizada em 2004, com o Engenheiro José Luiz da Silva, da ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, do total de concreto produzido hoje, apenas algo entre 1 e 2% representa concreto de alta resistência/alto desempenho (CAD). Contudo, esse número deverá atingir 20% em um futuro não muito distante, especialmente pela adoção de normas mais rígidas com relação à durabilidade das estruturas, a exemplo da NBR 6118/2003.

Admitindo então este índice, ou seja, 20% do concreto produzido representa concreto de alto desempenho, feito com o uso de adições pozolânicas e um consumo médio de cimento de 500kg/m³, teriam sido produzidos, com base nos valores de 2004 (SNIC, 2005) 582,86 mil de m³ de CAD, com um consumo de 291,43 mil toneladas de cimento. Adotando-se a CCA como adição pozolânica a esse concreto, com um teor de substituição de 15% em volume absoluto de cimento¹ (SANTOS, 1997), isso significaria um consumo de 31 mil toneladas dessa adição. Com

¹ Massa da pozolana = $\frac{(\text{massa de cimento} \cdot 0,15 \cdot \gamma_{\text{pozolana}})}{\gamma_{\text{cimento}}}$

os números apresentados na Tabela 1.2, é possível imaginar que há espaço no mercado consumidor para que essa pozolana seja utilizada em escala comercial.

Diante desse panorama, Dafico (2001) e Weber (2001) desenvolveram metodologias de queima da casca de arroz, misturada à cinza de casca de arroz residual (gerada sem controle de temperatura do processo). Os sistemas foram capazes de gerar uma cinza de coloração cinza clara, ou seja, com teores de carbono reduzidos, o que resolveria, a princípio, o problema do mercado com relação à cor do concreto gerado com uso dessa adição.

Todavia, esses processos ainda não estão funcionando em escala comercial, pela heterogeneidade do material obtido em função das dificuldades encontradas no sistema de queima estático proposto, especialmente com relação à distribuição do ar no interior das câmaras de queima. Uma distribuição de ar não uniforme provoca a formação de material de cor diferenciada, ora mais clara, ora mais escura. Outro problema encontrado nos sistemas desenvolvidos foi o tempo necessário para que o clareamento do material fosse alcançado. Weber (2001), em seu forno piloto, chegou a levar 24 horas para requeimar 1m^3 do material.

A partir desses resultados, discussões e estudos foram conduzidos pelo GTec (Grupo de Tecnologia de Produtos à Base de Cimento Portland), na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com o intuito de desenvolver um sistema onde os problemas encontrados anteriormente pudessem ser superados. Assim surgiu a idéia de um forno rotativo contínuo, semelhante àqueles utilizados na produção do cimento Portland, que possibilitaria uma uniforme distribuição de ar no material e, conseqüentemente, levaria à produção de um material homogêneo em um período de tempo significativamente reduzido, em relação aos tempos relatados nos processos anteriormente desenvolvidos.

Nesse momento, chegou ao GTec a informação de que a Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda, empresa de desenvolvimento de tecnologia e insumos para a construção civil, da cidade de Gaspar – SC, também estava tentando desenvolver um processo industrial bastante parecido com a idéia proposta pelo grupo: um sistema com forno rotativo contínuo, capaz de produzir, seja a partir da queima da casca crua ou da queima da cinza, uma cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono.

Surgiu então a parceria Gtec/Rischbieter com o objetivo de somar esforços para desenvolver a tecnologia e produzir uma cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono, altamente reativa, para a produção de concreto de alto desempenho, que fosse capaz de competir no mercado com a pozolana hoje utilizada em larga escala, a sílica ativa.

Os trabalhos anteriores (DAFICO, 2001 e WEBER, 2001) utilizaram a queima de uma mistura de casca de arroz crua e cinza da casca de arroz residual, de forma que a casca servisse de combustível e que o processo fosse auto-suficiente em termos de consumo energético. Como a Rischbieter dispõe hoje de um excedente de energia, gerada em um outro processo da empresa, a idéia foi de reaproveitar este excedente e desta forma trabalhar apenas com a cinza de casca de arroz residual.

Ao utilizar apenas a cinza, o processo se torna mais ecológico, uma vez que esse resíduo já existe e hoje seu armazenamento representa um custo para quem o produz, em funções da legislação ambiental em vigor. Assim, o gasto com a matéria-prima (cinza bruta) pode ser menor, do que se fosse necessário comprar a casca que, por seu poder calorífico, tem maior valor agregado. Além disso, pela sua baixa massa unitária, o transporte da casca crua também representaria um custo adicional, já que para a obtenção de 200kg de cinza, é necessária a queima de 1000 kg de casca, que representam $8,33 \text{ m}^3$ de material.

Outro motivo para o uso da cinza bruta ao invés da casca de arroz, é a dificuldade de se estabelecer uma marcha de queima, a exemplo do que aconteceu com Weber (2001). Nos momentos da ignição do material, surgem picos de temperatura no interior do forno que podem prejudicar a qualidade do material obtido. Como o poder combustível da cinza de casca de arroz é praticamente nulo, fica mais fácil o controle da temperatura de queima.

Um aspecto importante para a produção, em escala comercial, da cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono é o estabelecimento dos parâmetros de produção: temperatura de queima, tempo de exposição à temperatura e superfície específica. Trabalhos realizados por diversos pesquisadores (MEHTA e PITT, 1977, CALLEJA, 1983; SUGITA *et al.* 1992; entre outros) não chegam a um consenso sobre estes parâmetros para a obtenção de um material com boas características pozolânicas, mesmo quando tratam da queima da casca para obtenção de cinza com elevado teor de

carbono. Existe, porém, a indicação de uma faixa de temperatura entre 500° e 800°C e de que o tempo de exposição a esta temperatura seja o mais breve possível, de forma que o material produzido apresente-se quimicamente amorfo e, portanto, reativo. Dependendo das condições que lhe deram origem, cada material terá um grau de moagem ideal próprio, que precisa ser determinado (SANTOS, 1997).

Assim, estabelecer parâmetros ideais para produção de uma pozolana com baixo teor de carbono, obtida pela requeima de uma cinza de casca de arroz residual, passa a ser fator determinante para que o produto obtido seja atrativo do ponto de vista técnico e econômico.

Talvez pelo fato de sua utilização ainda não ser comercial, o que faz com que os concretos e argamassas com ele produzidos não sejam expostos, em grande parte dos trabalhos, às condições reais de uso, poucos resultados têm sido publicados sobre a durabilidade de concretos contendo este tipo de adição. Desta forma, o material produzido sob condições que levem à obtenção de um produto com baixo teor de carbono precisa ser avaliado quanto ao seu desempenho como pozolana, não apenas do ponto de vista da resistência mecânica, mas, sobretudo, quanto à durabilidade dos concretos com ele produzidos.

De acordo com Al-Dulaijan *et al.* (2003), a corrosão por ação de cloretos é a principal causa da deterioração das estruturas de concreto. Possivelmente, seja esse o motivo pelo qual diversos autores têm exaustivamente se dedicado ao estudo desse tema. Ainda segundo o mesmo autor, a degradação pela ação de sulfatos é a segunda maior causa. Porém, poucos são os relatos na literatura sobre a investigação do ataque por sulfatos às estruturas de concreto. Isso se deve, em grande parte, às dificuldades de monitoramento dos ensaios estabelecidos por diversas normas ou mesmo pelo longo tempo necessário para a obtenção de resultados representativos. Mesmo que sua incidência na degradação das estruturas de concreto seja menor que a incidência do ataque por cloretos, o estudo do comportamento, especialmente de concretos de alto desempenho, frente ao ataque por sulfatos, é relevante, uma vez que vem contribuir para preencher uma lacuna no estudo de concretos com pozolana.

Por outro lado, os relatos de Silveira (2001) sobre reação álcali-sílica severa em concretos contendo cinza de casca de arroz, praticamente obrigam uma investigação sobre esse aspecto de durabilidade com a cinza de casca de arroz com baixo teor de

carbono a ser avaliada nesse trabalho. É imprescindível que seu comportamento em misturas com agregados potencialmente reativos seja avaliado, uma vez que se pretende que esse material entre em produção em escala comercial, podendo substituir a sílica ativa na produção de concretos de alto desempenho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Produzir e avaliar o uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concretos de alto desempenho.

1.2.2 Específicos

- Determinar a temperatura de queima e tempo de permanência no forno, ideais do ponto de vista técnico, para a produção de CCA com baixo teor de carbono;
- Estabelecer uma condição de moagem do material onde se obtenha um produto com características adequadas para uso em concreto de alto desempenho;
- Avaliar as características físicas e químicas do material produzido sobre condições controladas de temperatura e tempo de exposição;
- Determinar as características físicas e mecânicas dos concretos produzidos com a CCA de baixo teor de carbono; e
- Estudar o desempenho do produto com vistas à durabilidade do concreto de alto desempenho frente ao ataque por sulfatos e desenvolvimento de reação álcali-agregado.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado em 6 capítulos. Os capítulos 2 e 3 são dedicados à revisão de literatura. No capítulo 2 são abordados os aspectos relativos à durabilidade do concreto e no capítulo 3 discute-se o uso de CCA em misturas à base de cimento Portland. O capítulo 4 descreve o programa experimental adotado e as características dos materiais utilizados. Os resultados e discussões são apresentados no capítulo 5 e, por fim, no capítulo 6 é realizada uma análise integrada dos resultados alcançados, bem como são feitas sugestões sobre a continuidade das investigações com a cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono.

2. DURABILIDADE DO CONCRETO

2.1 Terminologia

2.1.1 Pozolanas

A NBR 12653/1992, a exemplo da ASTM C 618/1978, define pozolana como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que, quando finamente dividido e em presença de água, é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, e formar compostos com propriedades cimentantes. Esta reação é chamada de reação pozolânica.

2.1.2 Adições Minerais

Adições minerais são materiais com propriedades cimentantes (ou pozolânicas), que são adicionados ao concreto em quantidades variáveis em relação à massa de cimento. Podem ser empregadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento. (SILVEIRA, 1996)

2.2 Aspectos Gerais

Recentemente abandonou-se a idéia de que concreto resistente é concreto durável. A resistência de um material, segundo Metha e Monteiro (1994), é a capacidade de este resistir às tensões impostas sem ruptura. Um concreto com elevada relação água/cimento pode atender às solicitações de projeto, em termos de resistência à compressão. Por outro lado, possivelmente apresenta prejuízo em relação à sua durabilidade, em função da porosidade e, muitas vezes, permeabilidade elevada. Assim, a permeabilidade precede a durabilidade. Concretos pouco permeáveis serão mais duráveis do que aqueles onde a permeabilidade é maior.

Hoje, em determinadas obras, a durabilidade tem maior peso que a resistência obtida, como em caso de obras marítimas, por exemplo. Dessa forma, ambas merecem ser tratadas com importância não apenas no momento da execução, mas desde o projeto,

uma vez que muitos problemas podem ser evitados se, ao projetar, arquitetos e engenheiros ficarem atentos às questões de durabilidade que envolvem a obra, mesmo que isso signifique, em algumas situações, um custo, inicialmente, mais elevado da construção.

A necessidade dos usuários (entendidos no âmbito desse estudo que usuários são todos aqueles que projetam, executam, compram e utilizam uma edificação/estrutura) sempre foi a de tornar a construção econômica de todas as formas, em função da concorrência do mercado. Essa corrida pela economia chegou a um ponto tal que a qualidade dos materiais foi (ou ainda é), em muitos momentos, negligenciada, em detrimento da qualidade e segurança da obra. E assim, a durabilidade das estruturas foi sendo reduzida.

Em conseqüência disso, têm-se hoje gastos cada vez maiores com recuperação de estruturas de concreto em geral. Países como Brasil, México e Estados Unidos, com grande extensão de costa, gastam verdadeiras fortunas anualmente apenas na recuperação de estruturas degradadas. De acordo com o FHWA - *Federal Highway Agency*, das quase 600 mil pontes norte americanas, 35% são classificadas como deficientes ou em necessidade de reabilitação ou substituição, apresentando deficiência em sua capacidade portante e, muitas vezes, inadequadas para os níveis de tráfego atuais. Recuperá-las representaria algo em torno de US\$70 bilhões de dólares (WAYERS, 1998, KARBHARI e ZHAO, 2000)

Entretanto, cada vez mais, estruturas de concreto têm sido utilizadas em ambientes agressivos, próximos ao mar, em climas extremamente quentes ou frios, em ambientes sujeitos a alta pressão, em depósitos de materiais nucleares ou de produtos altamente tóxicos. Esses ambientes agressivos, que podem acelerar de forma intensa a deterioração do concreto, exigem que o mesmo seja resistente durante toda a sua vida útil, mantendo a sua integridade e funcionalidade, por meio de uma elevada durabilidade.

De forma geral, a *durabilidade* de um material ou elemento de construção é definida como a sua resistência à deterioração ou à degradação, sendo a degradação do elemento, o processo que define a perda progressiva das qualidades para prestar o serviço a que foi destinado (JOHN e AROZTEGUI, 1985).

É preciso destacar que a durabilidade de um material, ao contrário do que podem pensar alguns, não significa vida por tempo indefinido, muito menos suportar qualquer tipo de ação, em ambientes com condições variadas (NEVILLE, 1997). Além disso, é preciso que se esclareça que a durabilidade do concreto e da estrutura de concreto armado são coisas diferentes, e não, necessariamente coincidentes. A primeira, diz respeito à capacidade do próprio material conservar as propriedades originais por certo período de tempo. Já a segunda, além de depender da primeira, depende ainda de fatores ligados ao projeto e à execução (COLLEPARDI, 1998).

A estrutura será considerada durável quando desempenhar as especificações de projeto, mantendo resistência e utilidade com segurança durante um período de tempo pré-determinado, *pelo menos razoável*.

Esse tempo *pelo menos razoável* é definido como a vida útil de projeto e, segundo a NBR 6118/2003, é aquele período de tempo em que as características originais da estrutura de concreto são mantidas sem que haja necessidade de manutenções e reparos, além daqueles previamente já estabelecidos.

Nesse sentido, observa-se que a demanda por um desempenho cada vez melhor é uma realidade, o que exige soluções que incluem a obtenção de concretos cada vez mais duráveis. Logo, no projeto da estrutura e na dosagem do concreto, é fundamental que se leve em conta a indispensável resistência à ação de agentes agressivos.

2.3 Degradação do Concreto

O conhecimento sobre os processos responsáveis pela degradação do concreto teve origem em estudos de casos de estruturas em condições reais de agressão. O acompanhamento de casos reais indica que, na maior parte dos casos, a deterioração do concreto não é função de uma única causa. Em geral, ocorre atuação simultânea de diversos fatores deletérios inter-relacionados o que por vezes pode tornar a identificação dos fenômenos envolvidos bastante difícil. (SILVEIRA, 1996).

As causas de degradação do concreto são classificadas, segundo Mehta e Gerwich (1982), em químicas e físicas. As causas físicas são subdivididas em: (1) desgaste superficial devido à abrasão, erosão ou cavitação e (2) fissuração devido a gradientes de temperatura e umidade, pressão de cristalização de sais nos poros,

carregamento estrutural e exposição a extremos de temperatura tais como congelamento e fogo. Já as causas químicas de deterioração são divididas em três categorias: (1) hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura, (2) trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento e (3) reações causadoras de produtos expansíveis, tais como corrosão da armadura no concreto, expansão por sulfato e reação álcali-agregado.

Via de regra, a deterioração química do concreto está associada à presença e ação da água. Quando não contém substâncias nocivas e quando não se trata de água pura, a água é uma boa aliada do concreto, especialmente durante a sua fase de cura. Entretanto, quando traz dissolvidas substâncias químicas procedentes do ar, da terra ou de produtos de despejo, converte-se em um agente agressor importante, cuja ação deletéria depende do tipo e concentração de íons na água e da composição do concreto (CÁNOVAS, 1988). Assim, a facilidade de ingresso e movimentação da água no concreto são os principais parâmetros a considerar na determinação da intensidade dos processos de degradação química.

Em função disso, existem dois fatores principais a considerar no processo de degradação química do concreto: os mecanismos de transporte de líquidos e gases no seu interior e sua estrutura de poros.

A porosidade do concreto ocorre de uma forma natural, devido principalmente à quantidade de água da mistura, às características dos agregados e a fatores ligados à sua produção. Dependendo de como esta estrutura de poros está formada e havendo conexão entre vazios existentes, surgirá, então, um material permeável, sujeito à movimentação de líquidos e gases no seu interior.

A permeabilidade do concreto, embora esteja diretamente ligada à porosidade, depende também de outros fatores. Definida como a taxa de fluxo de fluidos através da estrutura de poros, a permeabilidade irá depender do tamanho dos poros, da distribuição dos mesmos e da interconexão entre eles no concreto. Um conjunto de poros pode ser considerado impermeável se, devido ao tamanho reduzido, não houver possibilidade de passagem de fluidos. Assim como a continuidade na estrutura de poros e a interconexão entre eles resulta em uma maior possibilidade de acesso da água.

De acordo com Mehta e Gerwick (1982), nos processos químicos responsáveis pela degradação do concreto destacam-se as reações envolvendo formação de produtos

expansivos. Estas podem levar a sérios efeitos deletérios. A formação desses produtos gera tensões internas que se manifestam na forma de fissuração e desagregação, levando à perda de resistência e rigidez do concreto. Os fenômenos associados às reações químicas expansivas são: hidratação retardada de CaO e MgO livres, corrosão da armadura, *ataque por sulfatos*, e *reação álcali-agregado*.

2.4 A Importância do Uso das Pozolanas no Concreto

A utilização de pozolanas para a produção de concretos e argamassas não é assunto novo. Numa análise rápida da história da evolução da construção, pode-se observar que, sob certos aspectos, ela mostra-se cíclica, com hábitos que vão e vêm através dos tempos. Babilônicos, Gregos e Romanos, entre outros povos, utilizaram pozolana como material de construção em épocas e regiões diferentes. Hoje a engenharia vive um novo ciclo no que diz respeito ao uso desse material, especialmente porque o mercado consumidor se faz cada vez mais exigente com relação à aplicação de materiais mais duráveis.

O cimento Portland comum, em determinados aspectos, apresenta deficiências, ou insuficiências, para atender necessidades específicas da indústria da construção civil, especialmente sob aspectos de durabilidade. O uso das pozolanas pode suprir estas necessidades levando a certas vantagens, sendo os cimentos com adições pozolânicas recomendados por seu uso específico (por exemplo, cimentos pozolânicos para barragens e para obras marítimas). Segundo Guedert (1989), o uso das pozolanas em adição ao cimento confere a concretos e argamassas características como:

- ✓ Menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas);
- ✓ melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade; e
- ✓ maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

A substituição parcial do cimento por pozolana implica ainda na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento. Isto aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos.

O consumo anual de cimento, em 2004, foi de 1,864 bilhões de toneladas (SNIC, 2005). Tamanha produção afeta o equilíbrio ambiental de várias formas: exige um alto consumo de energia para atender tal demanda; além de movimentar milhões de m³ de solo para obtenção de matéria-prima para sua fabricação. O emprego de materiais resultantes de processos industriais ou agrícolas diminui a quantidade de resíduo a ser lançado no meio ambiente e reduz o impacto ambiental originado pela produção de cimento.

Entre as pozolanas estudadas e empregadas atualmente, a *sílica ativa* (ou comumente chamada *microsílica*) representa um importante papel no desenvolvimento da tecnologia do concreto. A adição de sílica ativa ao concreto de elevado desempenho assegura um aumento da resistência à compressão a níveis mais elevados do que aqueles sem adição (GJΦRV, 1992). A ação física da sílica ativa se traduz por uma pasta mais densa, resultando um concreto com microestrutura igualmente mais densa e uniforme. Segundo Mehta (1986, 1988) *apud* Isaia (1995), o uso de sílica ativa implica num refinamento da dimensão dos poros e diminuição da dimensão dos cristais de CH ao redor das partículas da pozolana. Como resultado desse comportamento, tem-se então a densificação da pasta e da interface, melhorando as propriedades do concreto, especialmente aquelas relacionadas com a penetração de líquidos e gases.

Merece destaque também a *cinza volante*, pozolana mais utilizada em compostos à base de cimento Portland. Sua composição química é variável, porém similar a dos grupos de minerais da argila, dependendo dos carvões que lhes deram origem, podendo ser razoavelmente constante dentro de uma mesma central termoelétrica, já que procedem de carvões análogos. Já sua perda ao fogo vai depender das condições de combustão, que podem variar inclusive dentro da mesma central de queima (CALLEJA, 1983).

De forma geral, ela apresenta-se menos eficaz que a sílica ativa pela presença de sílica sob a forma cristalina, e pelo fato de seus grãos serem maiores que o da sílica ativa e por existir uma diversidade de composição entre um grão e outro, o que é função do

modo de obtenção da cinza. Isto implica numa dispersão entre as fontes de suprimento e até numa mesma fonte, o que não acontece com a sílica ativa (NEVILLE, 1997).

Esta diversidade de tamanho, morfologia e mineralogia entre as partículas de cinza volante leva a uma reação diferenciada para cada grão. De acordo com Diamond (1989), as reações pozolânicas da cinza volante só levam a um acréscimo significativo de resistência a partir de um mês de idade.

Da mesma forma que a sílica ativa, a cinza volante também melhora o desempenho da microestrutura da interface com o agregado. Xu *et al.* (1993), em pesquisa realizada em argamassas com teores de cinza variando de 0 a 60%, mostram resultados que confirmam a redução do CH proporcionado pelas reações pozolânicas, diminuindo sua presença tanto na interface quanto na matriz, tornando-a menos porosa e mais homogênea. Outras pesquisas mostram ainda a viabilidade de reposição de cimento Portland em teores que variam de 50 a 60% de cinza volante, a fim de obterem-se concretos de alto desempenho e elevada qualidade (ISAIA, 1995; ISAIA, 1991).

Nas últimas décadas, a *cinza de casca de arroz* vem merecendo atenção especial por parte dos pesquisadores. Segundo a opinião da maioria deles, sua reatividade é similar ou até superior à da sílica ativa, chegando a ser chamada de *superpozolana* (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Uma vez que o estudo deste material como pozolana é o objetivo do presente trabalho, uma revisão sobre o assunto é feita no próximo capítulo.

Entretanto é preciso evidenciar que, mesmo com as vantagens acima citadas, oriundas da utilização de pozolanas em concreto, o uso do material apresenta também algumas desvantagens. Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude (caso da cinza volante).

2.5 O Ataque por Sulfatos

A degradação do concreto em função do ataque por sulfatos se dá por meio de reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e íons sulfato (SO_4^{-2}). O produto

desta reação é expansivo, podendo conduzir à fissuração e desagregação das camadas externas do concreto. No estágio inicial do ataque, a resistência pode crescer ligeiramente, como reflexo da densificação da microestrutura. Posteriormente, ocorre a redução da coesão e conseqüentemente perda progressiva de resistência, rigidez e massa (SILVEIRA, 2001).

A preocupação com o desempenho de concretos em contato com ambientes sulfatados e as investigações sobre o fenômeno surgiram na década de 20, no século passado (TUTHILL, 1988). Em 1936, um manual de construção de concreto, publicado pelo *U.S. Bureau of Reclamation*, já alertava que concentrações de sulfatos solúveis maiores do que 0,1% no solo (150 mg/l de sulfato na água) são nocivas ao concreto e, acima de 0,5% de sulfato solúvel no solo (acima de 2.000 mg/l de sulfato na água), podem causar sérios efeitos deletérios. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como regra, tem-se que os sulfatos geralmente estão presentes em soluções de água ou efluentes. Contudo, em alguns lugares do mundo, existem concentrações significativas de sulfatos presentes em agregados miúdos utilizados em concretos (PERKINS, 1986). Em geral, os íons sulfatos são encontrados no mar, em águas subterrâneas, em poços de mineração, em chuvas ácidas, em pântanos (decomposição de materiais orgânicos), em águas de esgoto (devido ao ácido sulfídrico que pode ser transformado em ácido sulfúrico), em dejetos industriais (ácido sulfúrico) e em águas de drenagem de solos fertilizados (sulfato de amônia).

Ainda os sulfatos presentes na atmosfera também representam uma fonte de contaminação. Segundo Aslam *et al.* (1987), a concentração de gases poluentes, tais como CO₂, SO₂, SO₃, H₂S e CO, podem representar um risco às estruturas, com destaque para os gases sulfurosos que são os mais prejudiciais para o concreto.

No ambiente marinho, as concentrações iônicas de Na⁺ e Cl⁻ são as maiores, com valores médios de 11,03 e 19,82g/l, respectivamente (CHESTER, 1990). Todavia, mesmo aparecendo em menores quantidades, do ponto de vista da ação agressiva aos produtos de hidratação do cimento, quantidades suficientes de Mg⁺² e SO₄⁻² estão presentes na água do mar, apresentando concentrações de 1,40 e 2,70 mg/l, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Rasheeduzzafar *et al.* (1985), ao avaliarem estruturas de concreto localizadas na costa do Golfo ao leste da Arábia Saudita, constataram que a maioria das estruturas

apresentou elevado grau de deterioração em um período entre 10 e 15 anos de vida. A deterioração constatada foi atribuída a duas causas: corrosão da armadura e *ataque por sulfatos*.

Entre os vários tipos de sulfatos encontrados na natureza, os mais conhecidos são os sais selenitosos, apresentados na Tabela 2.1. Silva Filho (1994) estabeleceu uma classificação em três classes de agressividade: elevada, média e reduzida, partindo da solubilidade e do efeito danoso de cada sal sobre o concreto.

Tabela 2.1 – Características dos principais tipos de sais selenitosos

Tipo	Cátion	Cor	Solubilidade	Origem	Agressividade
K_2SO_4	Potássio	branca	baixa	Água do mar e subterrânea	Elevada
$NH_4 SO_4$	Amônia	branca	alta	Fábrica de explosivos, coque, indústrias químicas	Elevada
$Na_2 SO_4$	<i>Sódio</i>	<i>branca</i>	<i>alta</i>	<i>Indústria química e água do mar</i>	<i>Elevada</i>
$CaSO_4$	<i>Cálcio</i>	<i>branca</i>	<i>baixa</i>	<i>Água subterrânea e escória</i>	<i>Elevada</i>
$MgSO_4$	<i>Magnésio</i>	<i>branca</i>	<i>alta</i>	<i>Água do mar e subterrânea</i>	<i>Elevada</i>
$CuSO_4$	Cobre	branca	alta	Conservação de madeira, galvanoecnia	Elevada
$FeSO_4$	Ferro	verde	alta	Desinfetante, tinturaria	Elevada
$Fe_2 (SO_4)$	Ferro	branca	alta	Tratamento de água	Elevada
$ZnSO_4$	Zinco	branca	baixa	Tinturaria e indústria química	Elevada
$KAlSO_4$	Potássio	branca	baixa	Indústria química	média
$PbSO_4$	Chumbo	branca	muito baixa	Indústria química	Reduzida
$CoSO_4$	Cobalto	vermelha	baixa	-	Reduzida
$NiSO_4$	Níquel	branca	baixa	Indústria química	Reduzida

Fonte: (SILVA FILHO, 1994)

A intensidade do ataque pelos sulfatos é influenciada por vários fatores, assumindo grande importância, além da solubilidade, a concentração desses sais no solo ou na água e o tipo de sulfato e de outros íons presentes na solução. Assim, para se avaliar a agressividade dos sulfatos não se deve levar em conta apenas o conteúdo de ânions (SO_4^{-2}), mas, também, o tipo de cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2}) presentes no processo.

Cabe destacar os sais de sulfato de sódio, de cálcio e de magnésio, que são os mais agressivos. O sulfato de sódio, a ser utilizado no presente trabalho, reúne características de elevada agressividade e alta solubilidade (200g SO_3/l), em comparação com o sulfato de magnésio (150g SO_3/l) e com o sulfato de cálcio (1,2g SO_3/l).

A natureza do contato entre os sulfatos e o concreto também exerce influência sobre a intensidade do ataque. Quando sujeito a ciclos de molhagem e secagem alternados, como ocorre nas estruturas marinhas ao nível da água ou em estruturas subterrâneas ao nível do lençol freático, o ataque é mais intenso.

A água com sulfatos em dissolução é tanto mais agressiva quanto maior a pressão que esteja exercendo sobre o elemento (AGUADO *et al.*, 1996). Da mesma forma, em igualdade de concentração de sulfatos, a água em movimento é mais agressiva do que a água parada (SILVEIRA, 1996).

Embora, de acordo com Collepardi (1996), teoricamente, o ataque por sulfatos ao concreto possa ser tratado como um fenômeno único, na prática, o ataque por sulfatos é acompanhado geralmente de outros fenômenos simultâneos, os quais causam algumas formas de deterioração. Estes fenômenos incluem: ação gelo-degelo, microfissuras térmicas e/ou por retração, reação álcali-agregado, o ataque do CaCl_2 e a cristalização de sais.

Tendo em vista a grande quantidade de fatores envolvidos, a intensidade do ataque normalmente é relacionada a uma classificação de grau de agressividade do meio ambiente. Dependendo da agressividade do ambiente, as normas de diversos países especificam requisitos mínimos quanto ao tipo de cimento e relação água/cimento recomendados. Apesar de existirem algumas diferenças, as exigências quanto à relação água/cimento ficam em torno de 0,55 para ambientes de baixa agressividade, 0,50 em ambientes de média agressividade e 0,45 em ambientes de forte agressividade. No entanto, existe uma concordância na recomendação do tipo de cimento: cimentos

resistentes a sulfatos e cimento com adições pozolânicas devem ser especificados para a proteção de concretos utilizados em ambientes sulfatados (SILVEIRA, 1996).

O desenvolvimento da agressão por sulfatos depende, inicialmente, da taxa de difusão dos sulfatos para dentro da matriz do concreto e, num segundo momento, da reação entre os compostos hidratados da pasta, o íon sulfato e o cátion correspondente. O processo é lento e a taxa de agressão, no período inicial, depende dos fatores que governam a porosidade do concreto. Posteriormente, quando ocorrem as reações com os compostos hidratados e os íons sulfatos, o conteúdo de C_3A passa a ser relevante e a taxa de agressão aumenta (CALLEJA, 1980).

Para Silva Filho (1994) os fatores que influenciam o desenvolvimento do ataque por sulfatos dividem-se em duas categorias:

a) Fatores associados com a produção do concreto:

- ✓ Tipo de cimento (composição química e superfície específica);
- ✓ Tipo de agregado (forma, granulometria e composição mineralógica);
- ✓ Dosagem (relação água/cimento, quantidade de cimento, teor de argamassa); e
- ✓ Cura (duração e temperatura).

b) Fatores relacionados com do meio ambiente:

- ✓ Concentração da solução agressiva;
- ✓ Temperatura da solução; e
- ✓ Constância do fluxo da solução agressiva.

O autor ressalta que o conteúdo de C_3A deve ser controlado, pois embora a reação expansiva deste componente não seja a única a ocorrer durante o processo agressivo, este é ainda o fator mais relevante na perda de resistência do cimento Portland ao ataque de sulfatos.

Para Cánovas (1988), cimentos com alto conteúdo de C_3A produzem concretos pouco duráveis, porém a sua ausência favorece o ataque de cloretos, originando concretos permeáveis e, portanto, carentes de proteção contra a corrosão da armadura. Do ponto de vista de proteção aos sulfatos, o autor indica que é conveniente o uso de cimentos de

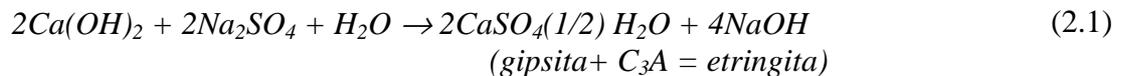
moderada resistência a sulfatos com conteúdo de C_3A compreendido entre 6 e 8% e com uma composição similar ao Tipo II da ASTM C 150².

De acordo com Prudêncio Jr. (1993), a degradação decorrente do ataque por sulfatos ocorre em três estágios:

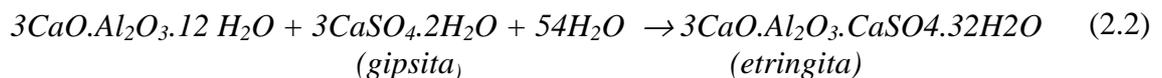
- ✓ Difusão do íon sulfato pela matriz de cimento;
- ✓ Reação entre os íons sulfatos e os produtos de hidratação do cimento; e
- ✓ Fissuração da matriz, levando à perda de resistência e desagregação.

Conforme já citado anteriormente, os principais agentes causadores do ataque por sulfatos são sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e sulfato de magnésio ($MgSO_4$). Quimicamente, as reações típicas envolvidas no ataque por estes elementos são:

a) Reação entre o *sulfato de sódio* e os compostos do cimento hidratado, formando gipsita (gesso). Esta reação é acompanhada de expansão. A gipsita, produto desta reação, pode combinar-se com C_3A (aluminato tricálcico) e dar origem à etringita.

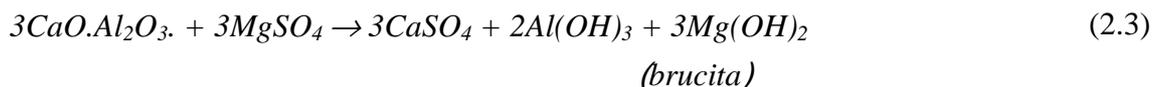


b) Reação entre o *sulfato de cálcio* e os compostos do cimento hidratado formando sulfoaluminatos hidratados (etringita).

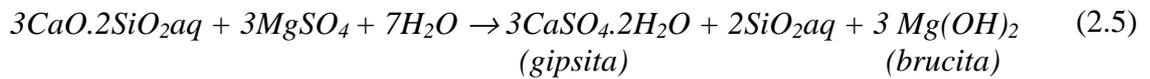
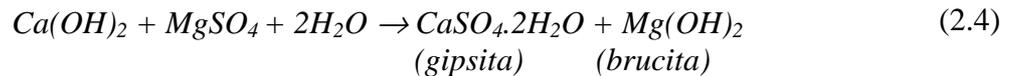


Da mesma forma que a anterior, esta reação é acompanhada de aumento de volume.

c) Reação entre o *sulfato de magnésio* e os compostos do cimento hidratado formando gipsita e brucita.



² Cimento de moderada resistência a sulfatos (MRS) – NBR 5737:1986.



A transformação do hidróxido de cálcio e do aluminato tricálcico em gesso é acompanhada de um aumento de volume de cerca de 100%. Isto explica o porquê das reações entre os sulfatos e os produtos de hidratação serem acompanhadas de expansões volumétricas significativas. Contudo, dependendo da porosidade da pasta de cimento, esta reação pode se manifestar sem a expansão da pasta endurecida. Para isso, basta que o volume de poros vazios permita a deposição e cristalização dos produtos da reação. (SOBRAL, 1990).

2.5.1 As pozolanas e o ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos ao concreto envolve expansão, fissuração e diminuição da resistência mecânica pela formação de gipsita e etringita, como exposto no item 2.5. Para a formação de etringita é preciso disponibilidade de Ca(OH)_2 e C_3A na mistura. O uso de pozolanas em concreto contribui de várias formas para o melhor desempenho do material frente ao ataque por sulfatos: (1) ao substituir parte do cimento por pozolana, reduz-se a quantidade de C_3A disponível para a reação; (2) como a reação pozolânica consome Ca(OH)_2 , a quantidade deste fica bastante reduzida na pasta de cimento hidratada; (3) a formação do C-S-H oriundo da reação pozolânica tem menor relação CaO/SiO_2 e (4) reduz, consideravelmente, a permeabilidade do concreto, dificultando o ingresso dos sulfatos.

Esse comportamento das misturas contendo pozolanas é apresentado por vários trabalhos que estudaram a resistência de argamassas e concretos ao ataque por sulfatos, com diversas pozolanas, sob diferentes condições: teor de adição da pozolana e grau de agressividade da solução de sulfato.

Mather (1982), *apud* Joshi e Lohtia (1997) mostra dados de estudos laboratoriais do *U.S Corps of Engineers* usando três diferentes tipos de cimento, com teores de C_3A de 9.4,

13.1 e 14.6% e dez diferentes tipos de pozolanas, incluindo sílica ativa, vidro vulcânico e diferentes tipos de cinza volante. As pozolanas foram adicionadas às argamassas no teor de substituição de 30% em volume de cimento. Os corpos-de-prova foram expostos à solução de 0,352M de Na_2SO_4 e a resistência à compressão axial foi comparada, em diferentes idades, com a resistência de corpos-de-prova que não foram submetidos ao ataque. A ordem de valores de resistência encontrados para as diferentes pozolanas foi, da melhor para a pior: sílica ativa, vidro vulcânico, cinza volante sub-betuminosa, cinza volante betuminosa. O autor declara que os resultados sugerem que pozolanas de elevada superfície específica e que contenham altos teores de sílica amorfa são mais eficientes no combate ao ataque promovido por sulfatos ao concreto.

Silveira (1996) investigou a eficiência da CCA no combate ao ataque por sulfatos em concretos e argamassas. Para os concretos foram investigadas três relações água/aglomerante (0,42; 0,51; 0,60), dois teores de adição de CCA (5 e 10% em massa) e duas idades de ensaio (28 e 148 dias). Os concretos permaneceram em câmara úmida, para cura, até a idade de 28 dias. Depois disso, foram divididos em dois lotes: um foi imerso em água e outro em solução de sulfato de sódio, num teor de 5% em relação ao volume da solução. A autora conclui que, de forma geral, a adição de CCA apresentou influência significativa no aumento da resistência à tração e à compressão axial dos concretos após 120 dias de imersão em solução de sulfatos. Os ganhos percebidos foram de 12 e 30% respectivamente.

Mehta e Monteiro (1994) relatam que pastas obtidas com maior quantidade de água terão maior volume de vazios disponível. Assim, para baixas relações água/cimento, onde a porosidade é menor, qualquer tensão provocada pelo efeito expansivo das reações entre íons sulfato e os produtos de hidratação do cimento são suficientes para que a fissuração interna ocorra e, conseqüentemente, a resistência mecânica diminua. Para relações água/aglomerante mais elevadas, a maior porosidade possibilita a acomodação dos produtos expansivos nos poros, densificando a matriz e provocando até um aumento de resistência. Uma vez preenchidos os espaços vazios, surgem as tensões de tração que levarão à queda de resistência que, provavelmente, será mais acentuada que nas relações água/aglomerante mais baixas.

Silva Filho (1994) afirma que uma combinação adequada de pozolanas, cimentos especiais e relações água/cimento controladas pode ser uma excelente alternativa para concretos altamente resistentes a sulfatos. Igualmente, Calleja (1983) salienta que a

incorporação de sílica ativa ou cinza de casca de arroz às matrizes de concreto produzirá estruturas menos porosas, conseqüentemente menos permeáveis, o que diminuirá as chances do ataque.

2.5.2 Determinação da resistência ao ataque por sulfatos

Monitorar a agressão provocada por sulfatos em concretos implica no acompanhamento da variação de resistência mecânica, de dimensões, de massa, do módulo de elasticidade dinâmica, da modificação da estrutura dos poros e do aspecto visual.

Os métodos para a determinação desses parâmetros podem ser divididos em dois grandes grupos: avaliação da agressão pela incorporação de sulfatos ao concreto e avaliação da agressão por imersão do concreto em solução de sulfatos.

Para o primeiro grupo, o ensaio proposto pela ASTM C 452 (1989) é bastante utilizado. Nele, a gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado) é incorporada ao concreto e depois de determinado tempo, avalia-se a expansão medida em corpos-de-prova.

No segundo grupo, o material em estudo é imerso (total ou parcialmente) por um certo período de tempo, em solução agressiva de sulfatos. Depois se realiza a avaliação dos corpos-de-prova.

Os ensaios de imersão são os que melhor reproduzem as condições reais de exposição da estrutura. O tipo e concentração dos sais podem variar, porém, a ASTM 1012 (1989), que apresenta um método para a determinação de resistência a sulfatos, baseado na expansão de barras de argamassa, prevê a diluição de 5% de sulfato de sódio correspondente a um teor de SO_3 de 2,8%. Para acelerar o processo, os corpos-de-prova podem ser submetidos a ciclos de molhagem e secagem, o que provoca forte degradação, devido à cristalização dos sais.

É importante salientar que os ensaios podem ser realizados em pasta, argamassa ou concreto, sendo a degradação neste último mais severa, pela presença da interface pasta agregado/grauído. Para Gonzáles (1995), os ensaios realizados em concreto são os mais fiéis, uma vez que a estrutura física do material é fator determinante no processo de degradação enquanto que pastas e/ou argamassas não conseguem reproduzi-la. Somado a isso, a pasta é capaz de suportar maiores deformações antes de fissurar, levando os ensaios a superestimar a resistência à fissuração do concreto.

Os testes feitos em pasta e argamassa são indicados para avaliação do desempenho de cimentos resistentes a sulfatos. Entre eles estão o Mehta Test (MEHTA e GJØRV, 1975) e o Método Koch & Steinegger (KOCH e STEINEGGER, 1960).

O Mehta Test (MEHTA e GJØRV, 1975) consiste na determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova de pasta, produzidos com relação $a/c = 0,5$, curados por 13 dias à 40°C e imersos posteriormente em solução de 4% de sulfato de sódio por 28 dias. A resistência ao ataque é estabelecida pela média de resistência à compressão de 8 cubos de pasta, coletados após o período de cura, e a média de outros 8 cubos submetidos ao ataque por sulfatos. Caso a queda de resistência seja inferior a 20%, o cimento é considerado de boa qualidade.

O Método Koch & Steinegger (KOCH e STEINEGGER, 1960) prevê a determinação da resistência à agressividade pela avaliação da resistência à tração na flexão de prismas de argamassa (10x10x60) mm de composição 1:3 (cimento:agregado miúdo de granulometria padronizada) e relação água/cimento fixa de 0,6, imersos em solução de 4,4% de sulfato de sódio, durante intervalos de tempo de 21, 35, 49, 77 e 180 e 365 dias. Após 21 dias de cura em solução saturada de hidróxido de cálcio, os corpos-de-prova são divididos em dois grupos: um é imerso na solução agressiva e outro permanece na cura em solução saturada de hidróxido de cálcio. A resistência à tração na flexão é determinada às idades pré-estabelecidas, contadas a partir da moldagem dos prismas para ambos os grupos. A razão entre a média de resistência dos prismas expostos à solução agressiva e daqueles curados em água, é definida como o *fator de degradação* (R). O cimento será considerado potencialmente resistente a sulfato quando o fator R, aos 77 dias, for superior a 0,7. Pesa contra esse ensaio o longo período de tempo para a realização completa do mesmo e, principalmente, a elevada relação água/cimento estabelecida, uma vez que não reflete, na maioria das vezes, as reais condições de produção do concreto.

Os relatos de trabalhos que se destinam à avaliação de resistência a degradação por ataque de sulfatos em concreto são reduzidos se comparados àqueles que dedicados a outros tipos de ataque/degradação do material. GjØrv e Shah (1971), *apud* Silveira (1996), empregaram a combinação de vários métodos para o estudo do concreto submetido à ação de sulfatos e concluíram que o uso conjunto deles pode ajudar a

esclarecer vários aspectos desta reação. Silveira (1996) usou a combinação de resistência a compressão axial e à tração na flexão em concretos e argamassas do mesmo traço, para avaliar a agressão por sulfatos em concretos contendo cinza de casca de arroz. Utilizou também a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para algumas observações de caráter qualitativo da estrutura do material.

Al-Dulaijan *et al.* (2003) conduziram estudos em argamassa para avaliar o comportamento de cimentos puros (ASTM Tipo I e V)³ e com uso de sílica ativa e cinza volante, em substituição ao cimento, nos teores de 7 e 20%, respectivamente. Os corpos-de-prova foram expostos a diferentes concentrações de sulfato de sódio e a avaliação de deu por exame visual e redução da resistência mecânica, por um período de 24 meses. As misturas que apresentaram melhor resultado foram aquelas contendo sílica ativa e cinza volante, indicando que ambas são eficientes no combate do ataque por sulfato, podendo contribuir para o aumento da durabilidade das estruturas.

Avaliando o comportamento do CAD sob o ataque de sulfatos, Shannag e Shaia (2003) estudaram vários teores de pozolanas naturais e sílica ativa em substituição ao cimento. Corpos-de-prova cúbicos de concreto, com 10 cm de aresta, foram expostos soluções de 20% de sulfato de sódio e magnésio, água pura e água do mar. As amostras foram avaliadas por meio de exame visual, avaliação da perda de resistência mecânica e velocidade de propagação da onda ultra-sônica, periodicamente. Após um ano de exposição, as amostras preparadas apenas com cimento apresentaram redução da resistência mecânica de até 60%, comparadas com aquelas imersas em água pura, enquanto que as amostras contendo 15% de pozolana natural e 15% de sílica ativa tiveram redução da resistência mecânica em torno de 5%. Além disso, a avaliação visual apontava alta degradação das misturas contendo apenas cimento, com perda de massa de 50%. Já os concretos produzidos com a mistura das duas pozolanas mantiveram-se íntegros durante todo o período do experimento.

A maioria dos trabalhos que investiga o ataque por sulfatos é realizada em argamassas. Poucos são os trabalhos que relatam a avaliação da resistência a sulfatos feita em corpos-de-prova de concreto, merecendo destaque Mehta e Polivka (1976), Osborne (1990) e Prudêncio Jr. (1993). Possivelmente isso se dê pelo extenso período

³ Cimentos CP I e CPI – RS, respectivamente (NBR 5732/1991).

de agressão exigido pelos concretos (superior a 180 dias) para que se possa acompanhar todo o processo de degradação.

Uma vez que muitos são os fatores que exercem influência na deterioração provocada pelo ataque de sulfatos, fica difícil a avaliação da agressão, bem como da análise do comportamento de diferentes materiais e técnicas. Para Prudêncio Jr. (1993) é preciso que cada caso seja particularmente estudado, adequando-se a composição de material ao tipo de agressividade e à vida útil da estrutura.

Prudêncio Jr. (1993), avaliou a degradação do concreto projetado devido à ação de sulfatos por meio de ensaios conjuntos de velocidade de penetração de íons sulfato, expansibilidade e resistência à tração na flexão. Os testes foram realizados em amostras cilíndricas (7,0 cm de diâmetro) de pequena espessura (6,3 mm em média). Segundo o autor, “essa geometria favorece a expansão e a variação das propriedades mecânicas já que a relação superfície de exposição/volume da amostra é bastante grande”.

Diante disso, o presente trabalho utilizará uma combinação das técnicas da expansibilidade e resistência à flexão, adotadas por Prudêncio Jr. (1993) para avaliação do comportamento do CAD contendo CCA com baixo teor de carbono frente ao ataque por sulfatos.

2.6 Reação Álcali-Agregado - RAA

A reação álcali-agregado ocorre entre algumas espécies de minerais presentes em certos tipos de agregados e hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, agentes externos, entre outros) que, em condições especiais, provocam a fissuração, aumento da permeabilidade, diminuição da resistência e, por fim, a deterioração do concreto.

Trata-se de uma reação lenta e complexa que foi reconhecida pela primeira vez em 1930, na Califórnia, Estados Unidos da América, por Stanton (HOBBS, 1988), com o surgimento de expansões generalizadas em estruturas de diversos prédios escolares, pontes, pavimentos e construções portuárias. Ao investigar a situação, na busca das causas do problema, o autor concluiu que as expansões estavam relacionadas ao uso de cimento com alto teor de álcalis e que a degradação ocorrida foi causada por uma reação álcali-sílica, sendo a opala, a fase reativa do agregado utilizado.

Basicamente, são três os tipos de reação descritos na bibliografia (FURNAS Centrais Elétricas, 1997; HASPARYK, 1999): álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato.

O termo *álcali* utilizado na expressão *reação álcali-agregado*, refere-se à quantidade total de álcalis equivalente ou equivalente alcalino em sódio ($\text{Na}_2\text{O eq (\%)} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$). Um cimento com baixo teor de álcalis deve apresentar um equivalente alcalino $\leq 0,6\%$. Contudo, a causa do ataque aos agregados é a elevada concentração de íons de hidróxido na solução dos poros do concreto executado com cimento rico em sódio e potássio e não o teor de sódio e potássio propriamente dito (PAULON, 1981).

A reação álcali-sílica surge quando a solução alcalina da pasta de cimento (ou mesmo de uma fonte externa) reage com alguns minerais do grupo do quartzo (opala, calcedônia,) e certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais (vidro *pyrex*).

Já a reação álcali-silicato é descrita como sendo aquela que ocorre entre os álcalis disponíveis no cimento e determinados tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), rochas metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (basalto), sendo mais lenta e mais complexa do que a reação álcali-sílica. (KIHARA,1993).

A reação álcali-carbonato acontece entre os álcalis disponíveis do cimento e alguns agregados rochosos carbonáticos (como o calcário dolomítico argiloso, por exemplo).

A manifestação do problema no concreto se dá pela ocorrência de fissuração em forma de mapa, seguida de expansão e deslocamento dos elementos estruturais, acompanhada de desagregação de fragmentos da superfície. Pode ocorrer, em alguns casos, a exsudação de gel sílico-alcalino resultante da reação, que se deposita na superfície do concreto. Todavia, as estruturas de concreto apresentam diferentes geometrias, presença ou não de armadura e estão sujeitas a diferentes solicitações. Dessa forma, o padrão acima descrito nem sempre acontece, o que por vezes dificulta um diagnóstico preciso da situação. (PAULON, 1981).

A intensidade e o efeito da reação também variam dentro de uma mesma estrutura. A ocorrência de agregados com bordas de reação, ao lado de outros sem borda, indica que a cinética de reação é heterogênea no concreto e que a solução da água de poros e a reatividade de cada fragmento são fatores determinantes.

Uma vez que o processo de reação é lento, anos podem se passar até que a fissuração se manifeste. A vida útil e a durabilidade da estrutura podem ser fortemente comprometidas em função da degradação causada pela reação álcali-agregado. Uma vez fissurado, o concreto fica exposto às condições ambientais e à ação de agentes agressivos, acelerando o processo de degradação (SILVEIRA, 2001).

A fissuração se dá pela formação de gel que é parcialmente solúvel em água e pode expandir ou contrair com o ganho ou a perda de água pelo concreto. Surge então uma pressão interna, responsável pela expansão e fissuração, devido a esta variação volumétrica.

Mesmo sendo um processo lento onde, por vezes, as estruturas demoram a apresentar sintomas de degradação, Charlwood (1995) *apud* Kurtis *et al.* (1998) relatam 104 barragens e vertedouros ao redor do mundo, onde a reação álcali-agregado se faz ativa. Kihara *et al.* (1998) listam 142 casos conhecidos no mundo da presença de RAA em estruturas hidráulicas dos quais 20 são no Brasil. Entre as obras brasileiras estão a Barragem Apolônio Sales (Rio São Francisco, divisa dos estados da Bahia e Alagoas), Barragem de Paulo Afonso (Paulo Afonso, BA), Barragem de Billings/Pedras (São Bernardo do Campo, SP). Recentemente foram comprovados 23 casos de RAA em fundações de edifícios na região metropolitana da cidade do Recife, em Pernambuco.

A presença de agregado reativo no concreto é fator determinante para que a reação se instale. A reatividade, segundo Kihara (1993), está associada às suas características mineralógicas e é influenciada por parâmetros como:

- a) granulação, uma vez que quanto mais fino o agregado, maior a superfície de reação, sendo, portanto, mais reativo;
- b) estrutura cristalina, já que quanto mais desorganizada e instável a estrutura, mais reativa é a fase. A reatividade dos vidros (amorfa), da calcedônia (microcristalizada a criptocristalizada), da tridimita (metaestável), da cristobalita (metaestável), do quartzo tensionado (deformado), é maior que a do quartzo bem cristalizado; e
- c) conteúdo de água de cristalização e dos grupos silanol (-SiOH), que conferem maior reatividade às fases como por exemplo, as opalas e os filossilicatos intemperizados (argilominerais como alita, vermiculita, montmorilonita).

O teor de agregado reativo também tem influência sobre a expansão da argamassa ou concreto. Quanto maior a proporção de sílica reativa presente, em relação ao conteúdo total de agregado utilizado, maior a expansão. Isso ocorre até atingir um ponto máximo, chamado de teor péssimo de agregado (HOBBS,1988). Aumentando mais o conteúdo de sílica reativa a expansão diminui.

A presença de álcalis na pasta de cimento também é fator importante. Dentre os elementos alcalinos, o cimento apresenta apenas sódio e potássio em quantidades significativas, originários da matéria-prima utilizada para produção do clínquer, em teores que variam de 0,3% a 1,5% (WEST, 1996).

A presença de umidade e as variações de temperatura também exercem influência sobre o desencadeamento do processo de reação álcali-agregado. O gel formado na reação aumenta de volume pela absorção de água. Assim, ambientes úmidos estão mais suscetíveis à RAA (SILVEIRA, 2001). Já a elevação da temperatura aumenta a cinética da reação, como nas reações químicas em geral.

2.6.1 As pozolanas e a reação álcali-agregado

Muitos estudos sugerem a eficiência das pozolanas em reduzir a reação álcali-agregado (HOBBS, 1988; DIAMOND, 1989 entre outros). Adições pozolânicas, como a cinza volante e a sílica ativa, têm se mostrado capazes de inibir a reação álcali-agregado e reduzir a expansão do concreto.

O comportamento do concreto com adições não foi totalmente entendido em relação à RAA. Chatterji (1989) considera a diminuição do hidróxido de cálcio como a maior contribuição no controle da expansão. De acordo com o autor, a presença de hidróxido de cálcio é um dos requisitos para a reação álcali-sílica e expansão, no sentido de que ela acelera a penetração de Na^+ , Ca^+ , OH^- e H_2O nos grãos reativos de sílica quebrando as ligações Si-O-Si ao mesmo tempo em que os íons de sílica tendem se difundir. A análise química da solução dos poros de pasta de cimento contendo sílica ativa mostrou que ocorre um aumento inicial na concentração de álcalis e íons hidroxila, mas depois de um dia a concentração desses íons foi progressivamente reduzida a valores muito baixos.

Já para Diamond (1989), o grande benefício está na redução da alcalinidade e pH da solução da água dos poros, conseguido pelo uso das adições minerais.

Ao estudar o mecanismo das reações pozolânicas e o controle da reação álcali-agregado, Bhatti (1985) conclui que as pozolanas reduzem a expansão pela produção de C-S-H secundário de baixa relação Ca/Si. Esses hidratos podem reter o álcali adicional, reduzindo o total de álcalis disponível para a reação com os agregados reativos. Os resultados mostraram que a quantidade de álcalis retidos aumentou com o aumento da adição de pozolanas.

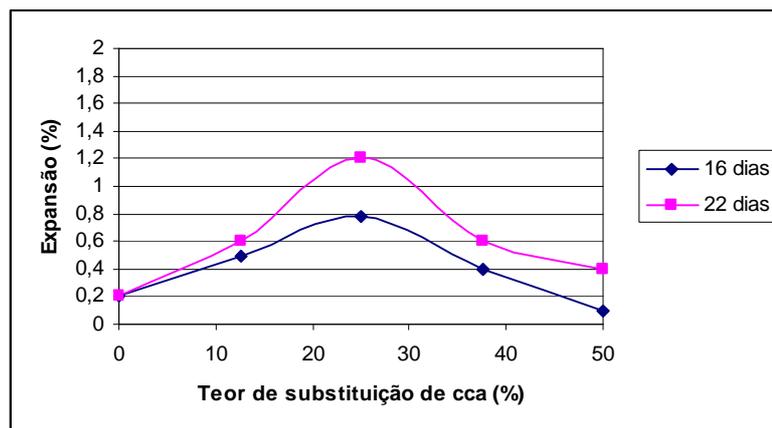
Para Urhan (1987), existe um teor ótimo de pozolana a ser adicionado, em função do conteúdo de álcalis do cimento, que levará à formação de uma quantidade máxima de C-S-H e uma quantidade mínima de expansão devida à reação álcali-agregado.

A utilização de adições minerais, juntamente com o uso de agregados não reativos e a limitação do teor de álcalis no cimento ou concreto, são apontados como uma boa alternativa na prevenção da reação álcali-agregado, com vários relatos de sucesso na literatura (THOMAS, 1996; BODDY, 2000). Autores como Urhan (1987) e Hobbs (1988) são mais cautelosos e indicam que o excesso de material pode ter efeito danoso na mistura. Tal comportamento é relacionado às características físicas do material utilizado (elevado diâmetro médio das partículas) e à interação química com soluções alcalinas (SILVEIRA, 2001).

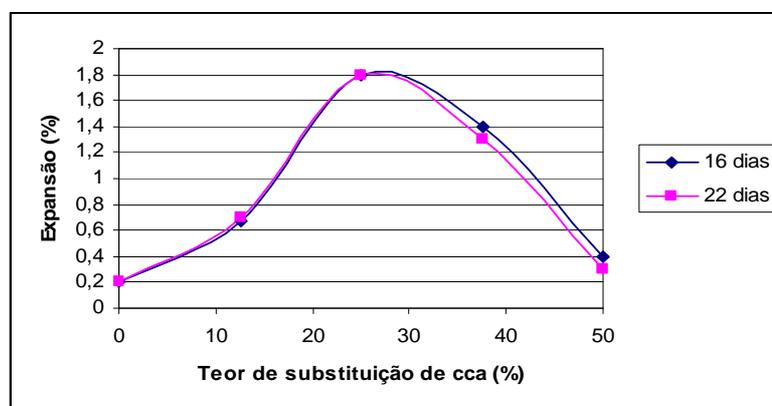
Trabalho realizado por Pettersson (1992) em argamassas moldadas com 10% de sílica ativa (granulada e *slurry sílica*) para realização de ensaios de corrosão, relata a fissuração ocorrida em amostras que foram imersas em solução de 1M NaCl a 20° C, saturada com Ca(OH)₂. Após período de 90 dias de exposição, as argamassas que continham sílica granulada apresentaram fissuração generalizada, enquanto as outras nada sofreram. Na análise da microestrutura das amostras fissuradas, realizada por microscopia eletrônica de varredura, foi constatada a existência de um produto de reação (gel) nos poros e fraturas do material e também a presença de sílica não reagida e fissuras partindo desses pontos.

Para Diamond (1997), a adição de sílica ativa, com diâmetro médio dos grãos muito acima dos comercialmente divulgados, pode apresentar comportamento de um agregado reativo, induzindo à reação, ao invés de preveni-la.

Contudo, poucos são os trabalhos que estudam o comportamento da CCA frente à RAA. Silveira (2001) relata o aparecimento de RAA violenta em concretos contendo cinza de casca de arroz. Em seu trabalho, a autora utilizou CP I S – 32, e duas cinzas de casca de arroz: uma gerada em leito fluidizado, proveniente do estado do Rio Grande do Sul, obtida com temperatura de queima entre 750° e 850°C; a outra CCA utilizada foi fornecida pela empresa *Powell Group*, proveniente dos Estados Unidos, com temperatura de queima entre 650° e 700°C. A primeira apresentava fases cristalinas e a segunda mostrou-se predominantemente amorfa. Foram utilizados teores de substituição de cimento por CCA (em massa) de 12,5, 25, 37,5 e 50%, para o ensaio acelerado ASTM C 1260 (2001), com relação água/cimento fixa em 0,47. Os resultados apontam que o máximo de expansão segundo o método analisado se dá para o teor de 25% de substituição, conforme mostra a Figura 2.4, indicando a existência de um intervalo de teor péssimo, no qual a CCA, promove o desenvolvimento de RAA.



(a)



(b)

Figura 2.1 – Teor péssimo, relativo à expansão máxima, aos 16 e 22 dias (a) CCA americana e (b) CCA brasileira (Fonte: Adaptado de SILVEIRA, 2001).

Assim, fica clara a necessidade investigação da CCA com baixo teor de carbono com relação aos aspectos ligados à RAA, especialmente por se tratar não de um novo material, mas de um material com características diferentes daquele já bastante investigado até os dias atuais.

2.6.2 Determinação da reação álcali-agregado

Vários são os métodos para investigação e avaliação da RAA. Trabalho realizado por Hasparyk (1999), apresenta uma revisão bastante ampla sobre o assunto e divide os procedimentos em dois grandes grupos: investigação de campo e investigação laboratorial. A seguir faz-se um breve relato sobre os principais deles.

No primeiro grupo encontra-se a observação visual das estruturas, onde as principais evidências da RAA são a fissuração em forma de mapa (Figura 2.2) e a presença de gel na superfície do concreto.



Figura 2.2: Fissura Tipo mapa em bloco de fundação
(Fonte: Revista RECUPERAR nº65)

Outra avaliação de campo utilizada é a observação do contraste de imagens, feita por meio do aparelho conhecido como *Spectroline*, que indica a presença de RAA “in loco” pelo contraste de imagens feito com luz ultra-violeta (UV). A superfície suspeita é delimitada, limpa e lixada e recebe uma solução de contraste contendo acetato de uralina. Em seguida, o aparelho é posicionado sobre a superfície e, na presença de luz

UV, observa-se a coloração do concreto. Caso haja alteração da cor para verde e amarelo fluorescente, pode-se sugerir a presença de produtos da reação álcali-agregado. (ASTM C-856/1995, *apud* HASPARIK, 1999).

Por fim, ainda no primeiro grupo de ensaios, cabe o monitoramento das estruturas, buscando medições que indiquem deslocamentos e deformações no interior das mesmas, bem como das juntas de dilatação (GOULART *et al.*, 1998).

A investigação laboratorial passa, inicialmente, pela análise petrográfica tanto da rocha (ASTM C-295, 1990) quanto do concreto (ASTM C-856, 1995). Devem ser coletadas todas as informações relativas às amostras, inclusive com uso de microscópio estereoscópico, a fim de se identificar aspectos gerais em superfícies fraturadas ou amostras polidas. Para o agregado, faz-se a caracterização petrográfica, enfatizando a identificação da textura, da estrutura e de minerais deletérios. Quando se trata de concreto, buscam-se informações como tipo do agregado, cor, porosidade, bordas de reação ao redor do agregado, presença de gel nos poros e microfissuração da matriz pela expansão do gel, entre outras (HASPARIK, 1999).

Esses parâmetros identificam os potenciais condicionadores da RAA, porém não são suficientes para avaliar o concreto, uma vez que a RAA depende de outros fatores (descritos em 2.6). Assim, a análise petrográfica do concreto deve ser acompanhada de ensaios de reatividade de argamassas e/ou concretos para que a análise com relação à RAA possa ser melhor conduzida.

Entre as avaliações laboratoriais, o Método OSIPOV, ou também chamado método térmico, baseia-se na premissa de que o agregado suspeito (dimensões de 20 a 50mm) contendo a fase reativa, ao ser aquecido (temperatura de 1000°C, por 60 segundos) se fragmentará, indicando que, em condições adequadas, há possibilidade de expansão. Contudo, a não fragmentação não é conclusiva, levando à necessidade de investigação complementar com outros métodos.

Já o método químico, descrito pela ASTM C-289/1994 e NBR 9774/1987, consiste na avaliação da potencialidade de reação álcali-sílica por meio da relação entre a sílica dissolvida e a redução de alcalinidade de uma solução NaOH. O agregado suspeito deve ter granulometria passante na peneira ABNT 0,30mm e retido na 0,15mm. Essa fração é imersa em solução de 1N de NaOH, por 24 horas a 80°C. Após este período, determina-

se a sílica dissolvida (método gravimétrico ou fotometria) e a redução de alcalinidade da solução. A Figura 2.3 mostra a classificação potencial dos agregados.

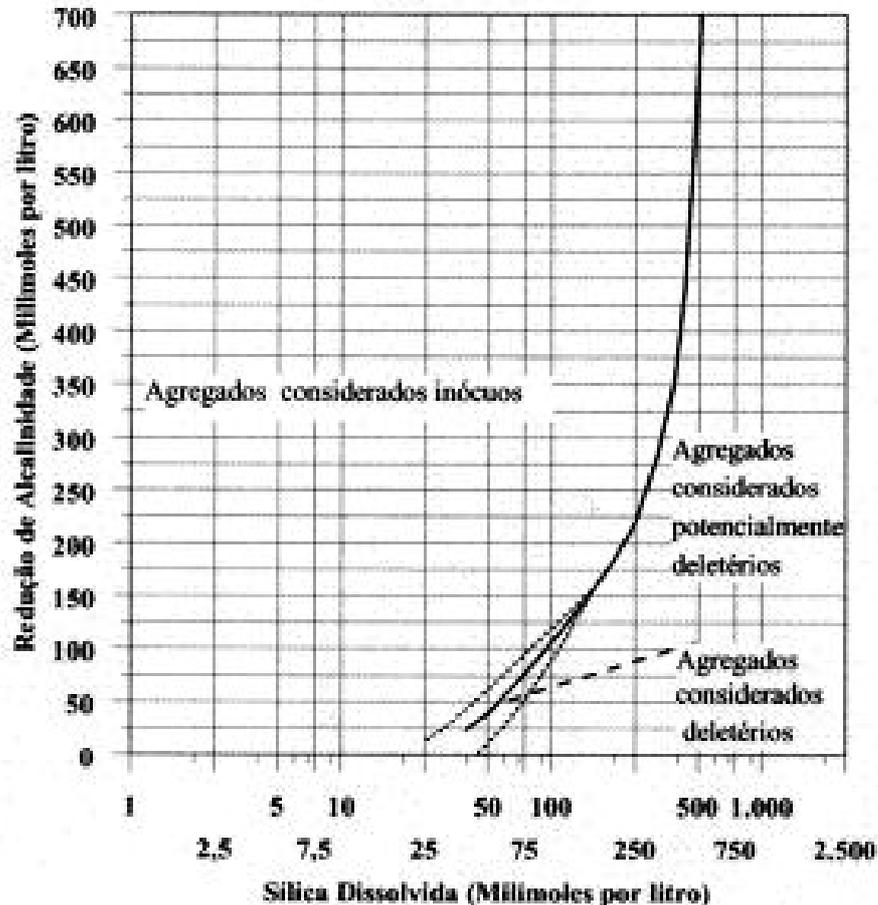


Figura 2.3: Método químico - Classificação da potencialidade do agregado
(Fonte: NBR 9774/1987)

O método das barras, indicado pela ASTM C 227 (1990) e pela NBR 9773/1987, consiste na variação do comprimento de quatro barras de argamassa de dimensões (25x25x285) mm, moldadas com agregados reativos em frações granulométricas que variam de 4,8mm a 0,15mm (ABNT), proporcionalmente divididos, preparadas segundo a proporção cimento:agregado de 1:2,25. A água da mistura é estabelecida a fim de se atingir uma consistência entre 105 e 120%⁴. As barras são imersas em recipiente hermeticamente fechado com atmosfera saturada de vapor de água, à temperatura de

⁴ Relação entre a abertura final do ensaio de consistência *flow table* e o diâmetro da base do cone de moldagem (12,5 cm), expressa em percentual.

38°C. As expansões são medidas após 24 horas (comprimento inicial), 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 12 meses e expressas em porcentagem de expansão em relação ao comprimento inicial. Valores que ultrapassem 0,005% aos três meses ou 0,10% aos seis meses, são considerados excessivos, podendo conduzir a reações nocivas.

Para a investigação de RAA em concretos, a ASTM C 1260/2001 permite a avaliação rápida do comportamento do material frente à reação. Consiste, basicamente, na imersão em solução de 1N de hidróxido de sódio, a temperatura de 80°C de barras de argamassa de (25x25x285) mm de dimensões. O traço para a moldagem das barras é fixo, 1:2,25:0,47, (cimento: agregados em frações granulométricas estabelecidas na norma: relação água/cimento). Às idades de 16 e 30 dias são feitas medidas de variações do comprimento das barras e os resultados são expressos em porcentagem de expansão, da média de três determinações. De acordo com a referida norma, expansões inferiores a 0,1% aos 16 dias apontam comportamento inócuo e superiores a 0,2%, indicam expansão deletéria potencial. Para o caso de expansões entre os intervalos citados, o ensaio deverá ser conduzido até os 30 dias quando serão feitas investigações adicionais, para confirmar se a expansão percebida é devida à reação álcali-agregado.

Embora controvertido por se tratar de um método acelerado, este método tem sido amplamente utilizado, especialmente por permitir que sejam testadas diferentes combinações de adições minerais e por isso será utilizado na investigação da CCA com baixo teor de carbono em relação à RAA.

3. CINZA DE CASCA DE ARROZ

3.1 Terminologia

3.1.1 Cinza de casca de arroz

Material resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica empregada, por exemplo, no processo de secagem e parboilização dos grãos, junto às beneficiadoras do cereal. Pode ser resultante também do processo de geração de outras formas de energia, como energia elétrica, em usinas termelétricas, ou ainda, de processos de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza.

3.1.2 Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono

De acordo com Maeda *et al.* (2001), são consideradas com baixo teor de carbono aquelas cinzas cujo carbono residual, determinado pelo ensaio de perda ao fogo, seja inferior a 3% . Todavia, a definição do material em função do resultado do ensaio de perda ao fogo pode não refletir o parâmetro mais importante buscado nesse material: a cor. Assim, uma definição mais adequada de cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono deve contemplar, além do teor de perda ao fogo, o clareamento significativo do material, em relação àquele que lhe deu origem, de forma que sua utilização em compostos à base de cimento Portland não altere, de forma significativa, a cor do produto final obtido.

3.2 Considerações iniciais e características

A cinza de casca de arroz constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e com diâmetro médio das partículas inferior a $0,1\mu\text{m}$ é uma pozolana altamente reativa segundo classificação proposta por Mehta (1990). Sua utilização como adição, para a produção de concretos, influencia beneficentemente tanto os aspectos relacionados à resistência mecânica, como os relacionados à durabilidade.

A casca do arroz é formada por uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa. É composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica em base anidra, proveniente do solo (HUSTON, 1972; BARTHA e HUPPERTZ, 1974; METHA, 1992).

A partir da queima incompleta da casca de arroz para obtenção de calor utilizado no processo de beneficiamento do cereal, cerca de 20% da massa da casca é convertida em cinza. A Figura 3.1 mostra a formação de uma estrutura celular porosa com alta superfície específica (50 a 100m²/g) que ocorre durante a queima da casca pela remoção da lignina e da celulose (MEHTA, 1992).

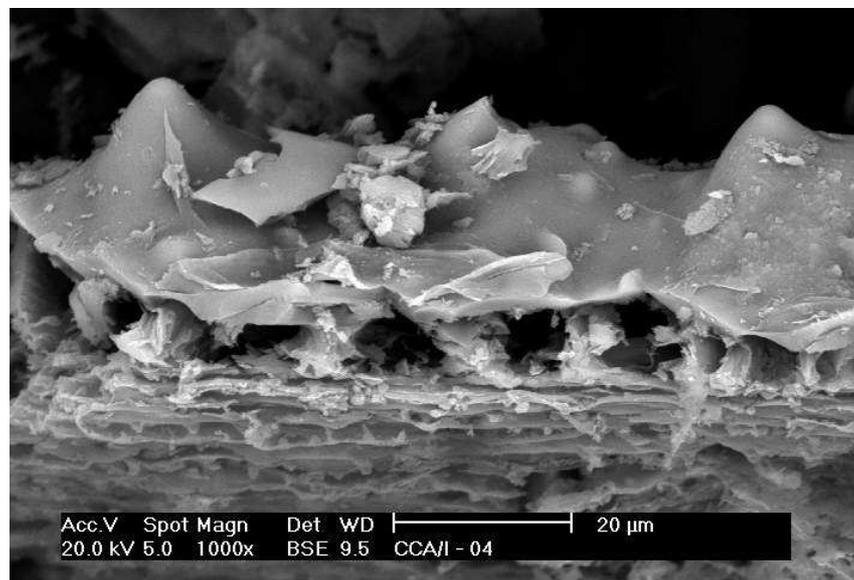


Figura 3.1 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz
(Fonte: DAFICO, 2001)

A cor da cinza pode variar. As mudanças de cor estão associadas à presença de impurezas, ao processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material, decorrentes da variação da temperatura de queima. Quanto mais escura maior o teor de carbono, indicando a presença de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação do material.

Ao avaliar a composição química da cinza de casca de arroz, utilizada por diferentes autores e produzidas sob diferentes condições de queima, em diversas regiões do mundo, Silveira (1996) concluiu que os resultados são bastante semelhantes, havendo

uma variação no teor de sílica entre 90 e 95%. Álcalis K_2O e Na_2O são as principais impurezas presentes e os teores de CaO e MgO não ultrapassam 1%.

As diferenças são evidenciadas quando se analisa a morfologia das cinzas obtidas sob diferentes condições de queima. O surgimento de formas estruturais diferenciadas, que ocorre com a variação de temperatura de obtenção do material, irá influenciar na sua capacidade em se combinar com os produtos de hidratação do cimento.

A reatividade do material vai depender da formação, durante o processo de queima, em função de diferentes temperaturas, de proporções relativas de sílica na forma cristalina e amorfa. Quanto maior o teor da última, mais quimicamente reativo será o material, porém, não necessariamente, apresentará o melhor desempenho.

Segundo Subbarao *et al.* (1973), a sílica cristalina apresenta claro polimorfismo até chegar à sílica fundida, com o aumento da temperatura, sendo encontrada à pressão atmosférica, sob diferentes fases: quartzo- α , quartzo- β , tridimita e cristobalita, sendo a primeira a mais estável à temperatura ambiente. Com a elevação da temperatura para $573^\circ C$, o quartzo- α transforma-se em quartzo- β , permanecendo estável até a casa dos $870^\circ C$. Desse nível de temperatura até o patamar de $1470^\circ C$, faz-se presente a forma tridimita que permanece até cerca de $1713^\circ C$, onde ocorre a modificação para a fase cristobalita. Além desse nível, ocorre a fusão da sílica. Já a estrutura da sílica amorfa é metaestável e tende a mudar lentamente para a forma cristalina, que é a mais estável. (ERNST, 1971 *apud* DAFICO, 2001).

De forma geral, dependendo do teor de material empregado e de características de dosagem, propriedades como alto teor de sílica amorfa, superfície específica elevada e diâmetro médio das partículas bastante reduzido, fazem da cinza de casca de arroz uma *superpozolana* e lhe conferem atributos importantes para uso como adição na produção de concretos.

Assim, a temperatura de obtenção da cinza de casca de arroz e o tempo de exposição a essa temperatura, somados à variação de superfície específica, serão os principais fatores intervenientes na qualidade do material como pozolana para concreto.

Contudo, mesmo sendo produzida em grandes quantidades em alguns países como China, Índia e Brasil, o que representa um transtorno do ponto de vista ambiental, a utilização da cinza de casca de arroz como adição mineral continua sendo

predominantemente experimental, não havendo relatos de seu uso em escala industrial na produção de concretos.

Dafico (2001) relata que a falta de visão comercial talvez tenha sido o motivo pelo qual diversos pesquisadores se detiveram apenas na busca de um material altamente reativo, não se preocupando em desenvolver um produto que além de propriedades pozolânicas, apresentasse cor clara (baixo teor de carbono), aumentando seu valor comercial.

3.3 Processos de obtenção da CCA

A partir do trabalho publicado por Mehta e Pitt (1977), para produzir cinza altamente reativa por meio da incineração controlada da casca de arroz, iniciaram-se os primeiros testes com o intuito de utilizar o material como adição a argamassas e concretos. Na década de 80, com o advento do CAD, a demanda por materiais com elevada reatividade se tornou mais intensa e a obtenção de um material que apresentasse características de reatividade semelhantes às da sílica ativa, conduziu à busca pela otimização da atividade pozolânica da CCA.

Estudos conduzidos com o intuito de determinar quais as condições ideais para obtenção de uma cinza de casca de arroz de alta reatividade, para produção de CAD, apontam para as seguintes conclusões (MEHTA e PITT, 1977; CALLEJA, 1983; SUGITA *et al.*, 1992; MAEDA *et al.*, 2001, entre outros):

- i. a reatividade da cinza é influenciada consideravelmente pela temperatura de queima da casca e pelo tempo de exposição a esta temperatura (tempo de retenção);
- ii. quanto maior for a superfície específica do material, maior será sua reatividade;
- iii. cinzas de boa qualidade podem ser obtidas com temperaturas abaixo de 800°C; e
- iv. o resfriamento brusco da cinza pode evitar a formação de fases cristalinas no material.

É provável que Mehta tenha sido quem mais publicou trabalhos sobre a CCA para concreto, destacando-se o desenvolvimento de uma fornalha para obtenção da cinza com condições controladas de temperatura (abaixo de 560°C) e tempo de exposição,

resultando em um material altamente reativo, porém com elevado teor de carbono, ou seja, um material de cor preta.

No Brasil, a maioria dos trabalhos desenvolvidos com cinza de casca de arroz para uso em concreto, desde o primeiro, realizado por Dafico *et al.* (1981), concentrou-se na aplicação do produto, não havendo preocupação com a fixação de condições de queima a fim de se produzir um material de cor clara, com reduzido teor de carbono.

Alguns trabalhos encontrados na literatura fazem referência à possibilidade de se obter cinza com reduzido teor de carbono, inclusive de cor branca. Os resultados, porém, não parecem ter sido obtidos de pesquisas voltadas para este fim (DAFICO, 2001), ou seja, o clareamento do material parece ter surgido apenas consequência de condições de queima variadas, tendo sido simplesmente relatado.

Essa busca por um processo produtivo que gerasse um material de alta reatividade pode ter sido o responsável pelo fato da CCA não ter entrado no mercado como pozolana. Isso porque se acredita que a cor seja um parâmetro importante a ser controlado e garantido no seu processo de produção a fim de que seu uso comercial passe a ser corrente. Focadas apenas nas propriedades pozolânicas, refletidas em parâmetros como a cristalinidade e superfície específica do material, as pesquisas deixaram de lado o fator comercial e não houve preocupação no sentido de descobrir as restrições do mercado consumidor em relação ao uso da CCA como adição em produtos à base de cimento Portland.

Trabalhos conduzidos com o objetivo de obtenção de CCA's com baixo teor de carbono referem-se à cor do material obtido como um parâmetro qualitativo, indicando o resultado como mais ou menos claro em relação ao material que lhe deu origem ou expresso apenas em função de seu teor de carbono residual. Sabe-se, porém, que partículas de carbono podem estar alojadas no interior da sílica, elevando o valor do teor de carbono residual da amostra sem, no entanto, alterar de forma significativa a cor do material resultante. Além disso, a avaliação visual da cor é muito relativa e depende da percepção do observador, o que indica que uma avaliação quantitativa da cor parece ser a mais indicada para classificação da CCA, associada, então, à redução do teor de carbono do material produzido.

A Comissão Internacional de Iluminação – CIE (1976) desenvolveu um sistema capaz de quantificar a cor de um material. Conhecido com CIELab, o sistema utiliza o espaço

da cor $L^*a^*b^*$, representado por uma esfera sólida, que representa o espaço tridimensional da cor (Figura 4.7). Neste sistema, L indica a luminosidade e a^* e b^* são coordenadas cromáticas que indicam a intensidade da cor num plano bidimensional. No sentido positivo (+), a coordenada a^* indica a inclinação ao vermelho e no sentido negativo (-), ao verde; já a coordenada b^* indica, no sentido positivo (+), o amarelo e no negativo (-) o azul (MINOLTA, 1998 *apud* POUHEY, 2006).

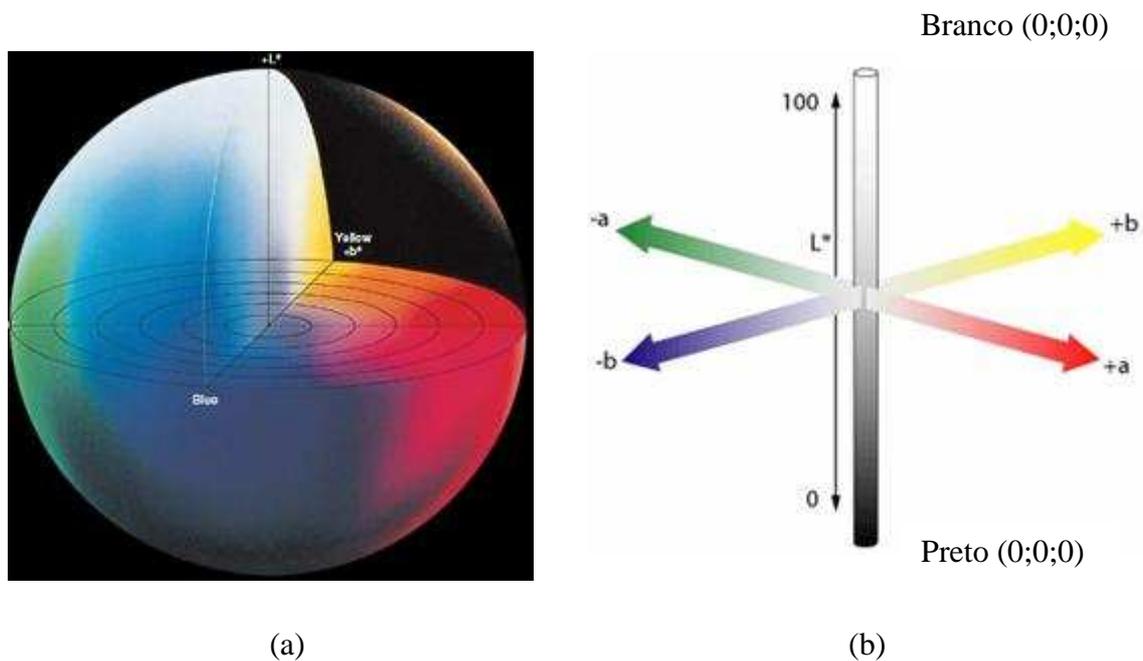


Figura 4. – Representações do espaço da cor CIE Lab - (a) sólido de cor; (b) eixos (MINOLTA, 1998 *apud* POUHEY, 2006)

Em um sistema industrial para a produção comercial de CCA com baixo teor de carbono, como o que está sendo proposto nesse trabalho, a monitoração de parâmetros de produção é de fundamental importância. A utilização de um sistema como CIELab para avaliação quantitativa da cor pode auxiliar nesse controle, a exemplo do que acontece na indústria cimenteira, para controle da produção de cimento branco.

3.4 Obtenção da CCA com baixo teor de carbono

Possivelmente o primeiro trabalho a relatar a obtenção intencional de cinza de casca de arroz com reduzido teor de carbono e, conseqüentemente, de cor branca, tenha sido o de Tutsek e Bartha (1977). Segundo os autores, o fator limitante para a obtenção de uma

cinza com baixo teor de carbono e alta reatividade é a taxa de aquecimento do material antes da combustão propriamente dita. Os autores descrevem um processo de produção de CCA branca em forno elétrico e indicam que é necessário primeiro o aquecimento do material a uma taxa entre 10°C e 40°C por minuto para a gaseificação. Posteriormente ocorre a combustão. Todavia, percebem-se algumas limitações nesse processo. Essa taxa representa a taxa média de aquecimento de um forno elétrico que possui regiões onde a temperatura subiu muito mais rápido que isso, tendo em vista que a resistência elétrica aquece a uma taxa muitas vezes maior que a estabelecida, para que possa fornecer calor ao volume total do forno. Assim, em alguns pontos do forno, a temperatura de aquecimento do material pode ser muito mais elevada, o que, no momento da combustão, pode conduzir à cristalização do material e conseqüentemente, à redução de sua reatividade.

Yamamoto e Lakho (1982), preocupados com os elevados investimentos necessários à produção de cinza de casca de arroz com alta reatividade pelo método patenteado por Mehta e Pitt (1977), o que seria uma dificuldade adicional em países pobres onde a disponibilidade da matéria-prima é alta, apresentam outras maneiras de se obter o material em escala comercial e com custo reduzido. A partir da queima da casca realizada em mufla, em diferentes temperaturas e tempos de exposição, com e sem suprimento de ar durante o processo, bem como diferentes formas de resfriamento, os autores obtiveram cinzas com diferentes reatividades e teores de carbono. As melhores cinzas foram aquelas produzidas em temperaturas mais baixas, cujo resfriamento à temperatura ambiente tenha se dado instantaneamente após a queima e que tenha recebido suprimento de ar constante durante o processo de queima.

O material assim produzido foi praticamente todo de cor clara, com uma fina camada de material escuro na parte inferior da porção queimada. Separando a parte clara da escura, os autores concluíram que a porção isenta de carbono responde por uma parcela maior de reatividade do material.

Nas mesmas condições, porém sem o suprimento de ar constante durante o processo de queima, a CCA obtida foi de cor escura, com alto teor de carbono. Em um processo chamado de requeima, por um período de uma hora, com suprimento de ar, a CCA originalmente escura, foi clareada com sucesso. Os resultados de ensaio dos materiais apontaram que a CCA com baixo teor de carbono é mais reativa que aquela com alto teor de carbono, indicando que, ao contrário do que defende Metha (1977) e mais

recentemente, Pouey (2006), o carbono livre presente pode ser prejudicial à reatividade da CCA em compostos à base de cimento Portland, conforme é evidenciado na Figura 3.2.

Para a obtenção de cinza com as características acima descritas de cor e reatividade, em escala comercial e com reduzidos custos de produção, Yamamoto e Lakho (1982), indicam o uso da energia da própria casca como combustível nas seguintes situações:

- (i) Queima a céu aberto, numa pilha de casca cônica, sendo ateado fogo, com querosene, no topo da pilha e deixando o material queimar até completa combustão;
- (ii) Combustão em uma cúpula de ferrocimento, com paredes perfuradas para garantir a circulação de ar necessária ao clareamento do material; e
- (iii) Queima em uma pilha revestida por argamassa de barro, também com paredes perfuradas e com uma chaminé central, facilitando a circulação de ar no material.

Apesar de serem soluções que exigem reduzido investimento para o processo de combustão, o tempo necessário para a queima do material pode ser variável, uma vez que a casca de arroz possui a característica de ser um isolante térmico. Desta forma, a progressão da frente de combustão para o interior da massa de material se dará com dificuldade pela falta de suprimento de ar, que se não existir de forma forçada, se dá de maneira muito pobre, dificultando o processo de queima e clareamento da cinza (DAFICO, 2001).

Além disso, não há como controlar a temperatura de queima nesses processos. Assim, a variação da temperatura que poderá existir dentro da massa de casca a ser queimada poderá gerar um produto de reatividade variada. A homogeneização da cinza gerada, feita durante o processo de moagem do material, necessário para que se obtenha uma superfície específica adequada, pode eventualmente conduzir a um material reativo.

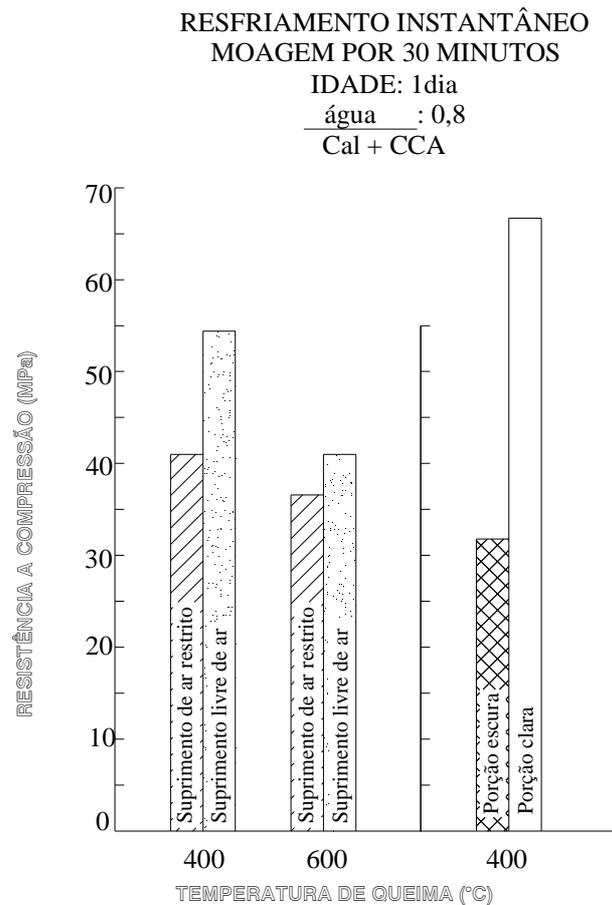


Figura 3.2 – Efeito das condições de queima e do teor de carbono presente na reatividade da CCA (Fonte: Adaptado de Yamamoto e Lakho, 1982).

Entretanto, muito da reatividade potencial do produto poderá ser perdida devido à cristalização do mesmo, ocorrida pela existência de picos de temperatura em determinadas regiões de queima (WEBER, 2001).

Cinzas de casca de arroz sem a presença de carbono também foram obtidas por diversos autores a partir do tratamento químico do material. Na maioria das vezes o objetivo desses tratamentos era produzir silício puro a partir da casca de arroz, para ser utilizado na produção de fotocélulas.

Estudos realizados por Chakraverty *et al.* (1985), sobre a decomposição térmica da CCA tratada e não tratada com HCl e H₂SO₄, mostraram que a perda de massa do material ocorre em três estágios: (1) perda de umidade, (2) liberação de substâncias voláteis e (3) queima do material combustível. Os intervalos de temperatura para cada

estágio indicaram que o tratamento químico prévio reduz em 40°C (de 690°C para 650°C) a temperatura exigida para que a CCA tratada complete a combustão.

Em 1988, os mesmos autores avaliaram o efeito do tratamento ácido da casca de arroz para remover suas impurezas. As amostras de casca moídas foram lixiviadas em diferentes concentrações de HCl, à temperatura de $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$, por duas horas. Após esse período as amostras foram lavadas em água quente e, posteriormente, secas em estufa. A seguir passaram por tratamento térmico para avaliar qual o tempo e temperatura de queima levariam à obtenção de cinzas brancas (sílica pura). A Tabela 3.1 reproduz os resultados obtidos com esta técnica.

Tabela 3.1 – Efeito do tratamento ácido sobre a temperatura e tempo de exposição, necessários para produção de CCA branca amorfa.

Tratamento	Temperatura ($^\circ\text{C}$)									
	300		400		500		600		700	
	Tempo (h)	Cor obtida	Tempo (h)	Cor obtida	Tempo (h)	Cor obtida	Tempo (h)	Cor obtida	Tempo (h)	Cor obtida
CCA não tratada	24	Preta	24	Marrom	5	Marron Suave	3,5	Marron Suave	1,5	Marron Suave
1 N HCl	24	Preta	24	Marrom	5	Marron Suave	3,5	Branca	1,5	Branca
3 N HCl	24	Preta	24	Marrom	5	Branca	3,5	Branca	1,5	Branca
5 N HCl	24	Preta	24	Marrom	5	Branca	3,5	Branca	1,5	Branca

Fonte: Adaptado de Chakraverty *et al.* (1988).

As cinzas obtidas pela combustão completa de amostras tratadas com ácido mostraram-se completamente brancas para as temperaturas acima de 500°C. As cinzas não tratadas, por sua vez, ficaram de cor marrom. A Figura 3.3 mostra o difratograma de raios-X das cinzas sob diferentes tratamentos químicos.

Independente do tratamento utilizado, as cinzas obtidas por este processo não apresentaram picos de cristalização na difração de raios-X, mostrando-se amorfas, o que indica que o tratamento ácido não afetou a estrutura da sílica.

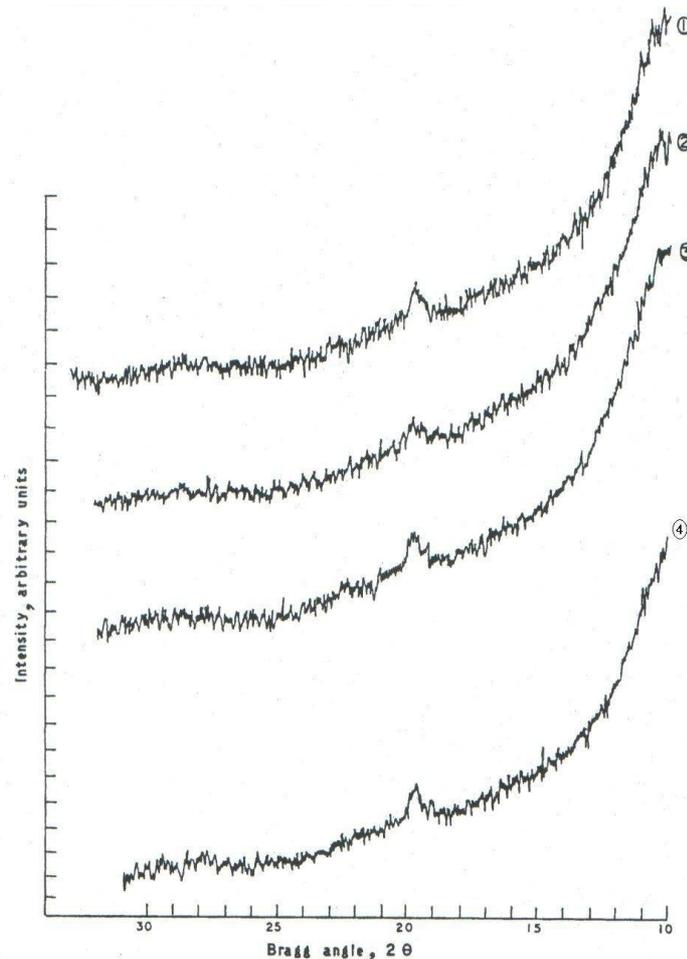


Figura 3.3 – Difração de Raios-X das cinzas obtidas com tratamento ácido –
(1) 1 N HCl; (2) 3 N HCl; (3) 5 N HCl e (4) CCA não tratada
(Fonte: CHAKRAVERTY *et al.*,1988).

Krishnarao *et al.* (2000) concluíram que um tratamento prévio com 3M de HCl evitou a formação de partículas escuras, que ocorrem no processo de calcinação a baixas temperaturas, resultando em um produto com baixo teor de carbono e cor branca.

Todavia, são poucos os trabalhos que se utilizam dessa técnica para a obtenção de sílica reativa e sua utilização em concretos. Apesar dos bons resultados obtidos nesses e em outros trabalhos, dentro da linha do tratamento químico da casca antes da queima para produção de sílica pura, o processo gera outros resíduos, os ácidos, que são altamente perigosos e poluentes. É provável que esse seja o motivo pelo qual a indústria não tenha se interessado pela produção em grande escala de CCA com baixo teor de carbono a partir dessa técnica. Além disso, o processo não se apresenta muito prático pelas várias fases de lavagem e secagem do material, somada ao tempo que isso exige. O trabalho

realizado por Hussain (1990) concluiu que mesmo sendo possível obter-se um material com 99,85% de pureza a partir do tratamento químico da casca de arroz e posterior redução com alumínio, cálcio, magnésio, dentre outros elementos, o processo se mostra inviável economicamente para produção em escala comercial.

Sugita (1992) relata que muitos produtores de arroz, para darem fim às sobras de casca do cereal, por ocasião da colheita, queimam lentamente o material em grandes pilhas a céu aberto durante dias e que o resultado disso é uma cinza de cor branca ou rosa.

A partir dessa observação, o autor propôs um método para obtenção de cinza branca de alta reatividade por meio da queima de uma pilha de casca, onde uma chaminé no centro possibilita a circulação do ar. Com isso, há certo controle da velocidade de queima, evitando-se altas temperaturas e longos períodos de queima que poderiam gerar cinzas cristalinas e, conseqüentemente, menos reativas. A Figura 3.4 apresenta, de forma esquemática, o sistema intermitente proposto por Sugita (1992).

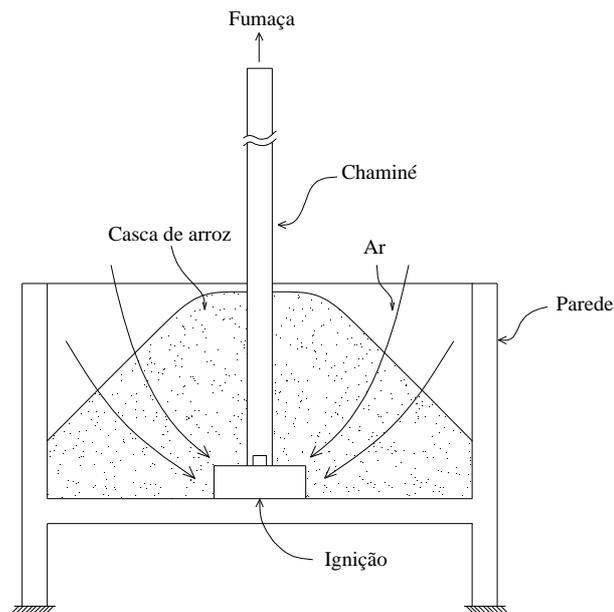


Figura 3.4 – Diagrama esquemático do sistema de queima patenteado por Sugita (1992).

No mesmo estudo, Sugita (1992) propõe um novo caminho para produção de CCA branca que chama de “método de queima em dois passos”, partindo da queima da casca crua, em um forno semi-industrial contínuo. Na primeira etapa, a casca é carbonizada a uma temperatura entre 300 e 350°C para retirada da água e da matéria orgânica presentes, em uma atmosfera de redução. A segunda etapa consiste na elevação da

temperatura para que a combustão se complete. Dessa forma, segundo o autor, o produto resultante é um fino pó branco, com alta reatividade. Além disso, o sistema prevê o reaproveitamento da energia gerada no processo. A Figura 3.5 reproduz o diagrama de temperatura do método apresentado pelo referido autor.

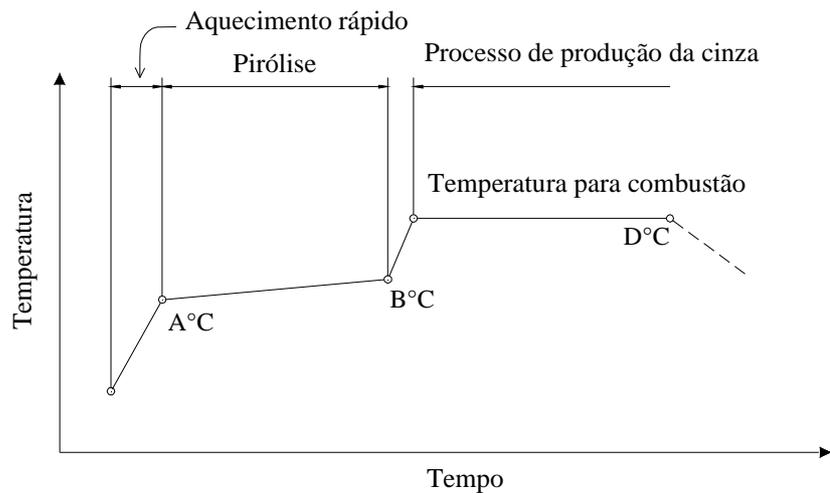


Figura 3.5 – Diagrama esquemático do método dos dois passos (Fonte: SUGITA, 1992)

Em trabalho publicado em 1997, utilizando cinzas provenientes dos processos relatados acima, Sugita *et al.* concluem que o material, em ambos os casos, é altamente reativo quando a fase de combustão se dá em níveis de temperatura variando entre 500°C e 600°C. Para temperaturas inferiores a essas as cinzas ainda contém elevado teor de carbono presente; em temperaturas superiores, já apresentam material na fase cristalina.

Maeda *et al.* (2001) propõem um forno com agitação para produção de CCA com baixo teor de carbono. A casca de arroz entra no forno por meio de um alimentador helicoidal (tipo rosca sem fim), cai sobre um leito e é remexida continuamente por um agitador. A queima se dá logo acima do leito e a retirada do material volátil é garantida pelo suprimento contínuo de ar. Embora a temperatura da chama de volatilização chegue a 1000°C, a temperatura da CCA é controlada e não excede os 600°C. De acordo com os autores, a taxa de alimentação do forno influencia diretamente a temperatura de queima e a superfície específica do material obtido. Quando a taxa de alimentação foi de 14kg/h, a superfície específica do material foi de 100m²/g; com a redução da taxa de

alimentação para 11kg/h, a superfície específica subiu para 150m²/g. A temperatura de queima também exerce influência sobre a superfície específica alcançada, havendo uma tendência de aumento desta propriedade com a diminuição da temperatura de queima. Para temperaturas de 400°C no leito e 500°C acima do leito de CCA, a superfície específica chegou ao patamar de 100m²/g. Com a elevação das temperaturas para 500° e 700°C, respectivamente, a superfície específica caiu para 50m²/g. As taxas de carbono residuais nas cinzas produzidas ficaram abaixo de 3%. Para os autores, CCA de alta qualidade (elevada superfície específica e baixo teor de carbono) pode ser obtida no processo proposto desde que a temperatura não exceda 400°C.

Inspirado nos trabalhos de Tutsek e Bartha (1977) e Sugita *et al.* (1997), e na busca por um material atraente comercialmente, uma linha de pesquisa teve início no GTec/UFSC, com os trabalhos desenvolvidos por Dafico (2001) e Weber (2001).

Dafico (2001) realizou a queima da casca de arroz em leito fixo, com o objetivo de produzir cinzas de casca de arroz de alta reatividade e com baixos teores de carbono (cinzas brancas) ou reduzir os teores de carbono de cinzas já existentes, obtendo cinzas com teores de carbono reduzidos (material de cor cinza) pelo processo de requeima.

O autor propõe um sistema constituído por uma fornalha de leito fixo, feita em chapas de aço, construída originalmente com duas câmaras separadas por uma parede de chapa de aço e isolada termicamente do meio externo por meio de tijolos refratários. A Figura 3.6 mostra uma fotografia da fornalha de leito fixo para queima intermitente idealizada por Dafico (2001).

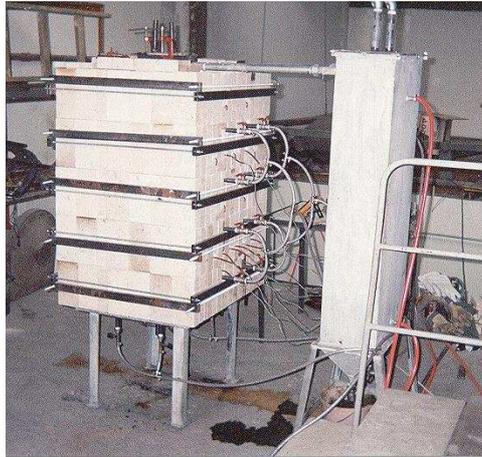


Figura 3.6 – Fornalha de leito fixo usada para queima de casca de arroz
(Fonte: DAFICO, 2001).

Uma vez que o fator limitante para se conseguir cinzas brancas está na taxa de aquecimento do material e no suprimento de ar durante o processo (TUTSEK e BARTHA, 1977; SUGITA, 1992), o experimento desenvolvido por Dafico (2001) realizou a queima da casca de arroz em duas etapas. Na primeira, o ar era injetado no material de cima para baixo e a ignição era feita por baixo do leito de casca de arroz. Com o aquecimento do fundo do leito, tinha início a produção e volatilização de compostos de fácil combustão. Uma vez aquecidos e encontrando o ar rico em oxigênio proveniente da parte superior, os compostos queimavam e geravam calor suficiente para pirolizar e volatilizar mais compostos combustíveis, na região imediatamente acima da anterior e assim por diante. Essa frente progredia para cima deixando para trás cinzas com muito pouco carbono fixo. Na segunda etapa de queima, como os voláteis já tinham sido consumidos, o oxigênio do ar era consumido pelo carbono fixo, aparecendo então uma nova frente de combustão, de cima para baixo, que deixava para trás cinzas isentas de carbono a ser queimado. A Figura 3.7 trás um esquema das etapas de queima do processo desenvolvido pelo autor.

A fim de limitar a temperatura de queima em 700°C, produzindo assim cinzas amorfas e também possibilitar uma queima mais rápida, foi feita a instalação de tubos de injeção de ar para que, logo após a passagem da frente de combustão de voláteis, a combustão do carbono fixo fosse iniciada. A Figura 3.8 mostra um corte de uma das câmaras da fornalha de Dafico (2001), indicando a localização dos tubos injetores de ar e dos termopares utilizados para controle da temperatura.

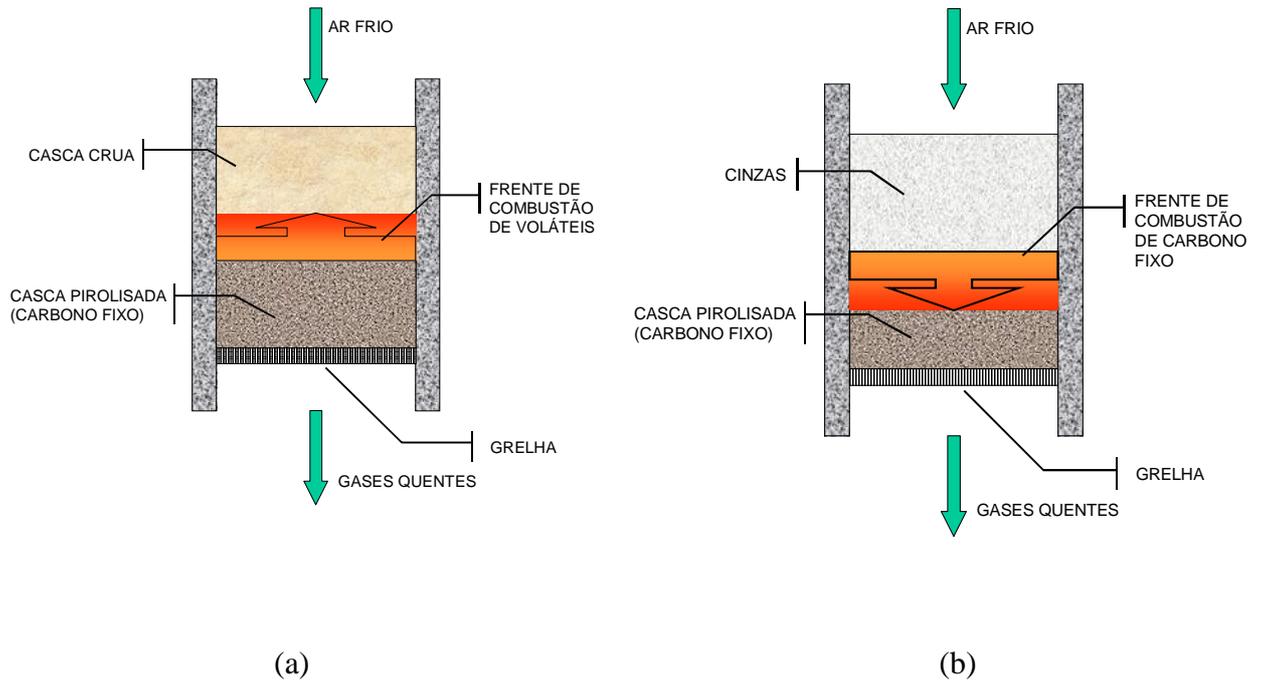


Figura 3.7 – (a) Primeira etapa e (b) segunda etapa de queima da casca de arroz em leito fixo (Fonte: DAFICO, 2001).

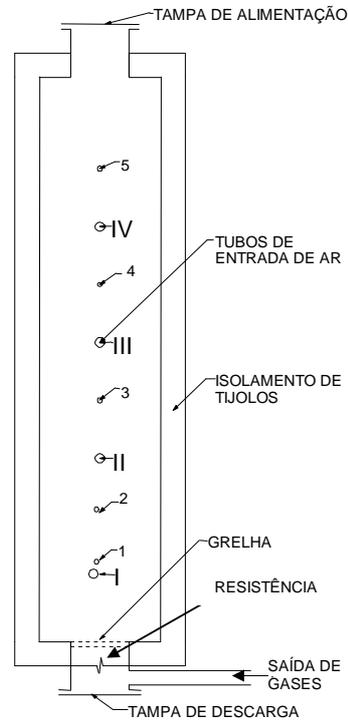


Figura 3.8 – Corte vertical da câmara de combustão da fornalha: I, II, III e IV – tubos injetores de ar; 1, 2, 3, 4 e 5 - termopares (Fonte: DAFICO, 2001).

A Figura 3.9 mostra os perfis de temperatura registrados pelos termopares ao longo da queima da casca crua, indicando que as temperaturas não ultrapassaram 800°C.

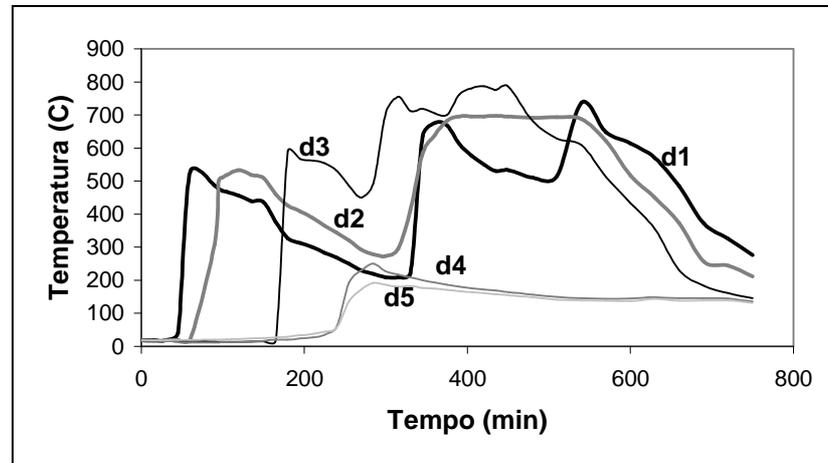


Figura 3.9 – Temperaturas medidas pelos termopares (Fonte: DAFICO, 2001).

Na região central da fornalha, as cinzas resultantes apresentavam cor branca, porém junto às paredes da fornalha, em uma faixa de aproximadamente 2 cm, a cinza resultante teve cor preta, o que foi atribuído ao fato de que as chapas de aço podiam conduzir calor por outros caminhos, havendo um resfriamento da região. O mesmo ocorreu quando da requeima da cinza de casca de arroz, obtida pela queima da casca em leito fluidizado, misturado com a casca crua, ficando estas, ao final do processo, de cor cinza claro ao centro e preta junto às paredes da fornalha.

Ao comparar a reatividade das diferentes cinzas de casca de arroz por ele obtidas, com a reatividade química da sílica ativa e da cinza volante, utilizadas como padrões de referência, Dafico (2001) observou que:

- (i) As cinzas de casca de arroz apresentaram maior reatividade que as outras pozolanas estudadas;
- (ii) A reatividade química das cinzas aumentava com a diminuição do teor de carbono nelas presente; e
- (iii) O material obtido poderia ser utilizado com vistas à produção de concretos e argamassas, à base de cimento Portland.

A partir daí, Weber (2001) desenvolveu um forno piloto, com leito fixo, intermitente, com capacidade para 1m³ de material, na tentativa de produzir a cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono em escala comercial. Novamente, após várias tentativas e

diferentes proporções de casca/cinza, foi possível obter uma cinza que apresentou boas propriedades pozolânicas. A Figura 3.10 apresenta o forno piloto.

Contudo, mesmo com as adaptações sugeridas por Dafico (2001), como melhor distribuição do ar no interior do forno e utilização de paredes melhor isoladas, o material produzido por Weber (2001) apresentou-se muito heterogêneo devido à dificuldade de aeração do mesmo, o que é essencial para uma boa queima.

O registro/controlado de temperatura, feito por meio de termopares instalados no interior do forno, mostrou variações bruscas, mesmo a pequenas distâncias, como pode ser observado na Figura 3.11.

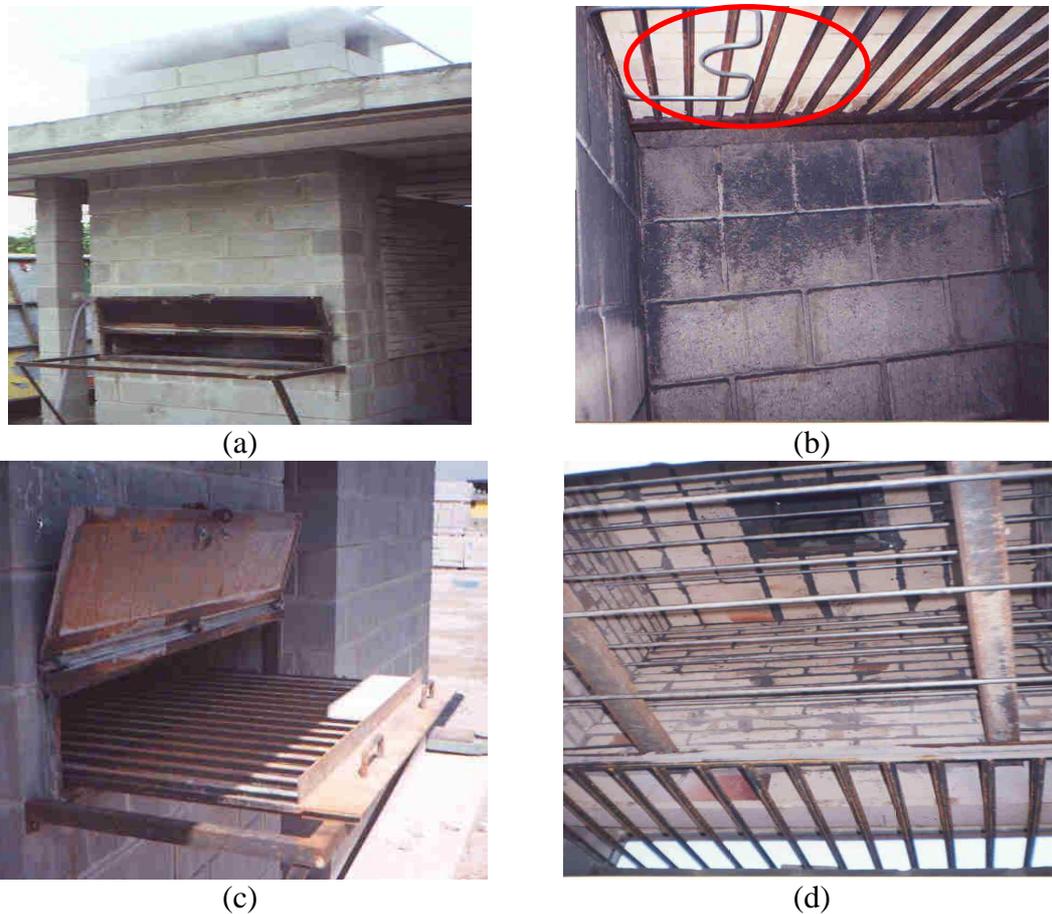


Figura 3.10 – Vista geral do forno piloto de Weber (2001): (a) Vista geral do Forno (b) Depósito da cinza após a queima, destacando a localização das resistências blindadas. (c) Detalhe da grelha deslizante e (d) Vista interna do forno, mostrando a tubulação de ar comprimido.

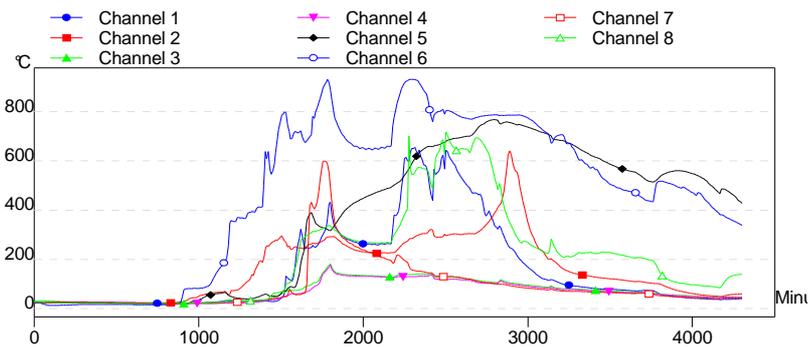


Figura 3.11 – Variação de temperatura no interior do forno piloto, para uma mistura de 50% de casca crua e 50% de CCA residual (Fonte: WEBER, 2001).

O material resultante da queima mostrava-se bem claro próximo às saídas de ar e, a poucos centímetros destas, a cinza resultante da queima da mistura entre a CCA residual e a casca crua, continuava de cor preta. Logicamente, com a mistura desse material de cor heterogênea ocorrida durante sua moagem, feita após sua saída do forno, foi possível a obtenção de um material de cor cinza clara que, ao ser misturado com cimento, não alterava a cor do concreto (ou argamassa) com ele produzido.

Todavia, tanto no trabalho de Dafico (2001), como no de Weber (2001), o tempo total requerido para que o processo de volatilização e combustão da casca se desse por completo foi muito longo, alcançando seis e treze horas, respectivamente. Do ponto de vista da indústria, isso pode inviabilizar a produção dessa pozolana em escala comercial. Além disso, a falta de homogeneidade do produto em ambos os processos continuava a ser um problema, em se tratando da hipótese de produção em escala comercial.

Dessa forma, o forno protótipo proposto por Weber (2001), para produção de CCA com baixo teor de carbono, necessitava de adaptações e mudanças, principalmente na distribuição do ar em seu interior, a fim de colocar o máximo de material em contato com o ar para homogeneização da cor do produto final.

Com base nos trabalhos de Dafico (2001) e Weber (2001) e buscando a produção de um material homogêneo, surgiu a idéia do presente estudo: o desenvolvimento de um forno rotativo semelhante àqueles utilizados para a produção do cimento Portland, capaz de colocar todo o material a ser queimado em contato com o ar e, assim, produzir uma cinza homogênea, com baixo teor de carbono. As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 mostram o esquema do forno rotativo idealizado e o protótipo construído.

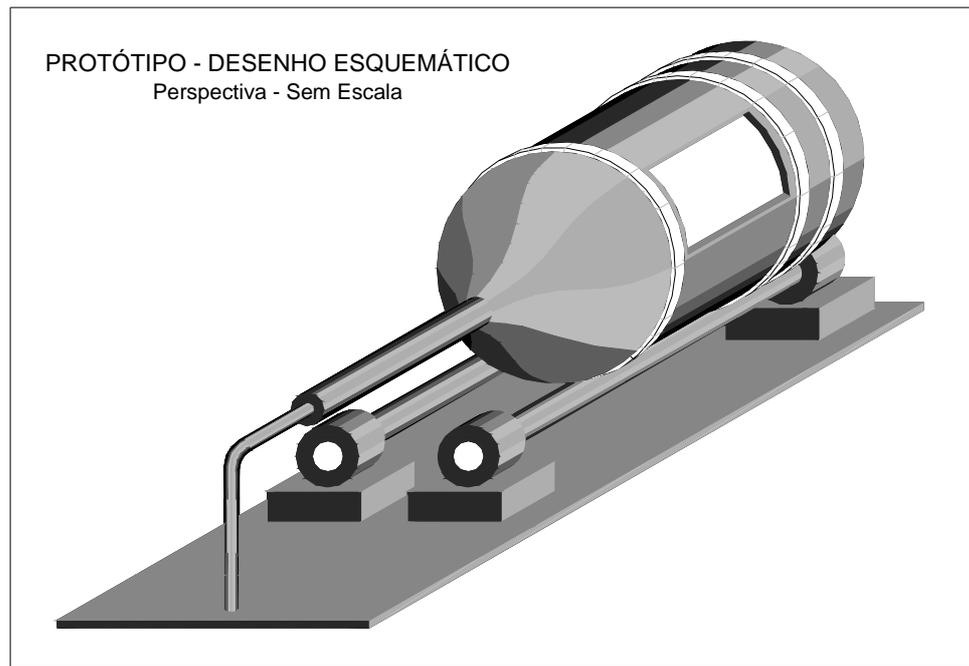


Figura 3.12 – Croqui do forno rotativo idealizado

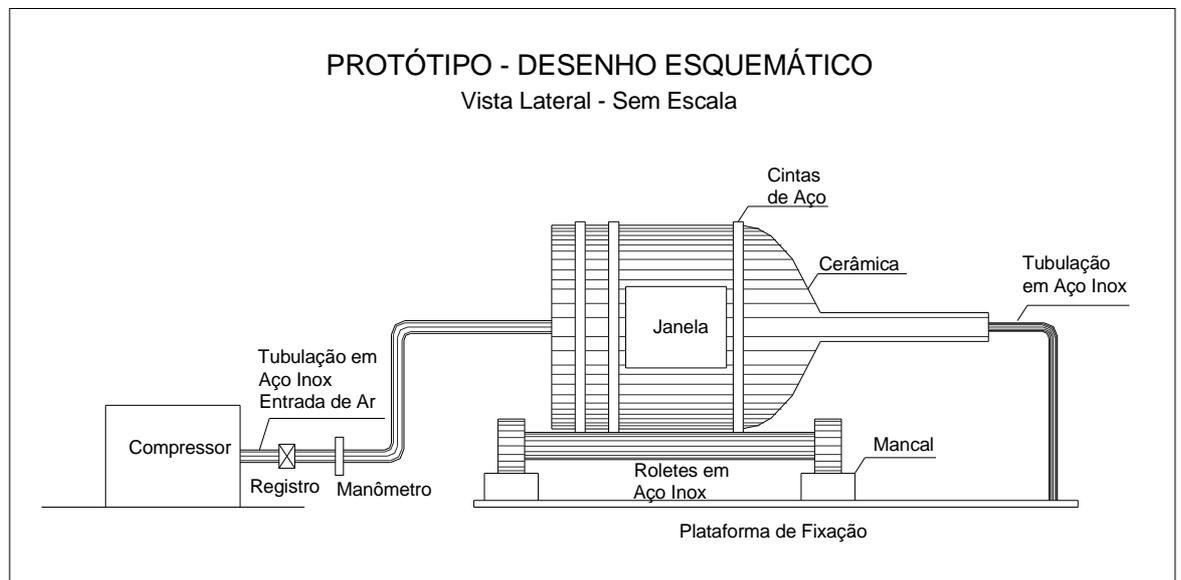


Figura 3.13 – Desenho esquemático do forno rotativo idealizado



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14 – Protótipo do forno rotativo idealizado (a) vista externa; (b) vista do fundo; (c) detalhe do revestimento interno com material refratário.

Paralelamente, a Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda, uma empresa privada da região de Gaspar – SC, demonstrou interesse no desenvolvimento e aprimoramento de um forno semelhante, com o mesmo objetivo. Buscando somar forças para a pesquisa e desenvolvimento de uma metodologia de reciclagem mais eficaz e apropriada para a cinza de casca de arroz, com o intuito de viabilizar a produção comercial dessa pozolana em unidades industriais, o desenvolvimento do presente trabalho se voltou ao aperfeiçoamento do processo industrial iniciado pela empresa citada.

Apesar do forno em fase de desenvolvimento e de já ter obtido cinzas de cor clara, o sistema de queima da empresa precisava ser otimizado, no sentido de viabilizar a produção da pozolana em escala comercial e oferecer o material como uma alternativa para a produção de concretos de alto desempenho. A pozolana hoje utilizada em grande escala para este fim, a sílica ativa, possui alto valor comercial e uma pozolana alternativa poderá representar reduções significativas no custo da produção do CAD.

Recentemente, pesquisadores do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, também iniciou pesquisas com objetivo de obtenção de CCA's com teores de carbono reduzidos. Trabalho publicado recentemente por Pouey (2006) verificou a viabilidade técnica do emprego de CCA residual na confecção de cimento Portland composto e/ou pozolânico, aplicando tratamentos físicos, químicos e/ou térmicos. Os resultados obtidos por Pouey (2006) indicaram que os tratamentos térmico e químico resultaram em um clareamento significativo do material produzido (medido no sistema CIELab) portanto não produzindo cimentos escuros.

3.5 Métodos para Determinação da Reatividade

Os procedimentos descritos a seguir são aplicados à avaliação de pozolanas e, portanto, aplicam-se também à CCA.

Para Swamy (1993), os métodos para a avaliação da atividade pozolânica são uma combinação de muitos fatores, que na maioria das vezes, não podem ser totalmente controlados. As características físicas e/ou mineralógicas do material, a proporção utilizada, aliada a fatores externos como o cimento utilizado, a

relação água/materiais cimentantes, temperatura e condições de cura, são determinantes no resultado destes testes. Segundo o autor, os requisitos básicos para um método de ensaio seriam: (i) ser capaz de distinguir entre materiais pozolânicos ou não; (ii) fornecer informações sobre o grau de atividade pozolânica da mistura, além de dados sobre o desenvolvimento de resistência da mesma e (iii) permitir a avaliação dos resultados em um curto espaço de tempo, para que eles possam ser utilizados o quanto antes pela indústria da construção.

Todavia, há uma grande diversidade de métodos de ensaio utilizados. No Brasil, existem normas para avaliação da atividade pozolânica de um material, baseadas na resistência mecânica das misturas ou em ensaios químicos. Uma descrição sucinta destes métodos é feita a seguir.

a) NBR 5751/1977 - Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal: estabelece uma argamassa de cal no traço 1:9 em massa, na qual a quantidade de pozolana adicionada (em massa) é dada por:

$$\frac{2 \text{PHC} \gamma_{\text{pozolana}}}{\gamma_{\text{cal}}} \quad (3.1)$$

Onde:

PHC é a quantidade de hidróxido de cálcio utilizado (96 g, para 3 corpos-de-prova);

γ_{pozolana} é a massa específica da pozolana; e

γ_{cal} é a massa específica da cal.

A quantidade de água da mistura é aquela necessária para um índice de consistência *flow table* de (225 ± 5) mm, determinado segundo a NBR 7215/1982. São moldados 3 corpos-de-prova, de acordo com a NBR 7215/1982 e sua cura ocorre em duas etapas: nas primeiras 24 horas, nos moldes, à temperatura de $(21 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e, em seguida, feita a desforma, por 6 dias, a 55°C . Após esse prazo, os corpos-de-prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados à quente com enxofre e, logo a seguir, ensaiados à compressão. A pozolanicidade é dada pela média de resistência à compressão, em MPa, dos três exemplares.

b) NBR 5752/1992 - Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - índice de atividade pozolânica com cimento: prescreve a execução de duas argamassas, sendo a primeira com traço 1:3 (em massa) de cimento e areia normal, ajustando-se a água para um índice de consistência de (225 ± 5) mm (NBR 7215/1986); na segunda, 35% do volume de cimento utilizado na primeira argamassa é substituído por pozolana, acrescentando-se água também para um índice de consistência de (225 ± 5) mm. São moldados 3 corpos-de-prova (seguindo as prescrições da NBR 7215/1986) para cada argamassa. Nas primeiras 24 horas, as argamassas são curadas nos moldes e, decorrido esse prazo, são retiradas dos mesmos e levadas à cura por 27 dias, à temperatura de $(38\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Os corpos-de-prova são então resfriados à temperatura ambiente, capeados à quente com enxofre e ensaiados à compressão axial. O índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência à compressão axial média da argamassa com pozolana e a resistência à compressão axial média da argamassa de controle, em MPa, expressa em valor percentual, aos 28 dias.

c) NBR 5753/1980 - Método de Fratini (normalizado pelo MB-1154/1991): segundo este método, a atividade pozolânica de um determinado material é avaliada por meio da comparação da quantidade de hidróxido de cálcio (em milimol CaO/l) presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado de uma solução de cimento e água destilada, com a quantidade de hidróxido de cálcio capaz de saturar um meio de mesma alcalinidade. Traça-se uma curva de saturação do hidróxido, em função da alcalinidade. Para um cimento pozolânico, a quantidade de hidróxido de cálcio, em função da alcalinidade, deve estar sempre abaixo da curva. Para a avaliação de pozolanas, são feitas misturas em diferentes proporções de cimento e pozolana, analisando-se os resultados de forma semelhante ao que foi descrito anteriormente, avaliando se as misturas estudadas comportam-se como cimento pozolânico.

d) Método Chappelle Modificado/IPT: a pozolanicidade de um material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana, por meio da comparação de uma mistura de pozolana com óxido de cálcio, e outra sem pozolana. As misturas são mantidas à ebulição (90°C), durante 16 horas, em equipamento padronizado para o ensaio e, em seguida, determinada quantidade de óxido de cálcio que não reagiu. O resultado é

expresso em mg de óxido de cálcio por grama e, quanto maior o consumo de óxido de cálcio, maior a pozolanicidade do material.

Lúxan (1989) idealizou um ensaio para a determinação do índice de atividade pozolânica, medindo a variação da condutividade iônica de uma solução saturada de Ca(OH)_2 . É feita a medição da condutividade iônica antes e após 2 minutos da adição e mistura continuada de 5 gramas de pozolana em 200 ml da solução. Nesse procedimento, mede-se a capacidade da sílica da pozolana entrar rapidamente em solução e reagir com o hidróxido de cálcio formando silicato de cálcio hidratado, que precipita como composto insolúvel, diminuindo a concentração de íons cálcio da solução. O ensaio mede, predominantemente, o conteúdo de material com alta reatividade química da pozolana. Quanto maior a diferença de condutividade iônica da solução após a mistura de Ca(OH)_2 , maior a reatividade do material. A Tabela 3.2 traz a classificação proposta pelo autor.

Tabela 3.2 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade (LÚXAN, 1989)

Pozolanicidade do material	Condutividade (miliSiemens – mSi)
Não pozolânico	<0,4
Pozolanicidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanicidade	>1,2

Isaia (1995) propõe o cálculo de um índice de atividade pozolânica a partir do Método Fratini (NBR 5735/1980). O índice quantifica o resultado do ensaio Fratini por meio do cálculo do inverso da distância entre o ponto plotado no gráfico e a origem das coordenadas, multiplicado por 100, sendo a atividade pozolânica diretamente proporcional a esse índice.

Há ainda autores que indicam a classificação de um material como pozolânico ou não em função de sua cristalinidade, alegando que sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio depende, fundamentalmente, do teor de sílica amorfa que apresenta que, por sua vez, irá depender das condições de queima que a geraram. Apesar disso, há pesquisadores que não concordam com a fixação de limites de temperatura de queima para classificação de uma cinza como boa ou má pozolana para uso em concreto. Isaia (1995) questiona qual a importância da análise isolada da cristalinidade da cinza para o desempenho de concretos e argamassas, uma vez que, na realidade, o que

interessa é seu desempenho final como material pozolânico quando estudado em diferentes teores de substituição e comparado à mistura de referência.

Santos (1997), utilizando cinzas provenientes de diferentes processos de queima, para a produção de argamassas e concretos, observou que a cinza que apresentou maior índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/1992), não apresentou o melhor desempenho na argamassa. Isso foi atribuído à forma como o ensaio é realizado, fixando a consistência e permitindo a variação da relação água/aglomerante.

Para a avaliação da reatividade de um material com cimento Portland a NBR 5752/1992 preconiza a determinação do seu índice de atividade pozolânica (IAP), já descrito anteriormente. Para sua classificação como pozolana, a NBR 12653/1992, estabelece IAP mínimo de 75% e percentual de água requerida inferior a 110% (classe E) estabelecido pela relação entre a quantidade de água da argamassa com pozolana e a argamassa de controle, expressa em percentual, para obtenção de consistência *flow table* de (225 ± 5) mm.

Como a relação água/materiais cimentantes é inversamente proporcional à resistência do material (ABRAMS, 1925), pozolanas mais finas, possivelmente mais reativas, têm seu desempenho prejudicado por demandarem mais água para atingirem a consistência especificada. Outro fator importante é que materiais muito finos tendem a formar grumos, o que dificulta sua dispersão.

Santos (1997), buscando avaliar a potencialidade de utilização da cinza de casca de arroz residual, produzida no sul do estado de Santa Catarina, concluiu que o teor ótimo de substituição de cimento por CCA, para produção de CAD, foi 15% em volume absoluto de cimento, conforme indica a Figura 3.15.

Pouey (2006), avaliando diferentes tratamentos para obtenção de cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono e sua utilização na produção de cimentos compostos ou pozolânicos, também indicou que, quando as CCA's passam por tratamento térmico, seguido de moagem, o teor de substituição do material que leva ao melhor desempenho quanto à sua reatividade é de 15%.

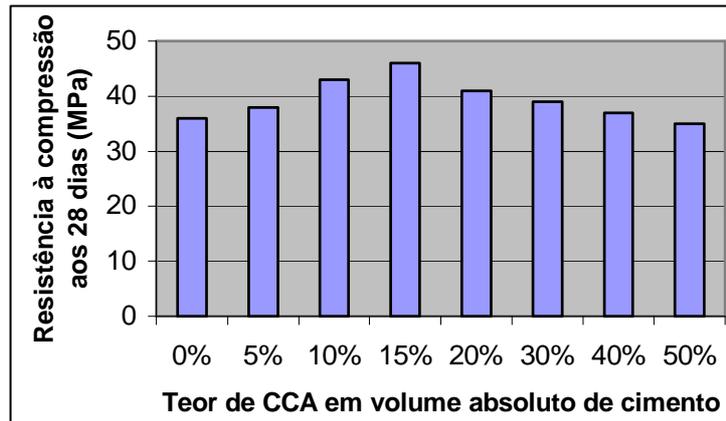


Figura 3.15– Resistência das argamassas contendo diferentes teores de CCA (Adaptado de SANTOS, 1997)

Nessa linha, Gava (1999) realizou a análise de diferentes pozolanas sob a óptica dos diferentes métodos de avaliação da reatividade do material. Foram utilizadas variadas relações água/cimento, tipo e teor de pozolanas, cimento CP I-S de dois diferentes fabricantes, aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes). Avaliando os resultados de reatividade obtidos por diferentes ensaios, a autora conclui que a ordem de classificação das pozolanas foi sempre a mesma: cinza de casca de arroz com os maiores índices, seguidos da sílica ativa e, por último, a cinza volante, como é possível observar na Figura 3.16.

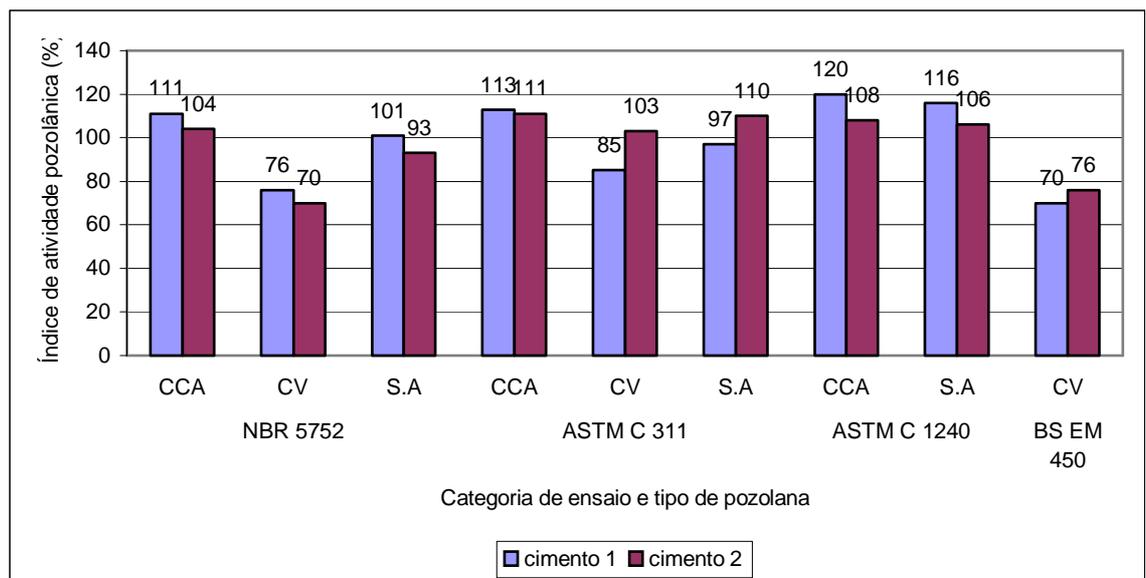


Figura 3.16 – Comparação entre as metodologias para determinação da atividade pozolânica e influência da marca de cimento (Adaptado de GAVA, 1999).

No entanto, as diferentes normas utilizadas pela autora têm diferentes metodologias de classificação das pozolanas. Por exemplo, para a NBR 5752/1992 e a BS EM 450, a cinza volante estudada seria considerada de baixíssima reatividade, podendo até ser classificada como *material não pozolânico*, já que em ambos os cimentos sua reatividade ficou muito próxima ou até inferior ao limite mínimo de reatividade preconizado, que é de 75%. Para as demais metodologias, seria considerada *material pozolânico*, apresentando inclusive reatividade superior ao material de referência (reatividade superior a 100%) no ensaio ASTM C 311/1996a.

Diante disso, conclui-se que o ideal, para avaliação de um material pozolânico, é analisá-lo sob as reais condições em que será empregado, seja para a produção de argamassas ou concretos, utilizando o mesmo teor de substituição, a mesma trabalhabilidade, a mesma relação água/cimento e marca de cimento. Essa será a conduta empregada na realização da presente investigação, quanto à reatividade da CCA com baixo teor de carbono.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Programa Experimental

Com o objetivo de viabilizar a produção e conseqüente utilização comercial de CCA com baixo teor de carbono a partir da CCA residual, desenvolveu-se um extenso programa experimental, dividido em duas etapas: (i) produção e seleção da CCA com baixo teor de carbono e alta reatividade e (ii) produção de concreto com o material selecionado e avaliação de aspectos relativos à sua durabilidade: ataque por sulfato e reação álcali-agregado.

Na primeira etapa foram produzidas 24 cinzas diferentes, obtidas a partir da combinação de 4 temperaturas, 3 tempos de retenção e 2 condições de moagem. Na seqüência, estas cinzas foram avaliadas quanto ao teor de carbono residual, granulometria, massa específica e, por fim, sua reatividade. Elaborou-se então um estudo estatístico para a seleção do melhor material, considerando temperatura de queima/tempo de retenção/tempo de moagem, além dos aspectos acima citados.

Com o material selecionado, a segunda etapa consistiu na produção de concreto de alto desempenho para avaliação de propriedades mecânicas e comportamento no que diz respeito ao ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma da fase experimental do trabalho.

Os ensaios de caracterização química e granulometria a laser das CCA's foram realizados pela Votorantim Cimentos[®] - PR. As difrações de raios-X foram realizadas no Laboratório de Materiais - LABMAT, do curso de Engenharia Mecânica, da UFSC. A granulometria a laser da CCA selecionada foi feita pelo SENAI SC/CTCmat – Centro de Tecnologia em Materiais, de Criciúma - SC. Os ensaios de RAA foram feitos pelo Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas – GO. Todos os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia em Construção Civil - LATEC, da UNIVALI.

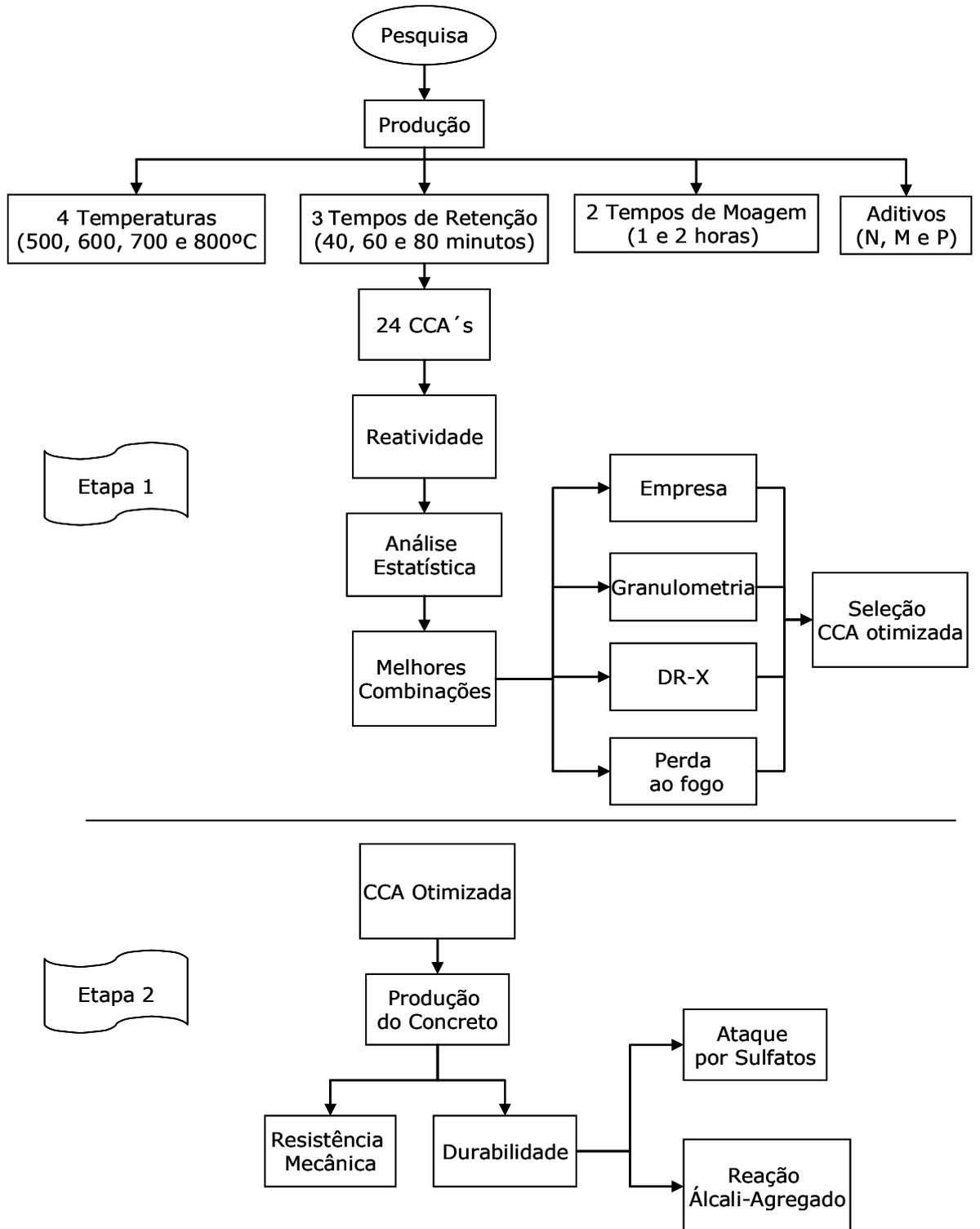


Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental

4.2 Materiais Utilizados

Para a produção das argamassas e concretos foram utilizados dois agregados miúdos (areia fina e areia média) e como agregado graúdo uma brita granítica, todos disponíveis na região da grande Florianópolis, cuja caracterização é apresentada nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. O cimento empregado na pesquisa foi o CP II F-32, por ser um cimento que não contém adições quimicamente ativas. Suas características, determinadas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 4.3. Os aditivos redutores de água têm sua caracterização apresentada na Tabela 4.4. As características da sílica ativa empregada, também determinadas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.1 - Caracterização do agregado miúdo (NBR 7211/1983)

Peneira (ABNT) Abertura (mm)	% Retida Acumulada (areia média)	% Retida Acumulada (areia fina)
6,3	0	0
4,8	0	0
2,4	5	0
1,2	25	0
0,6	60	0
0,3	84	2
0,15	95	96
<0,15	100	100
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	0,30
Módulo de finura	2,67	0,98
Graduação (zona)	3 (média)	Fora dos limites da NBR 7211/1983
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,55	2,59

Tabela 4.2 – Caracterização do agregado graúdo

Peneira (ABNT) - Abertura (mm)	% Retida Acumulada
9,5	0,00
6,3	88
4,8	94
fundo	100
Dimensão máxima característica (mm)	9,5
Módulo de finura	6,78
Gradação (zona)	Fora dos limites da NBR 7211/1983
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,75

Tabela 4.3 – Caracterização do cimento (ANEXO 1)

Análise Física		Análise Química		Análise Mecânica	
Ensaio	Valor	Ensaio	Teor (%)	Idade (dias)	Resistência (MPa)
Peneira # 0,075 mm (%)	3,47	Perda ao fogo	5,23	1	13,0
Peneira # 0,045 mm (%)	12,93	SiO ₂	17,72	3	23,7
Água da pasta de consistência normal (%)	25,7	Al ₂ O ₃	4,39	7	30,4
Massa específica (g/cm ³)	3,09	Fe ₂ O ₃	2,46	28	38,8
Superfície Específica Blaine (m ² /kg)	303,7	CaO	59,46		
Início de pega (min)	153	MgO	5,10		
Fim de pega (min)	216	SO ₃	3,12		
Tamanho das partículas (µm)	< φ ₁₀	2,21	Resíduo insolúvel	1,01	
	< φ ₅₀	10,85	Equivalente Alcalino de Sódio	0,57	
	< φ ₉₀	27,64			

Tabela 4.4 – Caracterização dos aditivos redutores de água

Aditivo	N	M	P
Base química	Naftaleno sulfonato de sódio	Melamina sulfonato de sódio	Policarboxilato
Dosagem (litros/100 kg de cimento)	0,75 a 1,50	0,65 a 1,60	0,50 a 0,80
Massa específica (g/cm ³)	1,210	1,260	1,087
Teor de sólidos (%)	43	40	30

Tabela 4.5 - Caracterização da sílica ativa

Massa Específica (kg/m ³)	2,22	
Superfície Específica (m ² /g)	20,00	
Tamanho das Partículas (µm)	< φ ₁₀	0,67
	< φ ₅₀	3,46
	< φ ₉₀	15,13

4.3 1ª Etapa: Determinação das condições de queima

A CCA bruta (residual) utilizada nesta pesquisa, originalmente com alto teor de carbono, é proveniente de uma única fonte geradora do resíduo, localizada no Município de Rio do Sul – SC. A queima da casca para produção de energia calorífica se dá em leito fluidizado, em queimador compacto, do tipo “Biocham” (Figura 4.2) onde a temperatura de queima está entre 700°C e 800°C, o tempo de exposição é extremamente reduzido (apenas alguns segundos) e o resfriamento do material à temperatura ambiente se dá de forma natural. Foi feita uma única amostragem do material, onde foi coletada uma grande quantidade do mesmo que foi armazenada junto à empresa participante da pesquisa.

A opção por uma única fonte fornecedora do material se deu pela facilidade de recolhimento do material, visto que trabalhos anteriores (SANTOS,1997; GAVA, 1999; POUHEY, 2006) mostraram que mesmo cinzas oriundas de diferentes processos de geração de energia apresentam boas propriedades pozolânicas.



Figura 4.2 – Queimador compacto tipo “Biocham”

A composição química da CCA bruta é apresentada na Tabela 4.6, cuja análise foi feita por fluorescência de raios-X. A Tabela 4.7 traz os dados dos principais picos identificados na difração de raios-X e a Figura 4.3 apresenta o difratograma de raios-X do material. A difração de raios-X foi realizada em equipamento X’Pert, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), geometria theta dois theta, monocromador de grafite antes do detector, filtro de níquel instalado na ótica secundária, potência de 40kV e 30mA, fenda de divergência de 1° e fenda de recebimento de 0,1mm. As condições adotadas na análise foram: passo $0,05^\circ$, tempo de passo 1 segundo, intervalo de leitura: $2\theta = 3^\circ$ a 120° . A identificação das fases se deu com uso do programa Philips Identify, com banco de dados JCPDS.

Tabela 4.6 – Caracterização da CCA bruta

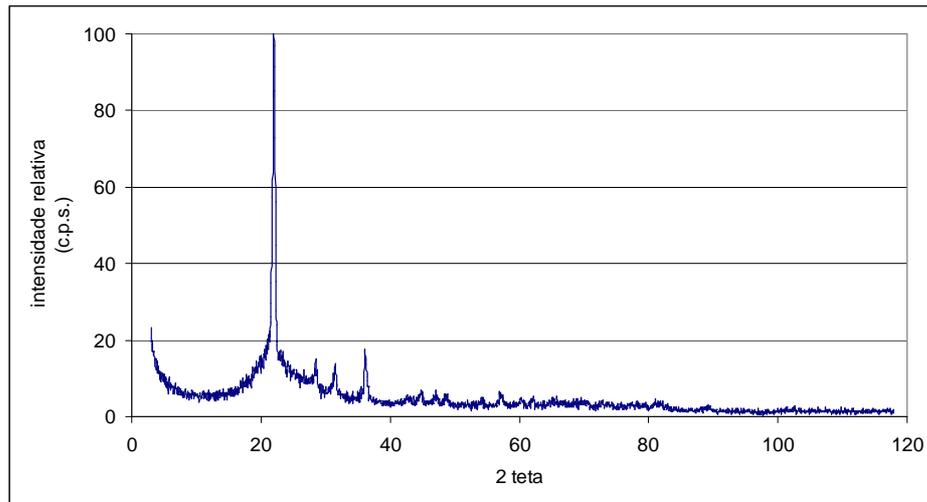
Teor de Óxidos (%)	
CO ₂	17,08
Na ₂ O	0,03
MgO	0,54
Al ₂ O ₃	0,38
SiO ₂	76,59
P ₂ O ₅	0,51
SO ₃	0,2
K ₂ O	0,94
CaO	2,73
Cr ₂ O ₃	0,01*
MnO	0,14
Fe ₂ O ₃	0,79
NiO	**
ZnO	0,01
Rb ₂ O	0,01
SrO	0,01
BaO	0,02
Massa Específica – 1h de moagem (g/cm ³) (NBR NM 23/2001)	2,14
Massa Específica – 2h de moagem (g/cm ³) (NBR NM 23/2001)	2,19
Perda ao fogo média (NBR NM 18/2003) (%)	17,62

**presença creditada à contaminação da amostra no momento da moagem*

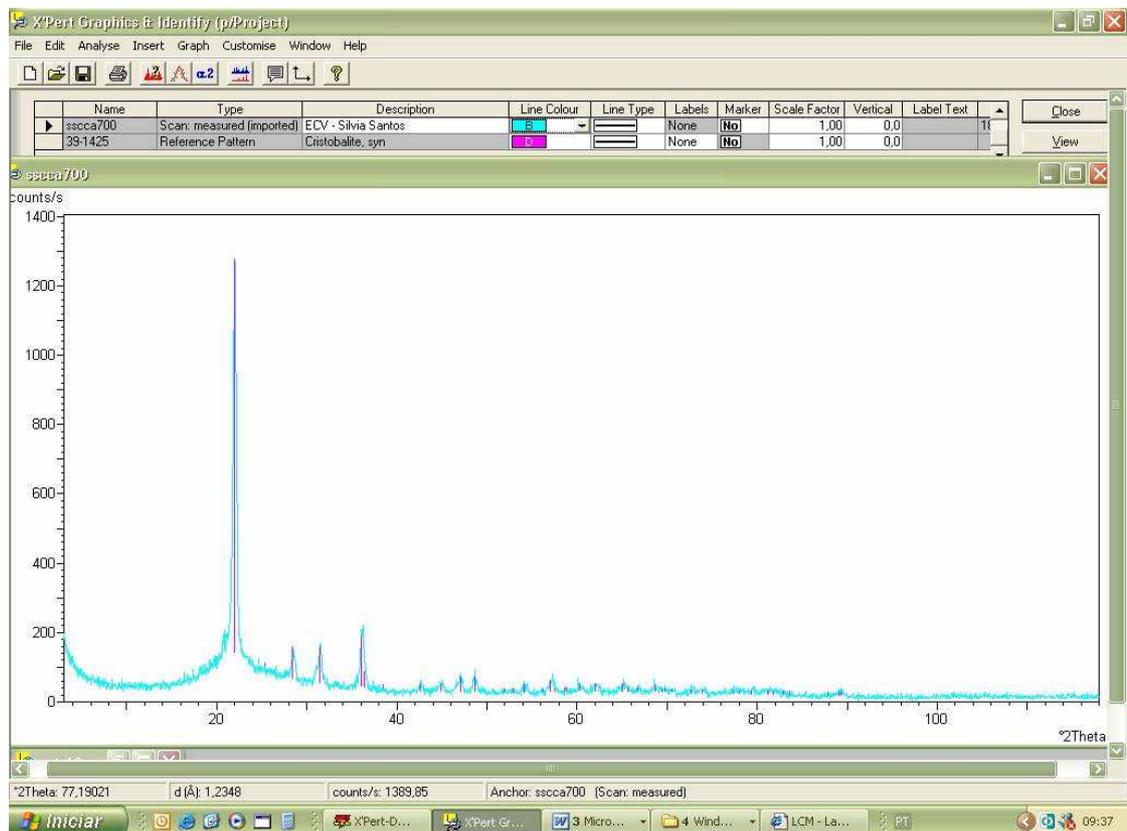
***valor não detectado*

Tabela 4.7 – Picos principais da difração de raios-X – CCA bruta

Espaçamento – d (Å)	Intensidade relativa (%)	Ângulo (2θ)	Altura do pico (contagem)
4,04	100,00	21,98	1083
3,13	15,23	28,48	165
2,84	13,85	31,48	150
2,48	17,73	36,18	192



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Difractograma de raios – X da CCA bruta; (b) Ilustração da identificação dos fases com o programa Philips Identify

A difração de raios-X da CCA bruta indica a presença de cristobalita que pode ser originada pelo resfriamento natural do material. Possivelmente, se o material sofresse um resfriamento brusco, não haveria tempo para cristalização da sílica e o material

resultante seria amorfo e, conseqüentemente, teria sua reatividade potencializada. A princípio, a presença de material cristalino poderia prejudicar a reatividade do material. Todavia, trabalhos anteriores, realizados por Santos (1997), Gava (1999) e recentemente, por Pouey (2006), mostraram que mesmo uma cinza de casca de arroz que apresente picos cristalinos pode apresentar bom desempenho como pozolana. Além disso, o tamanho do grão obtido no processo de moagem do material também exerce papel importante na sua reatividade.

De forma a estabelecer os tempos de permanência no forno e as temperaturas de requeima, foi feita a requeima do material num estudo piloto em laboratório. Para este estudo foram fixados quatro níveis de temperatura e uma massa de CCA bruta de 5,0 g, com o intuito de se estabelecer os tempos necessários para que o material inicialmente de cor preta, se transformasse num material, no mínimo de cor clara, semelhante ao cimento Portland, indicando a redução do teor de carbono residual. O material foi colocado em cadinho de porcelana e levado à requeima em forno mufla. A cada 30 minutos a amostra era retirada do forno para homogeneização, uma vez que sua superfície, por estar em contato com o ar, ficava de cor quase branca, enquanto o interior da massa permanecia de cor preta. A Tabela 4.8 apresenta os resultados médios dos tempos necessários para obtenção de uma cinza de cor clara em função da temperatura de requeima obtidos após três determinações por amostra.

Tabela 4.8 – Requeima do material em laboratório

Amostra	Massa de material (g)	Temperatura Média (°C)	Tempo Médio de Permanência (minutos)	Cor obtida após homogeneização
1	5,0	801	47	Cinza claro
2	5,0	699	55	Cinza claro
3	5,0	607	76	Cinza claro
4	5,0	499	82	Cinza claro

Para a produção de CCA com baixo teor de carbono em maiores quantidades foi desenvolvido pela Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda. um forno rotativo, contínuo, construído em aço 316. A energia utilizada por esse forno provém do reaproveitamento da energia utilizada na secagem de areia realizada pela empresa para a produção de argamassa industrializada, podendo ser utilizados vários tipos de combustível no processo. A requeima da CCA para redução do teor de carbono presente

se dá de forma indireta. A moagem da CCA foi feita em moinho giratório de aço, com carga também de aço, disponível na empresa⁵.

Com base nos resultados obtidos em laboratório (Tabela 4.8) e com o intuito de estabelecer qual a mais adequada temperatura para a requeima da cinza de casca de arroz, bem como o mais eficiente tempo de retenção da CCA no forno, foi estabelecido o programa de requeima a ser seguido pela Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda. O programa propôs a produção de 24 diferentes CCA's e é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Programa de produção da cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono

Temperatura de requeima (°C)	500, 600, 700 e 800
Tempo de retenção no forno, para cada temperatura de requeima (minutos)	40, 60 e 80
Condições de pré-moagem, para cada tempo de retenção (horas)	1 e 2

Muito embora possa parecer elevado, em função do consumo de energia que representa, adotou-se o tempo de moagem de 2 horas para que fosse possível avaliar se havia ou não ganho significativo de desempenho da pozolana produzida sob estas condições, capaz de compensar o consumo energético empregado para sua obtenção.

Os testes iniciais realizados em argamassas, para a pré-moagem de 1h, indicaram grande variabilidade interna dos resultados de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de argamassa. Isso foi atribuído à formação de grumos por ocasião da requeima do material. Esse fato não permitiu a dispersão do material de forma homogênea na argamassa, prejudicando sua reação com o hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, levando à variabilidade dos resultados obtidos.

Dessa forma, foi estabelecida uma pós-moagem. Após o resfriamento da CCA na saída do forno, o material voltava ao moinho para uma nova moagem, num tempo

⁵ Os dados sobre o processo de moagem do material não foram totalmente disponibilizados pela empresa em função de se tratar de segredo industrial que gerará patente do processo ora investigado.

estabelecido de três minutos, suficiente para desfazer os grumos formados no processo de requeima, restabelecendo a superfície específica inicial.

Com esta medida, os resultados de resistência à compressão das argamassas, alcançados nos testes preliminares, mostraram-se bem mais homogêneos. Assim, o mesmo procedimento foi adotado também para a condição de moagem de 2 horas. As condições de moagem passaram a ser identificadas como 1h, 1h+3 e 2h+3, respectivamente.

Em princípio, o custo energético do processo é diretamente proporcional à temperatura adotada. Contudo, em função do sistema de reaproveitamento de energia implantado na empresa, temperaturas intermediárias, da ordem de 600°C e 700°C são mais viáveis.

O registro/controlado de temperatura no interior do forno se deu pela instalação de termopares blindados do tipo K (Chromel Alumel), da marca Samrello®. Estes termopares são capazes de registrar temperaturas de -270°C a 1370°C, com precisão de 0,75% e apresentam boa resistência térmica, mecânica e à oxidação (WEBER, 2001). Um desenho esquemático de seus posicionamentos é mostrado na Figura 4.4.

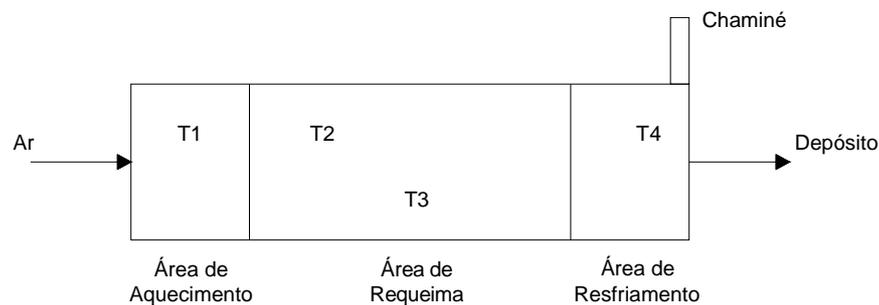


Figura 4.4 – Posicionamento dos termopares no interior do forno – (T1) temperatura do forno; (T2) temperatura do fluxo de ar; (T3) temperatura do material; (T4) temperatura na descarga.

Para identificação dos diferentes materiais produzidos foi estabelecida a seguinte representação: temperatura de requeima/tempo de retenção no forno/condição de moagem. Assim, por exemplo, a CCA produzida com temperatura de 500°C, com tempo de retenção 40 minutos e condição de pré-moagem 1h, recebeu a designação **CCA 500/40/1**.

Com a instalação dos termopares no interior do forno, foi possível controlar a temperatura durante todo o processo de requeima da CCA, para cada um dos tempos de retenção previstos. A Figura 4.5 ilustra o controle feito durante a produção da

CCA 500/80/1, onde a temperatura média do material (T3 médio), na área de requeima, foi de 500,4°C. Os demais gráficos referentes ao controle da temperatura de requeima encontram-se no ANEXO 2. As temperaturas médias atingidas para todas as condições de requeima são apresentadas na Tabela 4.10.

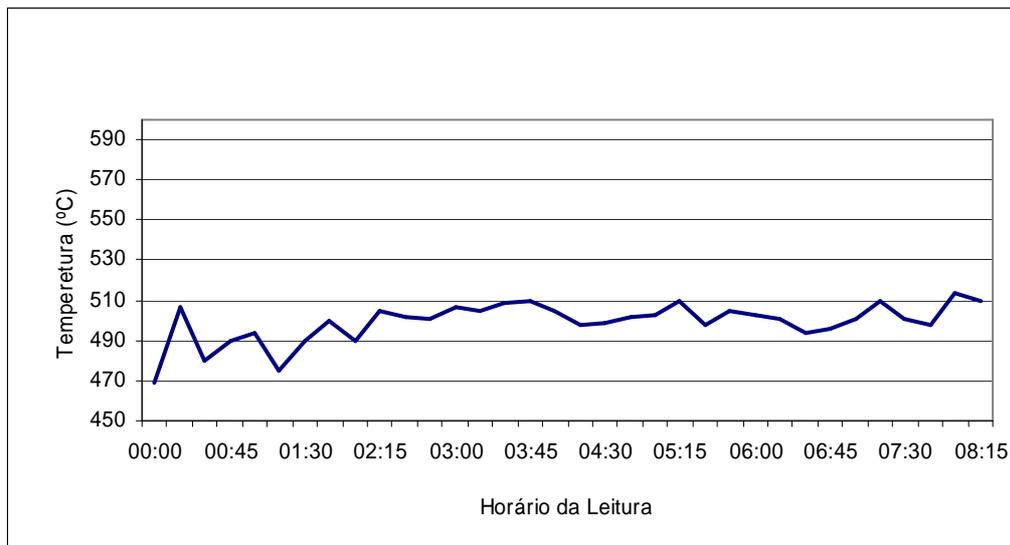


Figura 4.5 – Controle da temperatura da CCA 500/80/1

Tabela 4.10 – Temperatura média de requeima para as diferentes condições de produção

Tempo de pré-moagem 1h			Tempo de pré-moagem 2h		
Tempo de retenção na área de fogo (minutos)	Temperatura média desejada (°C)	Temperatura média atingida (°C)	Tempo de retenção na área de fogo (minutos)	Temperatura média desejada (°C)	Temperatura média atingida (°C)
40	800	799,8	40	800	805,6
60	800	799,8	60	800	837,9
80	800	799,2	80	800	808,8
40	700	701,7	40	700	715,0
60	700	704,8	60	700	700,0
80	700	702,3	80	700	702,5
40	600	605,6	40	600	604,0
60	600	599,7	60	600	601,0
80	600	564,0	80	600	599,9
40	500	500,4	40	500	502,5
60	500	499,9	60	500	445,8
80	500	507,3	80	500	460,6

É possível observar que, para o tempo de pré-moagem 1h, as temperaturas médias de requeima ficaram muito próximas das temperaturas desejadas, à exceção do caso 600/80, onde o valor médio atingido ficou 36°C abaixo do valor desejado. Já para o tempo de pré-moagem 2h houve maior variabilidade entre os resultados de um mesmo grupo e para os casos 500/60 e 500/80, os valores atingidos ficaram, respectivamente, 54,2°C e 39,4°C, abaixo do desejado. Os tempos de retenção do material na área de fogo do forno são controlados pela velocidade de giro do mesmo. Os resultados acima indicam que ainda é necessário o ajuste deste sistema para que as temperaturas mais baixas sejam atingidas com maior precisão. Para temperaturas mais elevadas, 700° e 800°C, a variação da temperatura foi bastante reduzida, mostrando que o sistema está melhor calibrado para esses níveis de temperatura.

A Tabela 4.11 traz um resumo dos dados obtidos na difração de raios- X das cinzas produzidas sob diferentes temperaturas

Tabela 4.11 – Picos principais da difração de raios-X

Amostra	Espaçamento – d (Å)	Intensidade relativa (%)	Ângulo (2θ)	Altura do pico (contagem)
CCA bruta	4,04	100,00	21,98	1083
	3,13	15,23	28,48	165
	2,84	13,85	31,48	150
	2,48	17,73	36,18	192
CCA 500/60	4,04	100,00	21,98	1226
	3,13	11,83	28,48	145
	2,83	11,09	31,58	136
	2,48	17,29	36,13	212
CCA 600/60	4,04	100,00	21,98	1170
	3,13	12,56	28,53	147
	2,83	14,62	31,53	171
	2,48	16,49	36,23	193
CCA 700/60	4,04	100,00	21,98	1271
	3,13	11,41	28,53	145
	2,83	12,74	31,53	162
	2,48	17,86	36,23	227
CCA 800/60	4,04	100,00	21,98	1281
	3,12	12,02	28,58	154
	2,84	13,97	31,48	179
	2,48	16,63	36,23	213

Observa-se que praticamente não há diferença entre os valores obtidos no ensaio de difração de raios-X para os picos principais de cada CCA. A Figura 4.6 traz os difratogramas de raios-X de cada material.

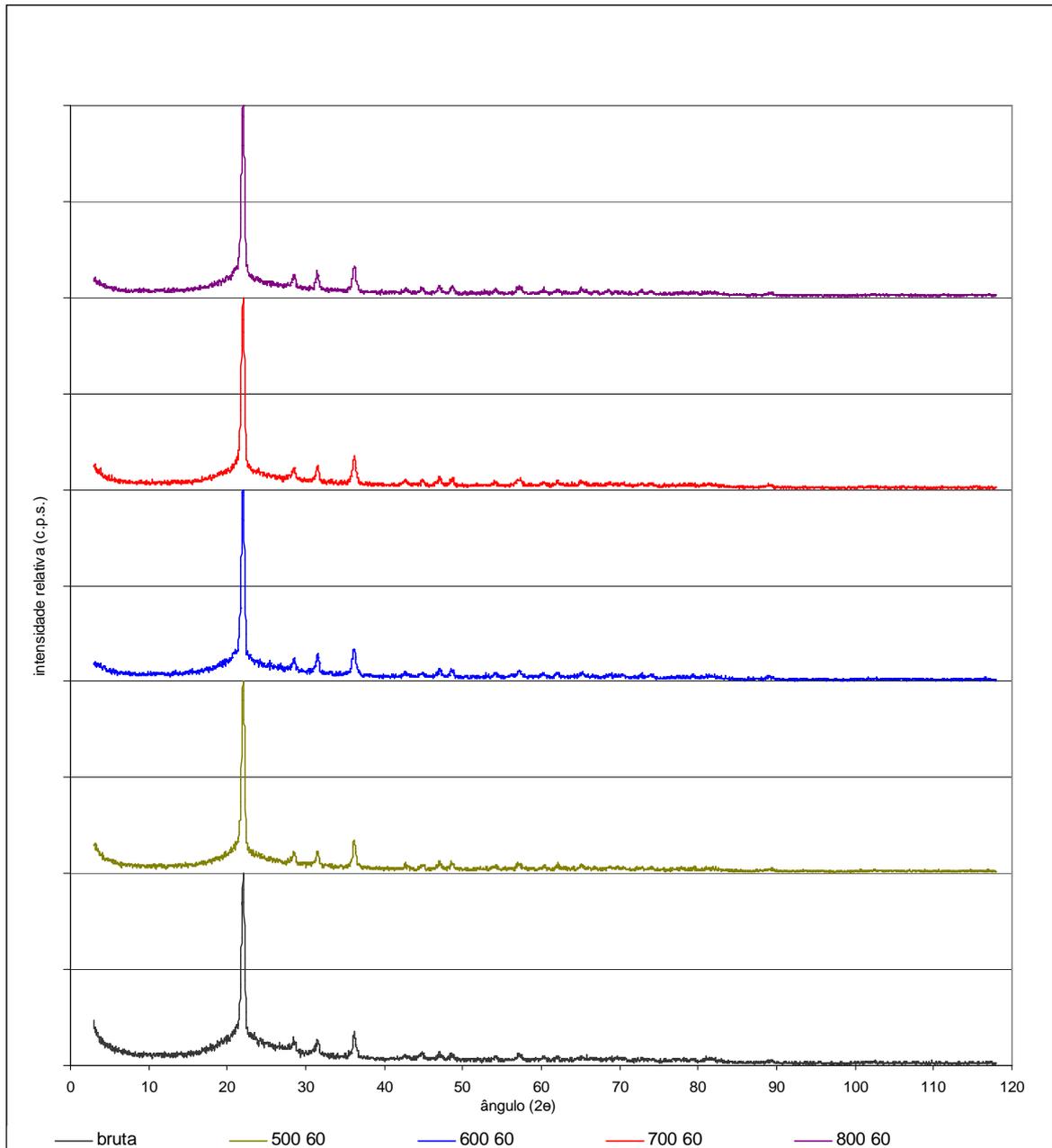


Figura 4.6 – Difratograma de Raios-X das CCA's produzidas sob diferentes temperaturas

Os resultados da difração de raios-X (obtidos nas mesmas condições descritas em 4.2) não apresentam alteração, em relação à CCA bruta, para nenhuma das cinzas produzidas sob as diferentes temperaturas avaliadas. Isso indica que o sistema de requeima proposto para a retirada do carbono residual não alterou a cristalinidade do material, em relação àquele que lhe deu origem.

4.4 Determinação do teor de carbono

Para a determinação do teor de carbono residual das cinzas produzidas foi realizado o ensaio de perda ao fogo (NBR NM 18/2003). O ensaio de determinação direta consiste em calcinar, em forno mufla, uma amostra de $(1,0000 \pm 0,010)$ g, por um período de 50 minutos, entre 900°C e 1000°C de temperatura. Após resfriar em dessecador, a amostra é novamente pesada e o resultado do ensaio é expresso em percentual de redução da massa.

4.5 Determinação da granulometria e massa específica

O ensaio de granulometria a laser foi realizado pela Votorantim Cimentos[®], do Paraná, (ANEXO 3), utilizando-se o equipamento Mastersizer 2000[®]. Todas as amostras de foram ensaiadas pelo sistema Scirocco (seco) em função das partículas deste material incharem quando ensaiadas pelo sistema líquido.

O ensaio de massa específica seguiu o que preconiza a NBR NM 23/2000.

4.6 Determinação da reatividade do material

O presente trabalho avaliou a reatividade das cinzas de casca de arroz produzidas com baixo teor de carbono, segundo procedimento recomendado por Gava (1999), ou seja, foram empregados os mesmos teores de substituição de cimento por pozolana e a mesma relação água/materiais cimentantes a serem empregadas na produção do CAD. Assim, foi utilizado o teor de substituição de CCA indicado por Santos (1997), 15% em volume absoluto de cimento de forma a manter o mesmo volume de aglomerante nas pasta de cada uma das misturas e uma adaptação da metodologia de avaliação prevista pela NBR 5752/1992. A adaptação da NBR 5752/1992 se deu em função de que a

norma brasileira fixa o traço das argamassas e prevê que o índice de consistência *flow table* de (225 ± 5) mm seja obtido com o acréscimo de água, o que faz variar a relação água/material cimentante de cada mistura. Assim, foi estabelecido um traço inicial, em massa, para posterior produção de concreto de alto desempenho, como sendo 1:3 (cimento:agregados). Na argamassa deste traço (1:1,24 – cimento:agregados miúdos) foram realizados os primeiros estudos. Foi estabelecida uma consistência *flow table*, determinada segundo a NBR 7215/1996, de (235 ± 15) mm. A adoção desse valor para a consistência *flow table* se deu em função de que a argamassa do concreto seria muito fluida, com tendência à segregação, dificultando o ensaio. A consistência estabelecida foi conseguida por meio do uso de aditivos redutores de água de diferentes bases químicas: naftaleno sulfonato de sódio, melamina sulfonato de sódio e policarboxilato. Desta forma, em paralelo à avaliação da reatividade do material foi feita a seleção do aditivo redutor de água para a posterior produção dos concretos, uma vez que a presença destes é indispensável à produção de CAD. A relação água/material cimentante utilizada foi 0,3 para todas as misturas⁶.

Após a produção, as argamassas foram moldadas em formas metálicas, cilíndricas, de dimensões (5 x 10)cm e aí permaneceram por 24 horas. A seguir, foram curadas por 27 dias, em recipiente hermeticamente fechado, com temperatura de $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$, segundo a NBR 5752/1992. Decorrido este prazo, foram capeadas com enxofre e ensaiadas à compressão axial para a determinação da resistência mecânica.

Para avaliação de desempenho, foram produzidas, nas mesmas condições acima descritas, argamassas sem a adição de cinza de casca de arroz (chamada de referência) e argamassas com adição de sílica ativa, pozolana atualmente mais utilizada para a produção de concreto de alto desempenho.

O teor de sílica ativa para a produção de CAD é variável. Neville (1997) indica valores entre 5% e 15%, em relação à massa de cimento. De acordo com Aïtcin (2000) o teor de SA utilizado para a produção de concreto de alto desempenho varia, em aplicações reais, entre 3% e 10% em relação à massa de cimento, não havendo grande incremento de resistência quando o teor aumenta de 5% para 10%. Além disso, o aumento do teor de SA acima desses valores implica, necessariamente, em um maior consumo de aditivo

⁶ A relação água/materiais cimentantes foi calculada em função da massa inicial de cimento.

superplastificante para a dispersão total do produto na mistura e alcance da trabalhabilidade desejada. Dessa forma, o custo final de mistura passa a ser um fator limitante para seu uso em grandes teores. O teor de sílica ativa adotado nesse trabalho foi de 8% em volume absoluto de cimento (aproximadamente 5,74% em massa).

Muito embora as pozolanas em estudo estejam sendo avaliadas com a utilização de diferentes teores de substituição (15% para CCA e 8% para a SA), trabalho realizado por Santos (1997), apontou teores dessa ordem de grandeza para obtenção de desempenhos semelhantes de resistência à compressão axial dos materiais em questão.

Além das argamassas de referência e com SA, foram também produzidas argamassas com CCA bruta, nas duas condições de moagem estabelecidas: 1h e 2h.

O desempenho das argamassas foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão axial das mesmas, realizado prensa da marca EMIC, com célula de carga de 30 toneladas. As Tabelas 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 trazem as dosagens obtidas para as argamassas de referência, com sílica ativa e com as CCA's brutas. O ANEXO 4 traz a dosagem completa de cada uma das argamassas para as diferentes CCA's produzidas.

As argamassas foram produzidas à temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e obedeceram a seguinte ordem de mistura:

1. material cimentante + 100% da água da mistura, com o misturador desligado;
2. mistura de material cimentante + água por 30 segundos, com misturador na velocidade baixa;
3. colocação dos agregados, com misturador na velocidade lenta, por 30 segundos;
4. mistura da argamassa com misturados 30 segundos na velocidade alta;
5. a seguir o misturador era desligado por 90 segundos, sendo feita a raspagem do mesmo nos primeiros 15 segundos;
6. após o período de descanso, o misturados era ligado por 15 segundos na velocidade baixa, e neste intervalo era colocado o aditivo redutor de água;
7. por fim, a mistura do aditivo à argamassa se completava como misturador ligado por 45 segundos na velocidade alta.

Tabela 4.12 – Argamassa de referência

Aditivo⁷	N	M	P
cimento (g)	707,60	707,60	707,60
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	209,42	209,53	210,87
aditivo ⁸ (g)	5,01	4,58	2,01
<i>flow table</i> médio (mm)	244,7	230,9	235,3
água/cimento	0,30	0,30	0,30

Tabela 4.13 – Argamassa com sílica ativa

Aditivo	N	M	P
cimento (g)	650,99	650,99	650,99
sílica ativa - 8%(g)	40,67	40,67	40,67
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	209,42	209,53	210,87
aditivo (g)	5,01	4,58	2,01
<i>flow table</i> médio (mm)	235,8	225,3	248,3
água/aglomerante	0,30	0,30	0,30

Tabela 4.14 – Argamassa com CCA bruta, pré-moagem 1h

Aditivo	N	M	P
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA bruta 15% (g)	73,51	73,51	73,51
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
<i>flow table</i> médio (mm)	236,6	238,1	238,8
água/aglomerante	0,30	0,30	0,30

⁷ Massa de aditivo = massa de sólido + massa de líquido do material.

⁸ N = aditivo redutor de água de base naftaleno soufonato de sódio;

M = aditivo redutor de água de base melamina soufonato de sódio; e

P = aditivo redutor de água de base policarboxilato

Tabela 4.15 – Argamassa com CCA bruta, pré-moagem 2h

Aditivo	N	M	P
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA bruta 15% (g)	75,22	75,22	75,22
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	207,44	206,78	210,18
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
<i>flow table</i> médio (mm)	246,6	239,1	248,3
água/aglomerante	0,30	0,30	0,30

4.7 Determinação da melhor CCA

Produzidas as argamassas e de posse dos resultados de resistência à compressão axial de cada uma delas (ANEXO 4), uma análise estatística indicou qual(is) a(s) melhor(es) CCA(s) de baixo teor de carbono no âmbito da resistência à compressão axial. O modelo adotado foi o fatorial, com três fatores de repetição e 95% de confiança. As variáveis independentes eram: a temperatura de queima, o tempo de retenção do material no forno, a condição de moagem (1h, 1h+3 e 2h+3) e o tipo de aditivo utilizado.

Após a análise da resistência à compressão axial, também foram consideradas na seleção do melhor material o teor de carbono e granulometria das amostras.

Uma vez selecionada a CCA de baixo teor de carbono com melhor desempenho, esta foi produzida em escala (aproximadamente 50kg) para a confecção de CAD. Este material foi novamente avaliado química e fisicamente.

A CCA selecionada, produzida em escala, foi então avaliada quanto à sua reatividade segundo o que preconiza a NBR 5752/1992, a NBR 12653/1992 e o ensaio adaptado proposto neste trabalho.

Para a CCA selecionada foi realizado o ensaio de colorimetria. Por meio do sistema espaço da cor L^*a^*b , desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação – CIE (1976), descrito no item 3.3. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro modelo CM-508, marca Minolta[®]. Foram realizadas duas leituras por amostras prensadas de cada material avaliado: CCA bruta, CCA selecionada, cimentos CII Z 32, mistura

proposta nesse trabalho com 15% da CCA selecionada e cimento CPM Z 32 e ainda cimento CP IV. A avaliação da CCA selecionada em relação ao cimento CP IV se deu em função de que mesmo com o alto teor de pozolana já presente neste cimento sua cor é comercialmente aceita. Assim, caso a mistura contendo CCA apresentasse cor semelhante à do cimento CP IV, ainda estaria dentro dos padrões estabelecidos no mercado, não alterando a cor dos concretos e/ou argamassas com ela produzidos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processamento Mineral – LAPROM, do Centro de Tecnologia – CT, da UFRGS.

Também foi realizado o ensaio de expansibilidade à quente da pasta produzida com cimento e a CCA selecionada, segundo o método descrito na NBR 11582/1991. Essa determinação foi realizada depois de relatos feitos por Pouey (2006), em sua defesa de tese, onde as pastas, após a realização do ensaio de expansibilidade, foram deixadas no recipiente do ensaio, com água ainda quente, para resfriamento e posterior descarte. Passadas 24 horas do ensaio, foram detectadas expansões severas nas amostras com CCA, o que justifica a realização deste ensaio, nas mesmas condições relatadas pela autora, com a CCA selecionada.

Além disso, foi avaliada a fluidez de pastas produzidas com a CCA selecionada e produzida em escala frente ao uso do aditivo redutor de água indicado e seu desempenho foi comparado ao da SA e ao da CCA bruta. O ensaio escolhido foi o Cone de Kantro (*mini slump*), que é o método mais simples para indicar o quanto um aditivo é capaz de fluidificar pastas de cimento (com ou sem pozolanas), assim como alterações da fluidez da pasta ao longo do tempo. Embora não possa definir o teor de aditivo adequado para determinado concreto, tem como vantagem a avaliação exclusiva do efeito do aditivo, sem a interferência de agregados que possam influenciar no desempenho final. (SPONHOLZ, 1998).

Utiliza-se um tronco de cone feito de acrílico, cujas dimensões são: altura 6,00cm, diâmetro inferior de 4,00cm e diâmetro superior de 2,00cm, munido de um corpo cilíndrico externo. A Figura 4.7 ilustra o conjunto placa de vidro/Cone de Kantro.



Figura 4.7 – Equipamento para ensaio de Cone de Kantro

Para a realização do ensaio, coloca-se o molde tronco-cônico sobre a placa de vidro, preenche-se com a pasta e faz-se o rasamento. Na seqüência, levanta-se o molde de forma que a pasta flui livremente até seu equilíbrio em repouso. O ensaio consiste em medir a área de espalhamento da pasta sobre uma placa de vidro liso, plano e nivelado horizontalmente.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira seguiu a metodologia proposta por Sponholz (1998). Eram colocados o material cimentante com aproximadamente 85% da água e a argamassadeira era ligada na velocidade lenta⁹ por 30 segundos; a seguir, por mais 30 segundos na velocidade rápida. Na seqüência, a argamassadeira era desligada por 60 segundos e ligada novamente por 60 segundos na velocidade rápida¹⁰, para homogeneização. Nos próximos 60 segundos, na velocidade lenta, era adicionado o superplastificante e o restante da água da mistura (15%) que servia para lavar o frasco onde estava o aditivo. Finalmente, mais 60 segundos na velocidade rápida, totalizando 300 segundos de mistura (5 minutos).

A pasta de cimento produzida era colocada no molde tronco-cônico com auxílio de um funil e adensada com bastão de vidro, quando necessário. Na seqüência, o funil era retirado em cinco segundos e as leituras dos quatro raios ortogonais, desenhados em papel milimetrado fixado sob a base de vidro, eram feitas após 60 segundos da retirada

⁹ Velocidade lenta: giro (140±5) rpm; planetário (62±5) rpm.

¹⁰ Velocidade rápida: giro (285±10) rpm; planetário (125±10) rpm

do molde. O molde era imediatamente limpo para realização de uma segunda determinação, com a mesma pasta, no mesmo tempo de mistura. A seguir, a pasta era colocada em um recipiente hermeticamente fechado para realização das leituras subseqüentes. Um minuto antes de cada nova leitura o recipiente era aberto e a pasta era agitada com um bastão de vidro para homogeneização. A temperatura ambiente durante a realização dos ensaios foi da ordem de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Foram produzidas pastas com CCA bruta e CCA selecionada (15% de substituição em volume absoluto de cimento), SA (8% de substituição em volume absoluto de cimento) e uma pasta de referência, todas com relação água/material cimentante fixa em 0,3. Os tempos estabelecidos para as leituras foram 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos, contados a partir do término da mistura. O aditivo utilizado foi aquele cujas argamassas apresentaram melhor desempenho. Foi utilizado o mesmo teor de aditivo empregado na produção das argamassas, descritas em 4.6, denominado teor exigido (ANEXO 4). Além disso, foram também avaliados os teores 0,5 e 1,0 litros/100kg de cimento, limites mínimo e máximo, respectivamente, indicados pelo fabricante.

4.8 2ª Etapa: Produção de CAD com CCA de baixo teor de carbono

Os concretos foram produzidos com traço 1:3 (material cimentante:agregados – em massa), e 56% de teor de argamassa (em massa), resultando num traço desdobrado de 1:0,248:0,992:1,76:a/c (material cimentante:areia fina:areia média: relação água/material cimentante). Foram utilizadas como pozolanas a sílica ativa e a CCA selecionada ao final da 1ª etapa do programa experimental, cimento CP II F-32, os mesmos agregados miúdos da argamassa (areia fina 20% e areia média 80%), brita granítica, com diâmetro máximo 9,5mm e duas relações a/c: 0,3 e 0,4. As características dos materiais foram descritas em 4.2.

Para cada relação a/c foi produzido um concreto de referência (sem pozolana), um concreto com CCA e um concreto com SA, nos mesmos teores utilizados para as argamassas, 15% e 8%, respectivamente. As substituições foram feitas em volume absoluto de cimento.

O abatimento de tronco de cone (*slump test*) estabelecido para os concretos, avaliado segundo procedimento descrito pela NM 67/1996 e conseguido por meio do uso de

aditivo superplastificante foi de (16 ± 2) cm, adequando à produção de CAD em centrais dosadoras de concreto e à utilização de bombas para seu lançamento. Outra razão para que se adotasse um abatimento desta grandeza se deve ao fato que alguns dos aditivos redutores de água hoje utilizados (superplastificantes) têm um tempo de ação médio de 45 minutos. A produção de um concreto de abatimento elevado facilita muito o seu adensamento, diminuindo o risco de perda de abatimento pelo fim da ação do aditivo, ou mesmo a perda de eficiência deste, antes do acabamento das peças.

A produção dos concretos obedeceu a seguinte ordem de mistura:

8. agregado graúdo + 20% da água da mistura;
9. material cimentante + restante da água;
10. aditivo redutor de água; e
11. agregado miúdo.

A Tabela 4.16 apresenta as quantidades de material/m³ para cada um dos concretos produzidos.

Tabela 4.16 – Quantidade de material para 1m³de concreto¹¹

Material	Referência		CCA selecionada		SA		
	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	
Cimento (kg)	572,0	541,0	486,2	459,9	526,2	497,7	
Pozolana (kg)		-	62,8	59,4	32,9	31,1	
Areia fina (kg)	141,8	134,2	141,8	134,2	141,8	134,2	
Areia média (kg)	567,4	536,7	567,4	536,7	567,4	536,7	
Brita (kg)	1006,6	952,2	1006,6	952,2	1006,6	952,2	
Água (litros)	171,6	216,4	171,6	216,4	171,6	216,4	
Aditivo	(litros/100 kg)	0,679	0,113	0,660	0,173	0,770	0,247
	(kg)	4,22	0,66	4,10	1,02	4,79	1,45
Slump test (cm)	18,0	14,0	18,0	14,0	14,5	16,5	

Feita a mistura, realizava-se o ensaio de abatimento de tronco de cone. Caso o abatimento especificado não fosse alcançado em função de um teor inadequado de aditivo redutor de água, a mistura era descartada e o processo era novamente iniciado. Para a produção dos seis diferentes concretos apresentados na Tabela 4.14, foram

¹¹ A quantidade dos materiais foi calculada em relação aos consumos de cimento dos concretos de referência.

produzidas 26 misturas A Figura 4.8 ilustra o concreto com CCA, relação $a/c = 0,4$, no momento do ensaio de abatimento de tronco de cone.



Figura 4.8 - Concreto com CCA, $a/c = 0,4$

Após o ajuste do abatimento de tronco de cone, eram moldadas, seguindo a NBR 5738/2003, com uso de vibrador de imersão, duas séries de corpos-de-prova (CP's) cilíndricos, de dimensões (10 x 20) cm: uma série para avaliação da resistência à compressão axial, composta por 24 CP's e outra, com 18 CP's, para investigação do concreto sob ataque de sulfatos, a ser descrito no item 4.9. No total, foram moldados 252 corpos-de-prova, sendo 42 para cada concreto produzido

Os corpos-de-prova permaneciam nos moldes durante 24 horas. Após esse período, era procedida a desforma. Seleccionavam-se os CP's para ruptura com um dia de idade e os demais eram conduzidos à cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, onde permaneciam até as datas de ruptura (1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias). Os corpos-de-prova eram retirados da cura uma hora antes da ruptura e capeados com pasta de enxofre para regularização das superfícies, segundo a NM 77/1996. Foram rompidos quatro CP's para cada idade de ensaio.

4.9 Investigação do Concreto Submetido ao ataque por Sulfatos

4.9.1 Preparação dos concretos

O desempenho dos concretos frente ao ataque por sulfatos foi avaliado segundo metodologia indicada por Prudêncio Jr. (1993), utilizando-se testes de expansibilidade e resistência à flexão. Nestes testes foram utilizadas amostras de concreto cilíndricas, de pequenas espessuras, obtidas por corte dos corpos-de-prova previamente preparados, uma vez que, como já descrito no capítulo 2, esta geometria favorece a variação das propriedades mecânicas e de volume (medidas pela expansão), já que a relação área de exposição/volume da amostra é alta (Prudêncio Jr, 1993). Para tanto, foram produzidos os mesmos concretos previstos na Tabela 4.16.

Como já citado anteriormente, foram produzidos 18 corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões (10 x 20) cm, para cada concreto. Após a moldagem, os corpos-de-prova destinados à avaliação por ataque de sulfatos foram levados à cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio por sete dias. Decorrido este período, os corpos-de-prova eram levados à serra de corte para produção das fatias de concreto de pequena espessura (em média 6,0 mm). Para a produção destas fatias foi utilizado apenas o terço central de cada corpo-de-prova. Desta forma, tentou-se evitar o uso de concreto que poderia ter sido submetido ao fenômeno da segregação e/ou exsudação durante o processo de moldagem do corpo-de-prova, prejudicando a amostra. Foram produzidas, 70 fatias para cada tipo de concreto, totalizando 420 fatias para toda a pesquisa. A Figura 4.9 mostra parte de uma das séries de fatias produzidas.



Figura 4.9 – Fatias de concreto para avaliação do ataque por sulfato

Depois da produção das fatias, as mesmas foram novamente imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio por mais 83 dias, totalizando 90 dias de cura inicial. Este longo período de cura antes de serem expostos ao meio sulfatado se justifica para que seja possível o desenvolvimento das reações pozolânicas nos concretos em estudo, permitindo que seja avaliado seu verdadeiro potencial frente ao ataque por sulfatos.

Após os 90 dias de cura inicial, as amostras foram divididas em duas séries: uma de referência, que continuou no mesmo meio de cura (solução saturada de hidróxido de cálcio) e uma outra que foi submetida ao ataque por sulfatos.

4.9.2 Cura em solução agressiva de sulfato de sódio

Os testes voltados ao estudo de concretos em meios sulfatados apresentam diferentes concentrações da solução agressiva. Entretanto a ASTM C 1012 (1989) recomenda a adoção de uma solução de concentração de 5% de sulfato de sódio, o que corresponde a um teor de SO_3 de 2,8%. Com base nos trabalhos de Silva Filho (1994) e Silveira (1996), a solução agressiva de sulfato de sódio utilizada neste experimento atendeu o que preconiza a ASTM C 1012 (1989). Para cada unidade de volume de corpo-de-prova (fatia com 100,0 mm de diâmetro médio e 6,0mm de espessura média) havia quatro volumes de solução.

O controle do pH desta solução é muito importante, já que a combinação dos íons de sulfato com os elementos do concreto altera a concentração da solução ao longo do tempo, causando variação da agressividade da mesma. Assim, de forma a garantir a manutenção do pH da solução, foi realizada a troca semanal da mesma. Após a retirada da solução de cada lote de amostras para realização dos ensaios previstos, era removido o volume de solução correspondente à relação estabelecida (uma amostra = quatro volumes de solução) para que fosse mantida a proporção de solução em relação ao volume das amostras imersas. Ao final do período de ensaio, ou seja, 180 dias após o início do ataque dos concretos por sulfato, foram utilizados 228 litros de solução agressiva.

4.9.3 Avaliação da expansibilidade dos concretos

Para cada concreto foram selecionadas, aleatoriamente, quatro fatias para a avaliação da expansibilidade das amostras imersas em sulfato de sódio e três fatias para aquelas em solução de hidróxido de cálcio. Nelas foram coladas pastilhas metálicas de furo centrado em ambas as faces, distantes entre si, aproximadamente 5 cm, para realização das medidas de expansão, logo após a produção das fatias. As medidas de expansão foram realizadas com um alongômetro mecânico, Marca *Ploog. Eng. Co*, com sensibilidade de 0,002mm. As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 ilustram, respectivamente, o alongômetro, a amostra preparada para o ensaio, e o momento da medida de expansão.



Figura 4.10 – Alongômetro utilizado para as medidas de expansão por ataque de sulfatos

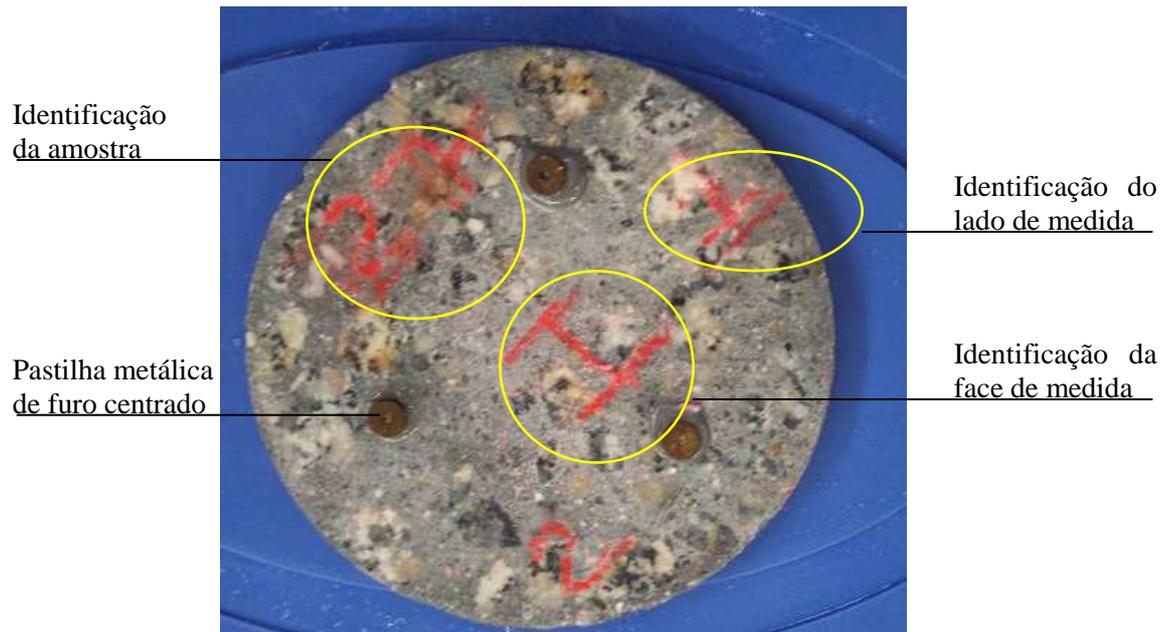


Figura 4.11 – Fatia de concreto preparada para o ensaio de expansão por ataque de sulfatos

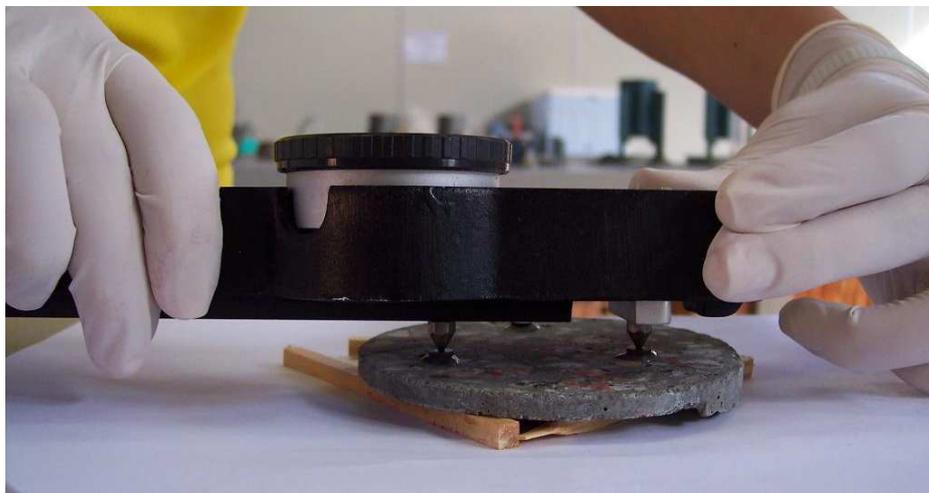


Figura 4.12 – Medida de expansão dos concretos submetidos ao ataque por sulfatos

As idades de ensaio estabelecidas para o ensaio de expansão foram 0, 15, 30, 60, 90 e 180 dias, contadas a partir dos 90 dias de cura inicial. Na data de cada ensaio, as amostras eram retiradas da solução de cura e eram feitas as medidas de expansão em cada uma delas. Para cada um dos lados de medida eram feitas no mínimo três leituras, desde que o coeficiente de variação (CV) encontrado entre elas não fosse superior a 0,2%. Caso isso acontecesse, o ensaio era repetido até que o coeficiente de variação dos

valores medidos ficasse dentro do limite estabelecido Após o ensaio, as amostras voltavam às respectivas soluções de cura e determinava-se o cálculo da expansão das amostras submetidas ao ataque por sulfato.

Conforme ilustrado nas Figuras 4.11 e 4.13, a maneira como as pastilhas foram coladas forma um triângulo. Conhecidos os lados de um triângulo, e conseqüentemente seu perímetro, é possível calcular sua área, da seguinte forma:

$$A = \sqrt{p(p - L_1)(p - L_2)(p - L_3)} \quad (4.1)$$

Onde:

A é a área da triângulo, em cm^2 ;

p é o semi-perímetro do triângulo, em cm; e

L_1 , L_2 e L_3 , são as medidas dos lados do triângulo, em cm.

Uma vez conhecida a área do triângulo, é possível determinar o diâmetro da circunferência que o inscreve da seguinte forma:

$$\phi = 2 \left[\left(\frac{L_1 L_2 L_3}{4} \right) A \right] \quad (4.2)$$

Onde:

ϕ é o diâmetro da circunferência, em cm;

A é a área do triângulo, em cm^2 ; e

L_1 , L_2 e L_3 , são as medidas dos lados do triângulo, em cm.

A avaliação da expansão das amostras, provocada pelo ataque de sulfatos, foi feita em relação ao aumento do diâmetro das circunferências que inscreve os triângulos formados pelas pastilhas, percentualmente, em relação ao diâmetro inicial de cada uma,

ou seja, antes do ataque por sulfatos. Para o cálculo, foi feita a média dos diâmetros/amostra, considerando as leituras feitas em cada uma das faces e, por fim, a média geral das amostras.

4.9.4 Avaliação da resistência à flexão dos concretos

O teste de flexão foi realizado segundo o ensaio de 4 pontos, proposto por Feldmann (1991) *apud* Prudêncio Jr (1993), cuja representação esquemática aparece na Figura 4.13. A opção por este ensaio se deu devido à baixa dispersão apresentada em função da forma de ruptura induzida pelo mesmo. A Figura 4.14 mostra o momento do ensaio.

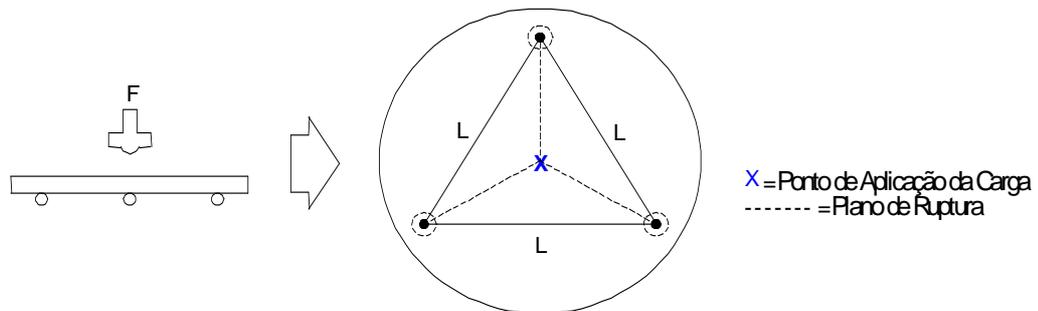


Figura 4.13 – Representação esquemática do ensaio de resistência à flexão
(Fonte: PRUDÊNCIO Jr, 1993)



Figura 4.14 – Amostra preparada para o ensaio de ensaio de resistência à flexão

As idades estabelecidas para o ensaio de resistência à flexão foram também 0, 15, 30, 60, 90 e 180 dias, contadas a partir dos 90 dias de cura inicial. Nas datas de ruptura, as amostras eram retiradas da solução minutos antes do ensaio.

Realizadas as determinações de expansão e resistência à flexão, os resultados foram tratados para que se pudesse estabelecer um panorama de desempenho do concreto com CCA frente ao ataque por sulfato em relação ao concreto produzido com SA e aquele produzido sem adição de pozolana.

4.10 Investigação do Concreto Submetido à RAA

Diante dos resultados apresentados por Silveira (2001), citados no capítulo 2, realizou-se a análise da CCA com baixo teor de carbono frente ao desenvolvimento de RAA.

No estudo da RAA foi utilizado o procedimento descrito pela ASTM 1260 (1997), descrito no capítulo 2, item 2.4.1. A opção por este método se deu pela possibilidade de variação dos teores de adição das pozolanas avaliadas - CCA e SA, tendo sido empregados os mesmos teores dos concretos produzidos neste trabalho: 15% e 8%, respectivamente. As argamassas de referência (sem pozolana), com CCA e com SA, foram preparadas na proporção 1:2,25, conforme estabelece o método de ensaio adotado, com relação água/materiais cimentantes fixa em 0,47. O agregado reativo utilizado foi o vidro *pyrex*. Estes ensaios foram realizados por FURNAS Centrais Elétricas/GO. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram as argamassas no dia da desmoldagem e as Figuras 4.18 e 4.19 mostram a retirada das barras para leitura inicial, após 24 horas de imersão em água destilada e o momento da medida da barra, respectivamente.



Figura 4.15 – Argamassa de referência, no dia da desmoldagem

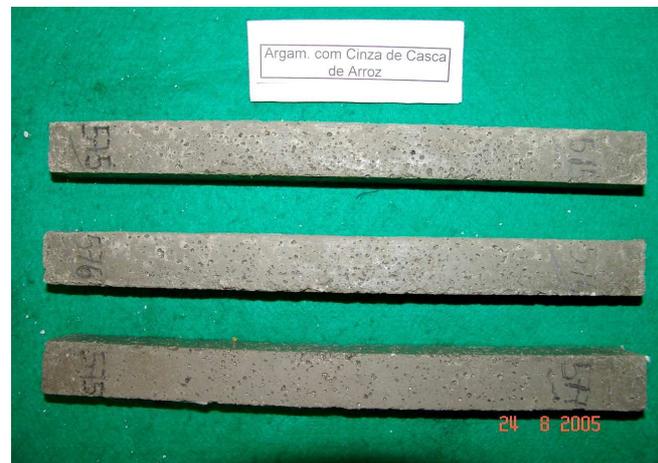


Figura 4.16 – Argamassa com CCA no dia da desmoldagem



Figura 4.17 – Argamassa com SA no dia da desmoldagem



Figura 4.18 – Retirada das barras do tanque para leitura inicial



Figura 4.19– Medida da barra realizada no conjunto suporte e relógio comparador digital

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação do teor de carbono

A Tabela 5.1 traz os resultados de perda ao fogo obtidos para todas as CCA's produzidas. A CCA bruta apresentou teor de carbono de 17,62%.

Tabela 5.1 – Perda ao fogo das diferentes CCA's.

Temperatura (°C)	Tempo de retenção (minutos)	Tempo de moagem (horas + minutos)	Perda ao fogo valor % médio ¹²	Perda ao fogo média (%)	
800	80	1h	0,987	1,0	
	60		1,113		
	40		1,015		
	80	80	1h+3	0,571	0,6
		60		0,549	
		40		0,573	
	80	80	2h+3	0,507	1,0
		60		1,498	
		40		0,889	
700	80	1h	0,987	1,1	
	60		1,025		
	40		1,249		
	700	80	1h+3	0,832	0,8
		60		0,822	
		40		0,628	
	700	80	2h+3	1,600	1,0
		60		0,712	
		40		0,601	
600	80	1h	1,344	1,4	
	60		1,450		
	40		1,435		
	600	80	1h+3	1,077	1,1
		60		1,692	
		40		0,617	
	600	80	2h+3	1,206	1,1
		60		1,144	
		40		1,080	
500	80	1h	1,741	1,8	
	60		1,647		
	40		1,979		
	500	80	1h+3	1,192	1,0
		60		0,999	
		40		0,892	
	500	80	2h+3	1,125	1,4
		60		1,508	
		40		1,599	

¹² Valor obtido a partir da média de duas determinações.

Observa-se que quanto maior a temperatura de requeima, menor a perda ao fogo, uma vez que se libera mais carbono em temperaturas mais elevadas, indicando que a temperatura de requeima das cinzas tem influência direta nesta propriedade do material.

Teoricamente, para o tempo de retenção, o comportamento da variação de perda ao fogo deveria ser semelhante ao da temperatura, ou seja, quanto maior o tempo de retenção, menor o valor encontrado. Esse comportamento não foi constatado, possivelmente devido à pequena variação existente entre os tempos de retenção adotados, que foi de apenas 20 minutos, não sendo possível estabelecer uma tendência de comportamento em relação a esta variável.

Analisando-se os tempos de moagem, percebe-se que, para o tempo de 1h, os valores médios de perda ao fogo por temperatura foram os maiores obtidos; já para os tempos de moagem 1h+3 e 2h+3, ao contrário do que se esperava, a retirada do carbono foi maior para o tempo de moagem menor, 1h+3.

Os resultados encontrados indicam que o sistema industrial proposto para a produção de cinza de casca de arroz com teores reduzidos de carbono é capaz de produzir, sob diferentes condições de requeima, um material com menos de 3% de carbono residual, considerado como de baixo teor de carbono (MAEDA *et al.*, 2001). Isso levou à obtenção de CCA's mais claras, em relação à CCA bruta, não afetando a cor das argamassas e concretos com elas confeccionados.

5.2 Avaliação da granulometria e massa específica

A Tabela 5.2 resume os resultados obtidos nos ensaios de granulometria e massa específica para as CCA's produzidas.

Tabela 5.2 – Massa específica e tamanho das partículas.

Condição de moagem	Temperatura de requeima (°C)	Massa específica média ¹³ (g/cm ³)	Tamanho das partículas (µm)		
			< ϕ_{10}	< ϕ_{50}	< ϕ_{90}
1h	500	2,21	1,67	5,70	14,84
	600	2,20	1,93	6,96	18,52
	700	2,19	3,34	11,94	35,11
	800	2,25	2,66	9,22	24,82
1h+3	500	2,21	1,97	7,46	20,22
	600	2,20	2,07	7,76	20,80
	700	2,19	2,16	7,97	21,46
	800	2,25	2,52	8,83	23,15
2h+3	500	2,25	1,72	5,73	14,49
	600	2,22	1,91	6,88	18,11
	700	2,27	2,09	7,24	18,94
	800	2,25	2,11	7,94	21,13

Com relação ao diâmetro médio das partículas, a condição de moagem 1h resultou em CCA's com 50% das partículas entre 5,70µm e 11,94µm; para a moagem 1h+3, 50% das partículas das CCA's tiveram diâmetro médio entre 7,46µm e 8,83µm; já o tempo de moagem de 2h+3 gerou elementos mais finos, contendo 50% do material entre 5,73µm e 7,94µm de diâmetro médio para todas as CCA's. Observa-se ainda que às temperaturas 500°C e 600°C, a condição de moagem de 1h apresentou elementos mais finos que a condição de moagem 1h+3. Isso pode ser devido ao teor de carbono das misturas. De acordo com o Químico Carlos Rischbieter, em entrevista realizada em janeiro de 2005, o carbono 12, presente na cinza de casca de arroz em função da combustão da matéria orgânica presente na casca (lignina e celulose), é naturalmente um facilitador de moagem. Como para as temperaturas de 500°C e 600°C o teor residual de carbono foi maior (Tabela 5.1), estas apresentaram maior facilidade de moagem, resultando em partículas mais finas.

Os valores obtidos nas condições de moagem 1h+3 e 2h+3 apresentaram menores intervalos de variação, nas três faixas de diâmetro avaliadas, se comparadas à condição de moagem de 1h. A maior variação do diâmetro das partículas para a condição de moagem de 1h pode ter ocorrido pela formação de grumos durante o processo de retirada do carbono (requeima) e dificuldade de retomada da granulometria estabelecida

¹³ Valor obtido pela média de duas determinações

na pré-moagem, uma vez que diferença entre a condição de moagem de 1h e 1h+3 é a pós-moagem de 3 minutos por qual passa essa última.

Quanto à massa específica, os valores seguem os mesmos obtidos na literatura, em relação às cinzas residuais: Agopyan (1991) encontrou valores que variaram de 1,88 kg/dm³ a 2,11 kg/dm³, enquanto os valores encontrados por Rego (2004) ficaram no intervalo de 2,10 kg/dm³ a 2,30 kg/dm³.

5.3 Avaliação da reatividade do material

As resistências médias das argamassas produzidas com as diferentes CCA's com baixo teor de carbono estão na Tabela 5.3, 5.4 e 5.5. O ANEXO 4 traz os valores individuais de resistência à compressão axial obtidos para todas as argamassas.

É importante destacar que, para todas as cinzas avaliadas, o consumo de aditivos para a consistência estabelecida não sofreu alteração com a variação do tempo de retenção no forno, temperatura de requeima e diferentes condições de moagem. Além disso, para todos os casos, o consumo de aditivo ficou abaixo do limite mínimo preconizado pelo fabricante e não foi notada segregação em nenhuma das misturas produzidas.

Tabela 5.3 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 1h

Aditivo	N	M	P
Argamassa	Resistência Média (MPa)		
Referência	64,34	62,90	67,80
SA	68,08	78,64	72,19
CCA bruta 1 h	71,61	68,39	65,00
CCA bruta 2h	70,71	71,37	73,15
800/40	69,57	66,75	74,44
800/60	66,35	68,35	69,45
800/80	54,97	64,92	75,58
700/40	63,88	64,78	65,22
700/60	75,22	75,50	73,93
700/80	70,98	67,96	70,44
600/40	70,67	74,20	73,80
600/60	70,12	71,89	77,07
600/80	68,94	74,75	74,08
500/40	71,77	76,64	79,19
500/60	74,99	72,87	80,09
500/80	74,09	75,91	78,91

Tabela 5.4 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 1h+3

Aditivo	N	M	P
Argamassa	Resistência Média (MPa)		
Referência	64,34	62,90	67,80
SA	68,08	78,64	72,19
CCA bruta 1 h	71,61	68,39	65,00
CCA bruta 2h	70,71	71,37	73,15
800/40	68,70	71,93	77,58
800/60	63,44	67,54	76,67
800/80	70,98	70,78	70,94
700/40	68,81	70,55	74,20
700/60	65,76	66,65	68,69
700/80	67,42	68,40	70,43
600/40	73,17	71,23	81,12
600/60	68,87	76,00	73,73
600/80	68,54	67,92	72,40
500/40	64,23	72,78	76,75
500/60	73,62	74,05	72,76
500/80	71,27	72,24	73,89

Tabela 5.5 – Argamassa com CCA – Condição de moagem 2h+3

Aditivo	N	M	P
Argamassa	Resistência Média (MPa)		
Referência	64,34	62,90	67,80
SA	68,08	78,64	72,19
CCA bruta 1 h	71,61	68,39	65,00
CCA bruta 2h	70,71	71,37	73,15
800/40	73,45	78,37	73,97
800/60	75,77	74,77	75,04
800/80	67,48	70,07	67,77
700/40	70,98	73,15	82,76
700/60	74,59	77,35	81,43
700/80	74,71	79,90	79,85
600/40	70,75	74,12	76,24
600/60	68,78	72,54	75,92
600/80	77,81	84,57	78,99
500/40	68,85	77,49	74,52
500/60	72,17	79,03	79,94
500/80	75,46	78,11	84,91

Avaliando-se os resultados de resistência média à compressão axial das argamassas, é possível observar, em relação aos aditivos, que:

- ✓ Com o aditivo N na condição de moagem de 1h as argamassas 800/80 e 700/40 apresentaram resistência média inferior à da argamassa de referência; para a condição de moagem 1h+3, as argamassas 800/60 e 500/40 mostraram resultados abaixo daqueles da argamassa de referência; para a condição de moagem 2h+3 todas as argamassas superaram os resultados da argamassa de referência. A Figura 5.1 ilustra o comportamento observado.
- ✓ Para o aditivo M, os resultados obtidos nas três condições de moagem superaram o resultado da argamassa de referência; e
- ✓ Para o aditivo P, condição de moagem 1h, apenas a argamassa 700/40 apresentou desempenho inferior ao da argamassa de referência, acontecendo o mesmo para a argamassa 800/80 na condição de moagem 2h+3; para a condição de moagem 1h+3, todas as argamassas superaram a resistência da argamassa de referência. A Figura 5.2 ilustra os resultados obtidos.

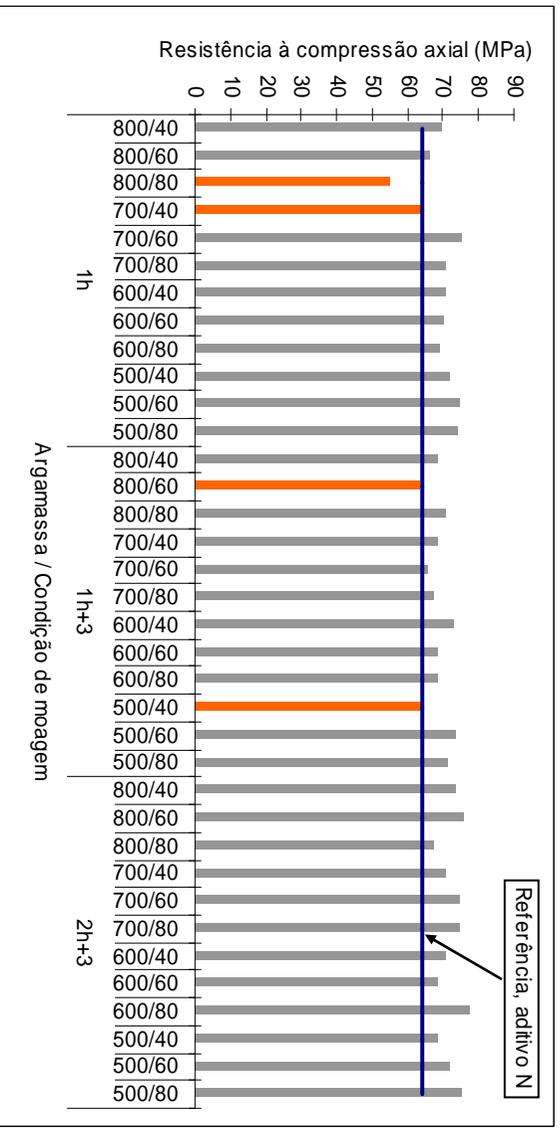


Figura 5.1 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa de referência, para o aditivo N

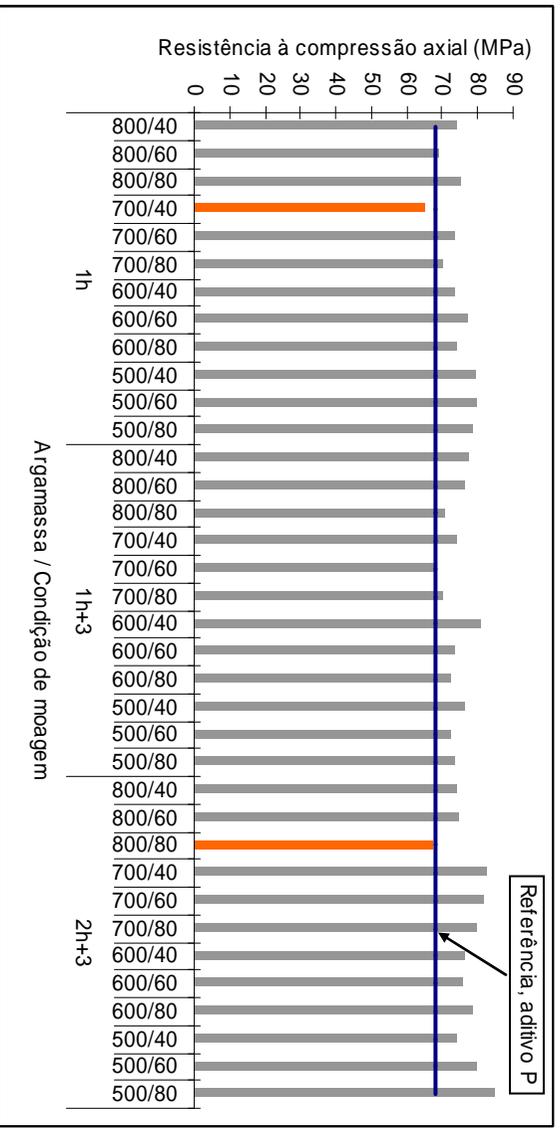


Figura 5.2 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa de referência, para o aditivo P

Analisando-se os resultados de resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono em relação àquelas produzidas com sílica ativa, é possível verificar que:

- ✓ Para o aditivo N (Figura 5.3), condição de moagem de 1h, as argamassas com CCA 800/60, 800/80 e 700/40, apresentaram valores inferiores para a condição de moagem de 1h+3, as argamassas com CCA 800/60, 700/60, 700/80 600/40 e 500/40 apresentaram desempenho inferior à argamassa com sílica ativa; já na condição de moagem 2h+3, somente a argamassa 800/80 não superou a resistência alcançada pela argamassa com sílica ativa;
- ✓ Para o aditivo M nenhuma argamassa com CCA superou o valor da argamassa com sílica ativa tanto na condição de moagem 1h quanto na condição de moagem 1h+3; na condição de moagem 2h+3, apenas as argamassas 700/80, 600/80 500/60 apresentaram desempenho superior à sílica ativa (Figura 5.4); e
- ✓ Para o aditivo P, condição de moagem 1h as argamassas 800/60 e 700/40 e 700/80 apresentaram valores inferiores àqueles da argamassa com da sílica ativa; na condição de moagem 1h+3, os valores obtidos para as argamassas 800/80, 700/60 e 700/80 foram inferiores ao da argamassa com sílica ativa; na condição de moagem 2h+3 apenas a argamassa 800/80 apresentou desempenho inferior àquele observado para a argamassa com sílica ativa (Figura 5.5).

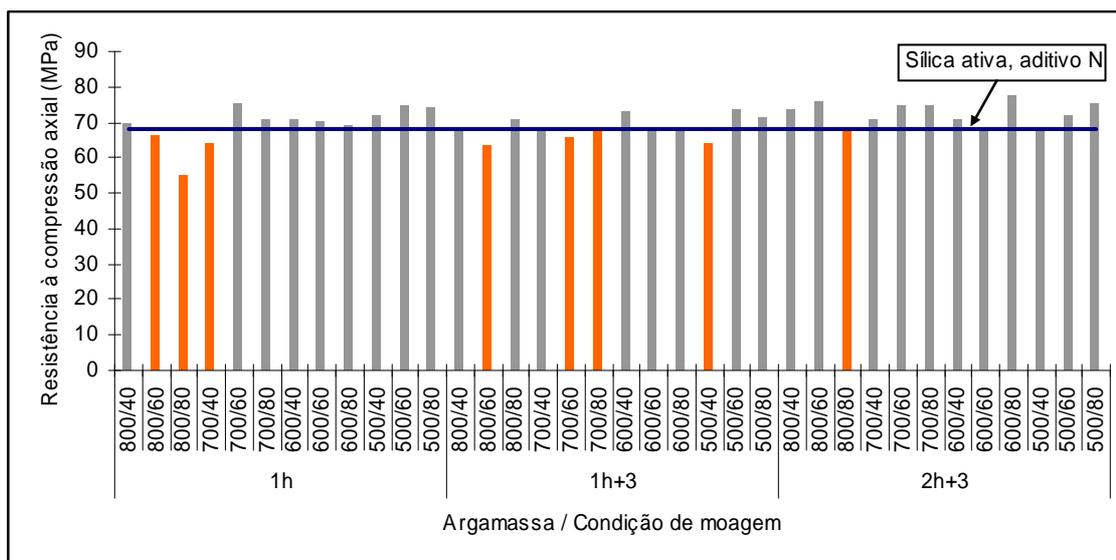


Figura 5.3 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo N

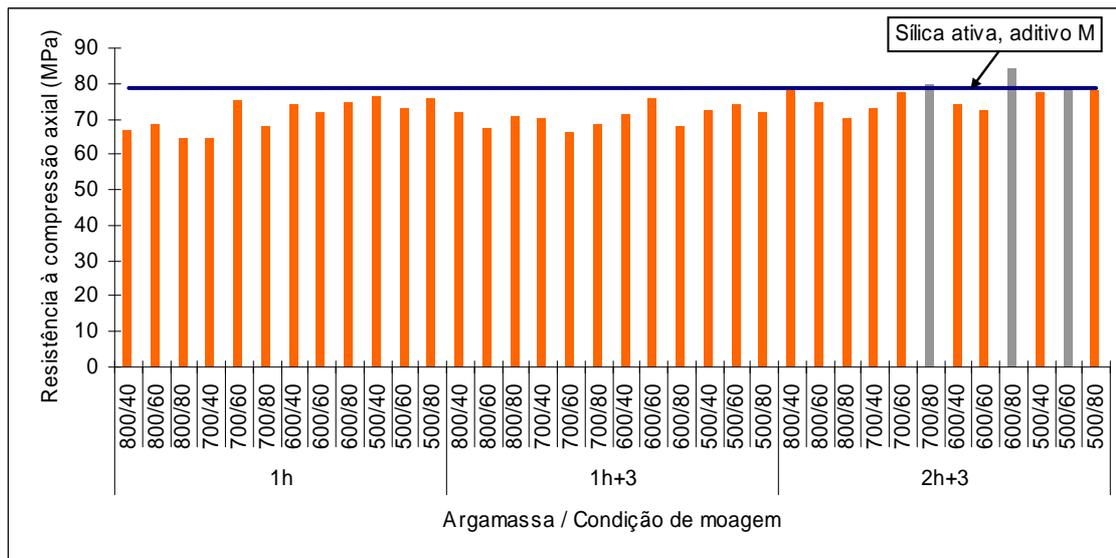


Figura 5.4 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo M

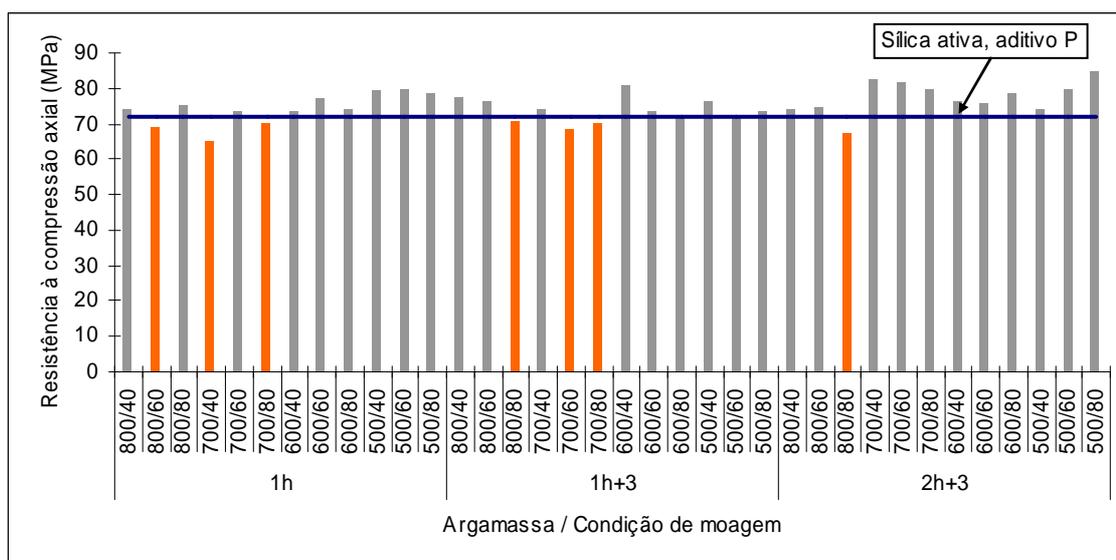


Figura 5.5 – Resistência à compressão axial das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com sílica ativa, para o aditivo P

Comparando-se as argamassas produzidas com CCA de baixo teor de carbono com as argamassas produzidas com CCA bruta, observa-se que:

- ✓ Para o aditivo N (Figura 5.6) condição de moagem 1h, as argamassas 700/60, 500/40, 500/60, 500/80 superaram os valores de resistência encontrados na CCA

bruta; na condição de moagem 1h+3 apenas as argamassas 600/40, 500/60 apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores à argamassa com CCA bruta, 1h de moagem; na condição de moagem 2h+3, as argamassas produzidas com CCA de baixo teor de carbono 800/80, 600/60 e 500/40 não superaram os resultados da argamassa com CCA bruta, 2h de moagem.

- ✓ Para o aditivo M (Figura 5.7) condição de moagem 1h, as argamassas 800/40, 800/60, 800/80 700/40 e 700/80 não superaram os valores de resistência encontrados na CCA bruta, 1h de moagem; na condição de moagem 1h+3 apenas as argamassas 800/60, 700/60 e 600/80 apresentaram valores de resistência à compressão axial inferiores aos da argamassa com CCA bruta, 1h de moagem; na condição de moagem 2h+3, somente a argamassa 800/80 apresentou valor de resistência à compressão axial inferior ao da argamassa com CCA bruta, 2h de moagem.
- ✓ Para o aditivo P (Figura 5.8) condição de moagem 1h e 1h+3, todas as argamassas com CCA de baixo teor de carbono alcançaram valores de resistência à compressão axial superiores à argamassa com CCA bruta, 1h de moagem. Para a condição de moagem 2h+3, apenas a argamassa 800/80 não superou o valor apresentado pela argamassa com CCA bruta, 2h de moagem.

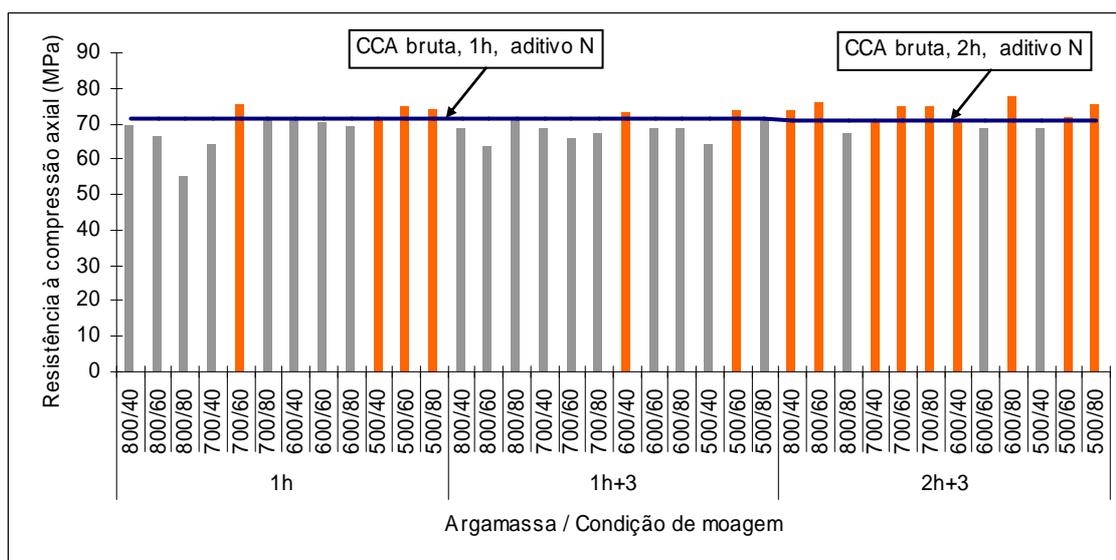


Figura 5.6 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo N

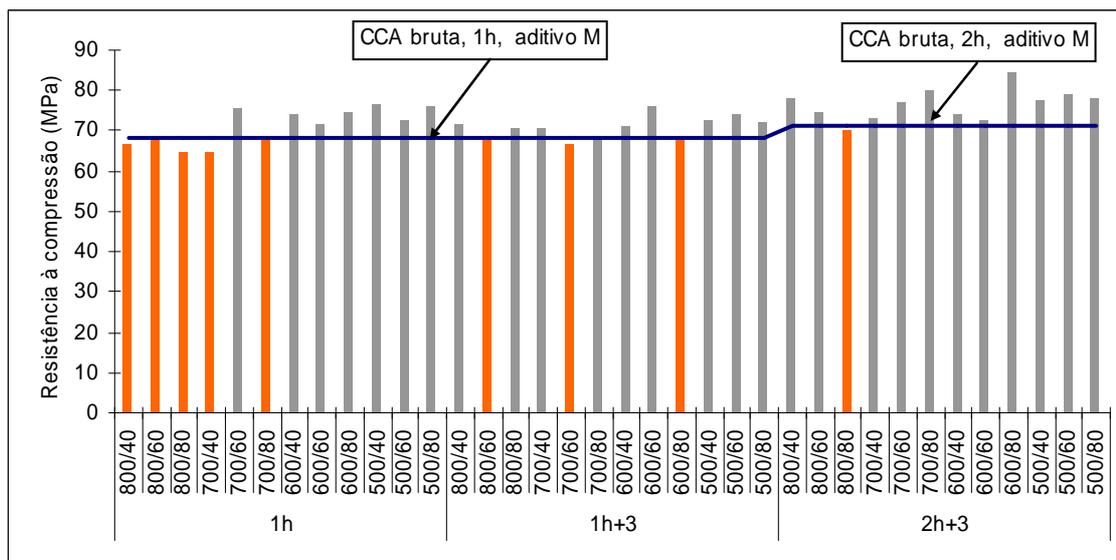


Figura 5.7 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo M

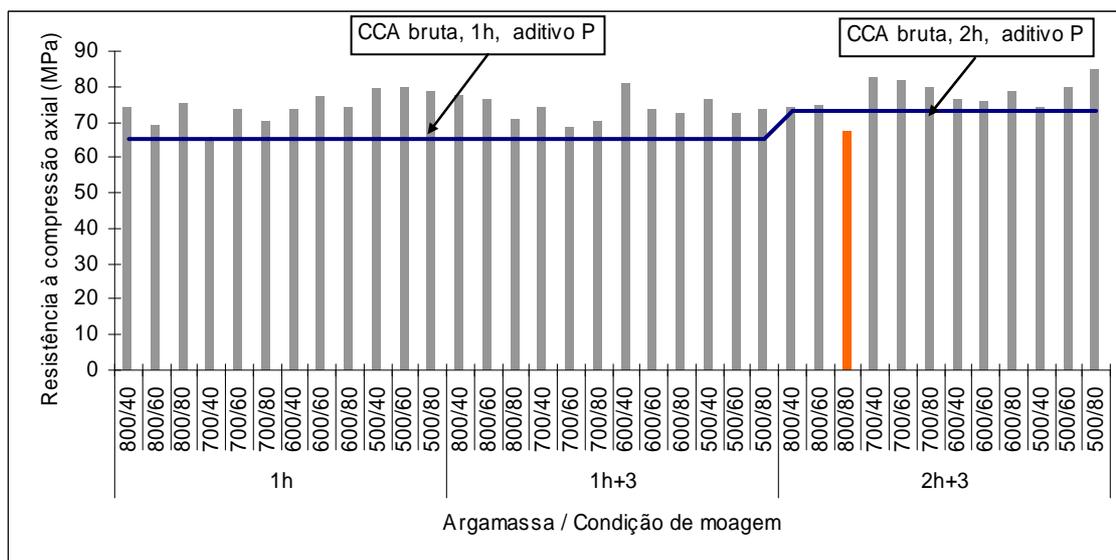


Figura 5.8 – Comportamento das argamassas com CCA de baixo teor de carbono, em relação à argamassa com CCA bruta, para o aditivo P

Observa-se que, na maioria dos casos, as argamassas cujo desempenho foi inferior ao da argamassa de referência, foram aquelas com temperatura de requieima de 800°C, o que indica que este nível de temperatura exerce maior influência sobre a qualidade da CCA com baixo teor de carbono como pozzolana.

Constata-se, ainda, que há influência das condições de moagem da cinza de casca de arroz sobre a resistência à compressão das argamassas. Considerando todos os valores obtidos, independentemente do tipo de aditivo utilizado, a média dos valores de resistência apresentados na condição de moagem 2h+3 supera os valores médios das condições de moagem 1h e 1h+3. Isso pode ser atribuído ao menor tamanho dos grãos obtidos na condição de moagem 2h+3, que colabora para um aumento da atividade pozolânica do material. Para esta condição de moagem as CCA's com baixo teor de carbono apresentaram maior concentração de partículas finas, com diâmetro inferior a $8\mu\text{m}$, o que também contribui de forma significativa para a melhoria de desempenho do material como pozolana ou mesmo como microfíler, proporcionando o refinamento dos poros, o que também colabora para o aumento da resistência mecânica.

5.4 Seleção do melhor material

Produzidas as argamassas e de posse dos resultados de resistência à compressão axial de cada uma delas (ANEXO 4) realizou-se uma análise estatística para avaliação dos resultados. O modelo adotado foi o fatorial, com três fatores de repetição, com 95% de confiança. As variáveis em questão eram temperatura de queima, tempo de retenção do material no forno, condição de moagem (1h, 1h+3 e 2h+3) e tipo de aditivo utilizado. A primeira análise feita considerou que o aditivo não seria um fator influente, sendo então avaliada a influência das outras três variáveis no resultado de resistência à compressão axial das argamassas. As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os resultados encontrados nesta etapa.

Tabela 5.6 – Análise Aditivo N

Fonte	GDL	SQ	MQ	F		F 0,05	Probabilidade
Total		1430,7762					
temperatura	3	154,2429	51,41430139	8,065137661	>	2,92	99,96920426
tempo de moagem	2	205,6082	102,8041014	16,1264319	>	3,32	99,99900168
tempo de retenção	2	18,406369	9,203184722	1,443663527	<	3,32	75,05983366
temperatura x tempo de moagem	6	198,63801	33,10633472	5,193246622	>	2,42	99,93837055
temperatura x tempo de retenção	6	285,60291	47,60048472	7,466880842	>	2,42	99,99695886
tempo de moagem x tempo de retenção	4	105,3295	26,33237431	4,130644937	>	2,69	99,25723739
temperatura x tempo de moagem x tempo de retenção	12	387,69549	32,30795764	5,068008684	>	2,09	99,99285385
Resíduo	36	229,49575	6,37488206				
Total	71						

Tabela 5.7 – Análise Aditivo M

Fonte	GDL	SQ	MQ	F		F 0,05	Probabilidade
Total		1587,3858					
temperatura	3	285,74018	95,24672778	8,005212633	>	2,92	99,96756478
tempo de moagem	2	509,9008	254,9504014	21,42784557	>	3,32	99,99992579
tempo de retenção	2	2,2842361	1,142118056	0,095991727	<	3,32	9,129673337
temperatura x tempo de moagem	6	94,837442	15,80624028	1,328468886	<	2,42	73,00182812
temperatura x tempo de retenção	6	107,42094	17,90349028	1,504736697	<	2,42	79,54662806
tempo de moagem x tempo de retenção	4	49,519806	12,37995139	1,040499192	<	2,69	60,01045641
temperatura x tempo de moagem x tempo de retenção	12	395,09138	32,92428194	2,767190894	>	2,09	99,09638505
Resíduo	36	428,33118	11,89808843				
Total	71						

Tabela 5.8 – Análise Aditivo P

Fonte	GDL	SQ	MQ (SQ/GDL)	F (MQ/MQ resíduo)		F 0,05	Probabilidade
Total		1568,396432					
temperatura	3	216,8941708	72,29805694	5,833850758	>	2,92	99,7650017
tempo de moagem	2	182,11	91,05285972	7,347207064	>	3,32	99,789058
tempo de retenção	2	11,36	5,677943056	0,458162692	<	3,32	36,39186834
temperatura x tempo de moagem	6	430,91	71,81778194	5,795096567	>	2,42	99,97341131
temperatura x tempo de retenção	6	68,09	11,34847639	0,915727481	<	2,42	50,50421206
tempo de moagem x tempo de retenção	4	146,8320139	36,70800347	2,962030004	>	2,69	96,74281113
temperatura x tempo de moagem x tempo de retenção	12	282,9625417	23,58021181	1,902726606	<	2,09	93,23051467
Resíduo	36	446,14272	12,39285336				
Total	71						

Para os três aditivos observa-se que a temperatura e o tempo de moagem, exercem influência sobre os resultados de resistência à compressão encontrados nas argamassas ($F > F_{0,05}$ - probabilidade maior que 95%). Já o tempo de retenção, ao contrário do que se esperava, não exerce influência sobre os resultados em nenhum dos casos ($F < F_{0,05}$). Esse comportamento pode ser associado ao pequena diferença entre eles.

Partiu-se, então, para uma nova análise, admitindo-se agora que o tempo de retenção não exerce influência sobre os resultados, analisando-se as variáveis temperatura, tempo de moagem e aditivo. As Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 trazem os resultados encontrados.

Tabela 5.9 – Análise tempo de retenção 40 minutos

Fonte	GDL	SQ	MQ (SQ/GDL)	F (MQ/MQ resíduo)		F 0,05	Probabilidade
Total		1564,19					
temperatura	3	129,3392486	43,11308287	6,807424459	>	2,92	99,90568732
tempo de moagem	2	159,8022583	79,90112917	12,61614491	>	3,32	99,99295638
aditivo	2	468,3241583	234,1620792	36,97347902	>	3,32	99,99999981
temperatura x tempo de moagem	6	363,3080972	60,55134954	9,560873647	>	2,42	99,9997281
temperatura x aditivo	6	77,06	12,84369398	2,027980157	<	2,42	91,28598194
tempo de moagem x aditivo	4	71,86	17,96490833	2,836604303	>	2,69	96,16584947
temperatura x tempo de moagem x aditivo	12	195,84	16,32012315	2,576897732	>	2,09	98,59751106
Resíduo	36	228,00	6,333244406				
Total	71						

Tabela 5.10 – Análise tempo de retenção 60 minutos

Fonte	GDL	SQ	MQ (SQ/GDL)	F (MQ/MQ resíduo)		F 0,05	Probabilidade
Total		1407,35					
temperatura	3	195,5641944	65,18806481	8,795921705	>	2,92	99,98345638
tempo de moagem	2	301,3728083	150,6864042	20,3323387	>	3,32	99,99987677
aditivo	2	257,0121083	128,5060542	17,33951137	>	3,32	99,99946763
temperatura x tempo de moagem	6	301,9715139	50,32858565	6,79091027	>	2,42	99,99289516
temperatura x aditivo	6	26,29	4,381085648	0,591146346	<	2,42	26,48317743
tempo de moagem x aditivo	4	20,86	5,215727083	0,703765746	<	2,69	40,54403191
temperatura x tempo de moagem x aditivo	12	233,05	19,42050023	2,620436732	>	2,09	98,73216519
Resíduo	36	266,80	7,41116929				
Total	71						

Tabela 5.11 – Análise tempo de retenção 80 minutos

Fonte	GDL	SQ	MQ	F		F 0,05	Probabilidade
Total		2613,18					
temperatura	3	633,8003375	211,2667792	8,028684512	>	2,92	99,96821763
tempo de moagem	2	552,7640083	276,3820042	10,50323163	>	3,32	99,97448408
aditivo	2	274,8056583	137,4028292	5,221663202	>	3,32	98,97947112
temperatura x tempo de moagem	6	360,296825	60,04947083	2,282035341	<	2,42	94,27610255
temperatura x aditivo	6	53,39	8,898473611	0,338165033	<	2,42	8,79099798
tempo de moagem x aditivo	4	80,70	20,17558333	0,766724395	<	2,69	44,6071359
temperatura x tempo de moagem x aditivo	12	343,91	28,65952778	1,089136246	<	2,09	60,2320883
Resíduo	36	947,30	26,31399688				
Total	71						

Sob esta ótica, os resultados mostram que temperatura, tempo de moagem e aditivo (efeitos de primeira ordem) exercem influência sobre os resultados obtidos. Com relação aos efeitos de segunda ordem, observa-se que à medida que o tempo de retenção aumenta, estes efeitos diminuem.

Uma vez observada a influência dos parâmetros estabelecidos para a produção do material, realizou-se uma nova análise, utilizando-se o Teste de DUNCAN (ANEXO 5), de forma a identificar diferenças significativas no resultados em função das temperaturas, dos tempos de moagem e dos aditivos estudados.

A análise apontou que, com relação à temperatura, não foi possível estabelecer diferenças significativas nos resultados médios de resistência à compressão das argamassas com aditivo N, tempo de moagem 1h+3 e 2h+3; aditivo M, tempo de moagem 1h+3 e 2h+3; aditivo P, tempo de moagem 1h+3. Os casos onde foram encontradas diferenças significativas apontam que a temperatura de 800°C apresenta o pior desempenho. Desprezando-se então os valores obtidos a esta temperatura, foi feita uma classificação geral dos valores médios de resistência à compressão axial obtidos, atribuindo-se notas de 1 a 3 que, em ordem decrescente, indicam a situação onde o melhor resultado foi alcançado. A variável que apresentou maior número de vezes a nota 1 é a aquela com melhor desempenho em relação à resistência à compressão axial. A Tabela 5.12 mostra esta classificação.

Tabela 5.12 – Classificação geral das argamassas em função da temperatura.

Temperatura (°C)		500	600	700
aditivo	Tempo de moagem	Classificação (ordem decrescente)		
N	1h	1	3	2
	1h+3	2	1	3
	2h+3	3	2	1
M	1h	1	2	3
	1h+3	1	2	3
	2h+3	1	2	3
P	1h	2	3	1
	1h+3	2	1	3
	2h+3	1	2	3

Observa-se que existe uma tendência dos melhores resultados, em ordem decrescente, serem obtidos às temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C, respectivamente.

Com relação ao aditivo, já se desprezando a temperatura de 800°C, foi possível estabelecer diferenças significativas (ANEXO 5) entre os resultados das argamassas, 500°C 2h+3 e 700°C, 2h+3. Realizou-se também uma classificação geral dos valores médios obtidos, a exemplo do que foi feito com as temperaturas (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 – Classificação geral das argamassas em função dos aditivos.

Aditivo		N	M	P
Temperatura (°C)	Tempo de moagem	Classificação (ordem decrescente)		
500	1h	3	2	1
	1h+3	3	2	1
	2h+3	3	2	1
600	1h	3	2	1
	1h+3	3	2	1
	2h+3	3	1	2
700	1h	1	3	2
	1h+3	3	2	1
	2h+3	3	2	1

É possível perceber que existe uma forte tendência de que o melhor desempenho se dê com o aditivo de base policarboxilato, possivelmente por este aditivo ter conseguido maior dispersão das partículas, que, ao não se agruparem, têm facilitado o desenvolvimento da reação pozolânica.

Partindo-se então para análise do tempo de moagem e excluindo-se também os aditivos N e M, foi possível verificar (ANEXO 6) que existe diferença significativa entre as condições de 1h+3 e 2h+3, sendo que este último apresenta maiores valores absolutos em todos os casos.

Diante disso, o estudo estatístico indicou que, neste caso específico, do ponto de vista da resistência à compressão axial, os melhores materiais seriam obtidos com os seguintes parâmetros de produção: temperatura de 500°C ou 700°C, com tempo de moagem de 2h+3 e, no caso da produção de concreto, usando-se um aditivo de base policarboxilato. Como o tempo de retenção não exerce influência no desempenho, a princípio, o menor deles, 40 minutos, seria o mais econômico. Por outro lado, os resultados mostraram que o aumento do tempo de retenção reduz o efeito de segunda ordem sobre os resultados de resistência à compressão axial obtidos. Diante disso, a adoção do valor intermediário (60 minutos), poderia ser a melhor solução, uma vez que mais tempo no forno (80 minutos) representa maior consumo de energia e menor produtividade. A Tabela 5.14 mostra as características das duas cinzas selecionadas.

Tabela 5.14 – Características das CCA´s selecionadas

CCA	Teor de carbono residual (%)	Tamanho das partículas (µm)		
		< ϕ_{10}	< ϕ_{50}	< ϕ_{90}
500/60/2h+3	1,508	1,72	5,73	14,49
700/60/2h+3	0,712	2,09	7,29	18,94

Com base nos resultados apresentados acima, a CCA 500/60/2h+3 seria o melhor material, uma vez que apresenta menor diâmetro médio das partículas. Apesar de possuir um teor de carbono residual maior que o da CCA 700/60/2h+3, o valor encontrado está abaixo do especificado por Maeda *et al.* (2001) para cinzas de casca de arroz com baixo teor de carbono: 3%. Já a CCA 700/60/2h+3 apresentou menor teor de carbono se comparada à CCA 500/60/2h+3, porém o diâmetro médio das partículas foi superior. Sabe-se que este parâmetro interfere na reatividade do material. Contudo, como já foi mostrado anteriormente, não há, estatisticamente, diferença significativa entre os valores de resistência obtidos para os dois materiais.

Cabe destacar que, utilizando-se o equipamento de moagem hoje disponível na empresa, o custo de moagem do material ficaria em US\$21/tonelada para a condição de moagem de 1h+3 e US\$29/tonelada para a condição de moagem de 2h+3.

Coube então à Rischbieter – Engenharia Indústria e Comércio Ltda, considerando fatores como facilidade de manutenção da temperatura no sistema implantado e consumo energético do processo, apontar o material que seria produzido em escala.

Dessa forma, em função das características de instalação do forno hoje existente na empresa, com maior facilidade de controle e manutenção de temperaturas intermediárias, os parâmetros escolhidos para produção de CCA com baixo teor de carbono foram: temperatura 700°C, tempo de retenção 60 minutos e tempo de moagem 2h+3. Todavia, cabe salientar que para outro tipo de instalação e na indisponibilidade do excedente de energia presente na empresa, essa escolha pode ser diferente.

5.5 Caracterização do material selecionado

A cinza selecionada (700/60/2h+3) foi produzida em escala e suas características físicas e químicas foram então reavaliadas. A repetição destes ensaios serviu para que o sistema de produção fosse avaliado, conferindo sua repetibilidade quanto às propriedades e qualidade do material produzido. A Tabela 5.15 apresenta estes resultados, obtidos conforme procedimentos descritos anteriormente.

A cristalinidade do material foi avaliada por meio de ensaio de difração de raios-X, realizado nas mesmas condições descritas em 4.1.

Tabela 5.15 – Caracterização da cinza selecionada e produzida em escala

Teor de Óxidos (%)		
CO ₂	1,18	
Na ₂ O	0,05	
MgO	0,57	
Al ₂ O ₃	0,16	
SiO ₂	93,22	
P ₂ O ₅	0,75	
SO ₃	0,10	
K ₂ O	1,50	
CaO	1,21	
Cr ₂ O ₃	0,05	
MnO	0,17	
Fe ₂ O ₃	1,01	
NiO	0,02	
ZnO	*	
Rb ₂ O	0,01	
SrO	0,01	
BaO	*	
Massa Específica (g/cm ³) (NBR NM 23/2001)	2,26	
Peneira # 0,075 mm (%)	8,00	
Peneira # 0,045 mm (%)	10,4	
Diâmetro médio (µm)	< φ ₁₀	1,30
	< φ ₅₀	5,78
	< φ ₉₀	15,23
Perda ao fogo média (NBR NM 18/2003) (%)	0,728	

* valor não detectado

A análise química da CCA selecionada apresenta pequenas variações no teor dos elementos em relação à análise da CCA bruta, apresentada no item 4.3. As variações são consideradas normais e não trazem nenhum prejuízo à qualidade do material como pozolana e podem ser creditadas a variações da matéria-prima. Muito embora a CCA bruta seja proveniente de um único fornecedor, este recebe arroz de origens diversas, o que pode levar a diferenças na composição química da casca, justificando, assim, as variações encontradas. Além disso, houve um aumento no teor de sílica após a queima da CCA, provocado pela redução de perda ao fogo, em função da queima do carbono residual.

O teor de carbono residual da amostra produzida em escala ficou da mesma ordem de grandeza da CCA 700/60/2h+3 produzida inicialmente, atendendo à especificação de material com baixo teor de carbono.

Em relação ao tamanho das partículas, após o processo de moagem a CCA selecionada apresentou diâmetros médios, 90% das partículas ($\phi 90$) com dimensão inferior a 15,23 μm , e 50% das partículas ($\phi 50$) inferior a 5,78 μm , ou seja, da mesma ordem de grandeza daqueles observados na produção inicial das cinzas, quando foram produzidas as argamassas. Já para $\phi 10$ o diâmetro médio das partículas foi menor, indicando que o processo de moagem da cinza, em escala, foi mais eficiente do que quando da moagem de pequenas quantidades.

A Tabela 5.16 traz os dados obtidos na difração de raios-X (picos principais) do material produzido inicialmente, com o qual foram produzidas as argamassas e do material selecionado, produzido em maior escala. A Figura 5.9 traz os dois difratogramas.

Tabela 5.16 – Caracterização da cinza selecionada e produzida em escala

Amostra	Espaçamento – d (Å)	Intensidade relativa (%)	Ângulo (2θ)	Altura do pico (contagem)
CCA 700/60 produção inicial	4,04	100,00	21,98	1271
	3,13	11,41	28,53	145
	2,83	12,74	31,53	162
	2,48	17,86	36,23	227
CCA 700/60 produção final	4,04	100,00	21,98	1383
	3,12	11,57	28,43	160
	2,84	12,44	31,48	172
	2,49	16,20	36,08	224

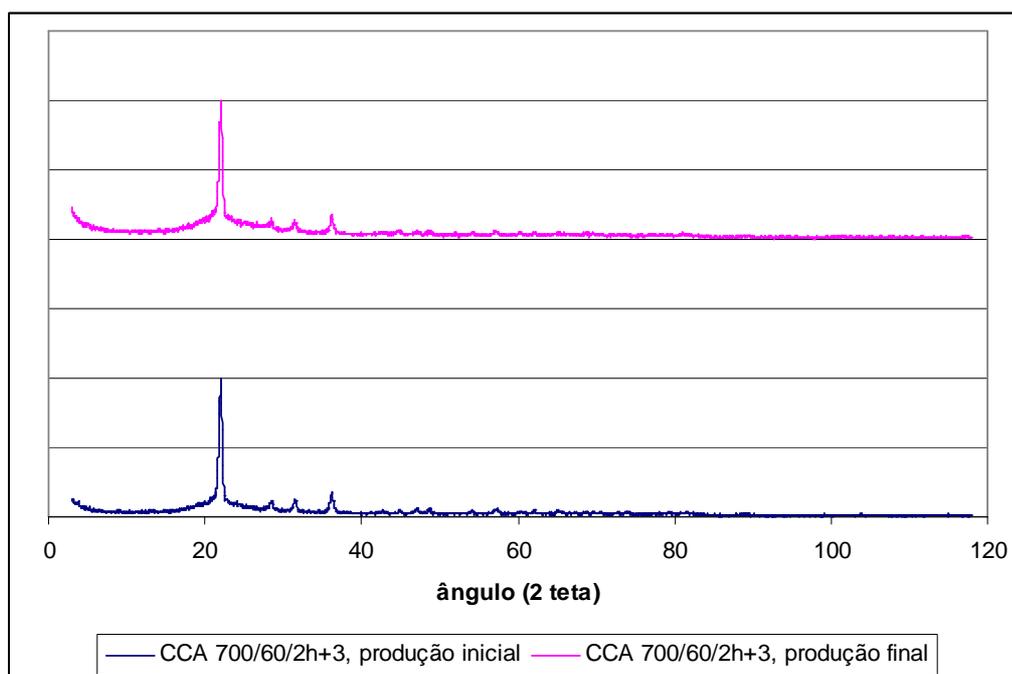


Figura 5.9– Difratoograma de raios-X da CCA selecionada

Na difração de raios-X, praticamente não se percebem alterações nas leituras de ângulo e intensidade relativa para a CCA produzida em escala em relação à CCA 700/60/2h+3, produzida inicialmente, com a qual foram confeccionadas as argamassas, havendo, novamente, a presença de cristobalita na produção final. Isso é um bom indicativo do ajuste do sistema de requeima para a retirada do carbono, a essa temperatura, que foi capaz de, mesmo em maior escala, manter as características do material produzido.

5.6 Avaliação colorimétrica

Os resultados das leituras colorimétricas da CCA bruta e CCA selecionada, do cimento CPHZ 32 e CP IV, bem como da mistura de CCA selecionada e cimento CP II Z -32, utilizada neste trabalho, são apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Parâmetros colorimétricos médios das CCA's e cimentos

Parâmetro Colorimétrico	CCA bruta	Cimento CPHZ 32	Cimento CP IV 32	CCA selecionada	Cimento CP II Z + CCA selecionada
L*	25,33	63,45	63,32	55,47	61,94
a*	0,07	-0,05	0,13	1,10	0,15
b*	0,36	8,26	0,15	1,92	6,90

Embora, estatisticamente (ANEXO 7), apenas os cimentos CP II Z 32 e o CP IV 32 não apresentem diferença significativa entre os valores de luminância (L^*), observa-se na Figura 5.10 que a diferença de cor entre a CCA selecionada e os cimentos avaliados é pequena em termos visuais. Com relação à mistura proposta de CCA + CPII Z 32, a diferença visual da cor é praticamente imperceptível em relação ao cimento CPIV 32. O valor de luminância (L^*) para a CCA selecionada foi 2,2 vezes maior que para a CCA bruta, indicando que houve clareamento significativo com o processo de requieima. Já em relação aos cimentos, a CCA selecionada apresenta-se mais escura, porém em um tom de cinza que não alterou a cor dos concretos com ela produzidos.

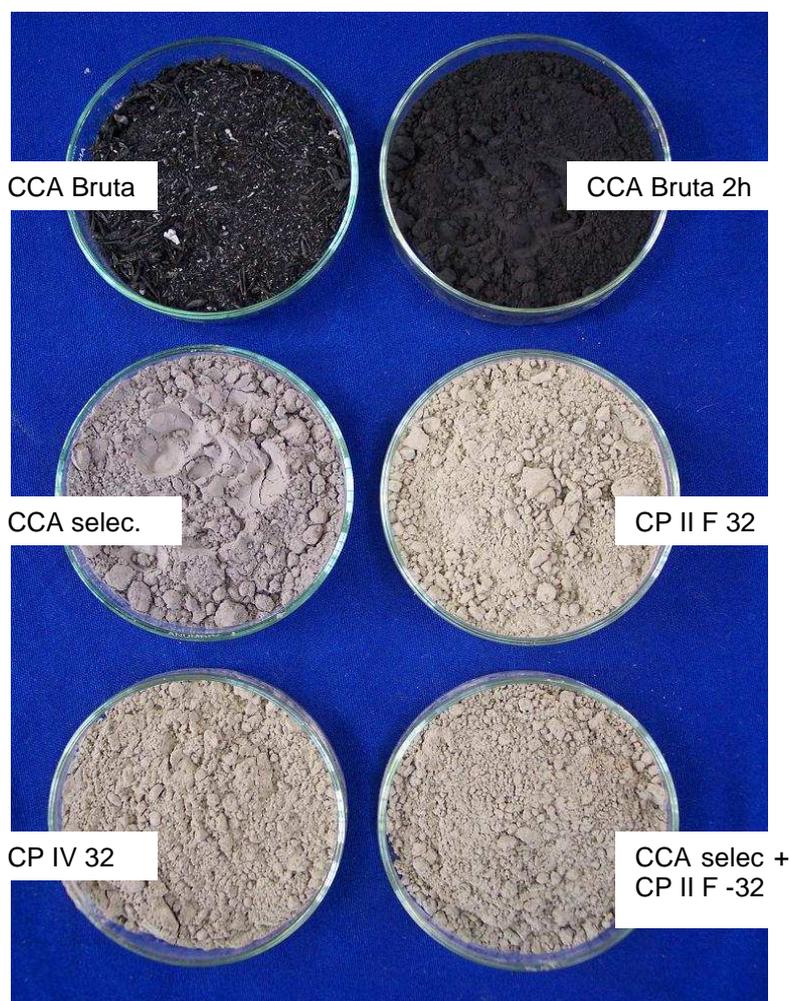


Figura 5.10 – Cor da CCA selecionada em relação às amostras de referência

5.7 Índice de atividade pozolânica com cimento

A Tabela 5.18 traz a avaliação do material quanto à sua reatividade com cimento (NBR 5752/1992) e sua classificação como pozolana (NBR 12653/1992), bem como os resultados obtidos com a CCA bruta. A Figura 5.11 evidencia os resultados obtidos.

Tabela 5.18 – Reatividade com cimento e classificação da CCA como pozolana

Argamassa	NBR 5752/1992			Ensaio adaptado		
	Controle	CCA bruta (2h de moagem)	CCA Selecionada	Controle	CCA bruta (2h de moagem)	CCA Selecionada
Cimento (g)	312,00	202,80	202,80	707,60	601,46	601,46
Areia média (g)	936,00	936,00	936,00	175,60	175,60	175,40
Areia fina (g)				701,60	701,60	701,60
CCA (g)		80,73	81,53		78,47	79,25
Água (g)	158,08		166,38	212,28		209,50
Aditivo (g)				2,01	3,00	3,00
Flow Table médio (mm)	228,3		225,1	235,9	248,7	243,4
CP1(MPa)	28,10	30,75	29,37	68,82	75,47	72,02
CP2 (MPa)	29,87	31,05	30,73	69,60	73,94	72,80
CP3 (MPa)	29,35	30,93	30,76	66,94	72,25	*
Resistência Média (MPa)	29,11	30,91	30,29	68,45	73,88	72,041
IAP (%)		106,18	104,05		107,94	105,78
Água requerida (%)			105,25			98,70

* CP perdido durante o ensaio

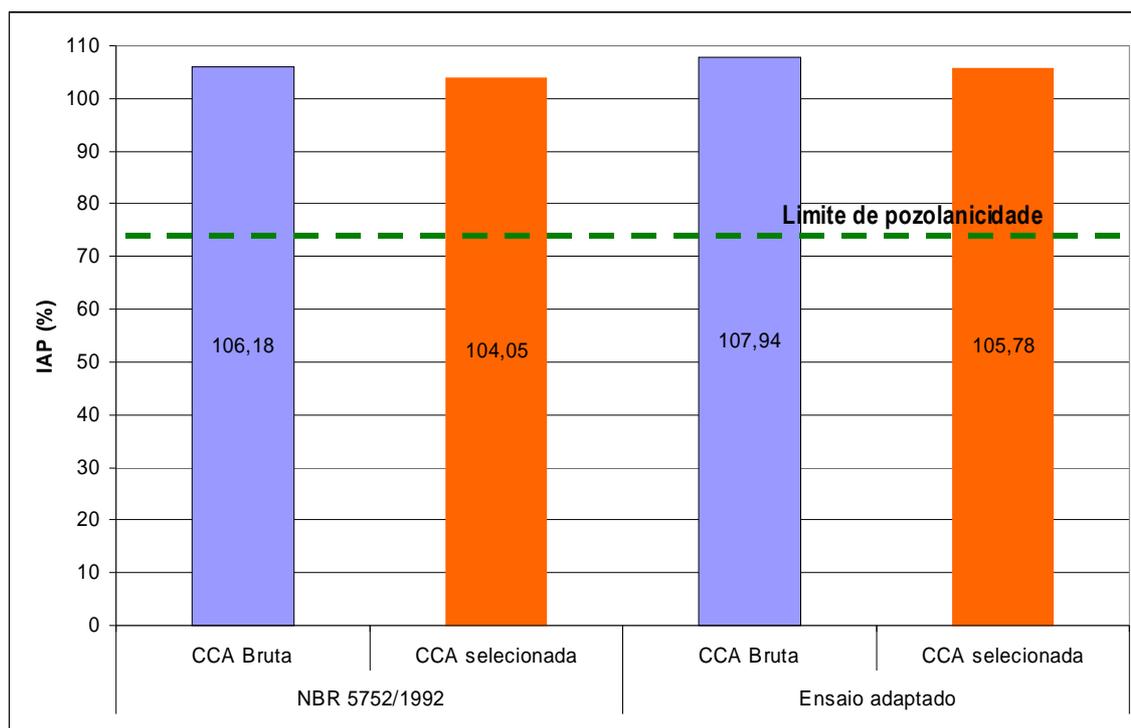


Figura 5.11 – Pozolanicidade com cimento: NBR 5752/1992 e ensaio adaptado

O material selecionado mostra um índice de atividade pozolânica (IAP) de 104,05% ou seja, 4,05% superior à argamassa de referência, feita apenas com cimento Portland. Mesmo na presença de material cristalino, o elevado teor de sílica, 93,22%, somado ao pequeno diâmetro médio das partículas, contribui para o desempenho da material. De acordo com a NBR 12653/1992, o material será considerado como pozolana (classe E), uma vez que apresenta IAP superior a 75% e água requerida inferior a 110%.

Em relação ao IAP adaptado, o valor obtido para a CCA com baixo teor de carbono foi 1,73% superior àquele preconizado pela NBR 5752/1992, o que indica que sob as reais condições de uso o desempenho do material como adição pode ser potencializado. Para a CCA bruta, o aumento observado para o IAP adaptado foi de 1%.

Contudo, os valores de índice de atividade pozolânica obtidos com a CCA bruta, 2h de moagem, são ligeiramente superiores àqueles da cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono: 106,18%, de acordo com a NBR 5752/1992 e 107,94% pelo método adaptado. Essa diferença de comportamento pode ser atribuída ao efeito filer do carbono presente na CCA bruta, também observado por Pouey (2006).

5.8 Expansibilidade a quente

A Tabela 5.19 traz os resultados de expansibilidade à quente, obtidos no ensaio com a CCA selecionada.

Tabela 5.19 – Expansibilidade à quente da CCA selecionada

	Amostra	L ₀	L _{3horas}	L _{5horas}	L _{7horas}	Expansão (mm)	L _{24horas*}
CP II F 32	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0
	2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0
	3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,5
CP IV 32	4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0
	5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
	6	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0
CP II F 32 + CCA selecionada	7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
	8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
	9	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5

* resfriamento lento, por 24 horas, com material imerso na água do ensaio

Observa-se que nenhum dos materiais avaliados apresentou expansão à quente superior ao limite da NBR 5736/1991 e NBR 11578/1991, que é de 5mm. As amostras que permaneceram imersas na água do ensaio por 24horas, para resfriamento lento do material, após a última leitura (L_{7horas}), apresentaram alteração nas leituras de expansão (L_{24horas}), porém, em nenhuma delas, o valor medido superou os limites das normas acima citadas, ao contrário do que foi relatado por Pouey (2006).

5.9 Fluidificação da pasta frente ao uso de aditivo redutor de água - superplastificante

A Tabela 5.20 traz os resultados de área de espalhamento obtidos no ensaio de cone de Kantro para as pastas de referência (sem pozolana), com sílica ativa, com CCA bruta 2h de moagem e com CCA de baixo teor de carbono selecionada. As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 ilustram o comportamento das pastas frente ao uso do aditivo selecionado, superplastificante de base policarboxilato, para os três teores avaliados.

Tabela 5.20 – Área de espalhamento das pastas com aditivo superplastificante

Intervalo de leitura, em relação ao final da mistura (minutos)		0	5	15	30	45	60	90	120
Pasta	Teor de aditivo (litros/100 kg de cimento)_	Área de espalhamento (cm ²)							
Referência	0,261	321,27	375,83	367,28	343,89	323,65	316,52	290,51	290,28
	0,500	415,70	459,96	448,63	449,57	430,05	414,57	407,39	380,13
	1,000	431,89	464,72	483,05	470,47	449,57	434,66	420,00	386,20
CCA bruta	0,390	373,25	379,27	360,52	348,01	338,16	323,65	289,53	273,91
	0,500	434,66	430,97	433,74	415,48	396,72	384,46	368,98	344,71
	1,000	481,11	492,84	481,11	474,33	465,68	445,82	425,47	416,38
CCA	0,390	199,81	260,16	277,59	279,07	268,80	259,44	222,99	176,13
	0,500	300,95	311,03	286,52	273,18	274,65	250,95	219,04	194,21
	1,000	409,18	437,44	398,49	407,39	393,20	393,20	372,40	355,49
S A	0,261	115,94	106,60	85,36	62,56	32,17	19,83	15,21	15,21
	0,500	254,47	244,67	237,10	225,65	206,12	186,27	157,25	139,98
	1,000	272,45	261,59	260,87	250,95	236,42	224,32	199,81	195,45

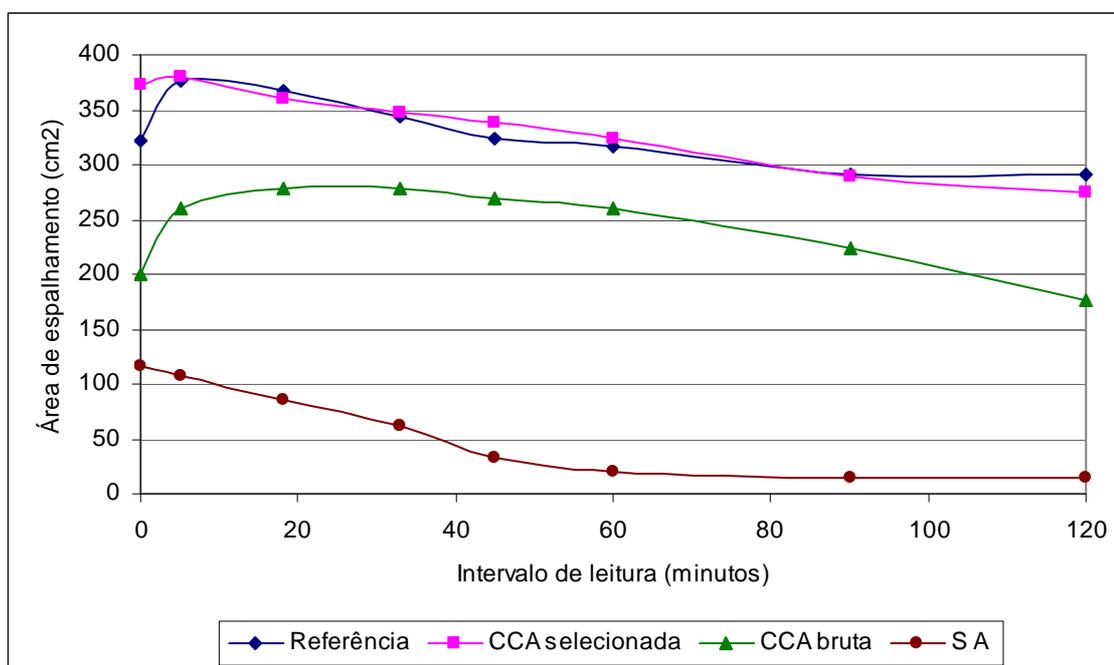


Figura 5.12– Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teores utilizados para a produção das argamassas

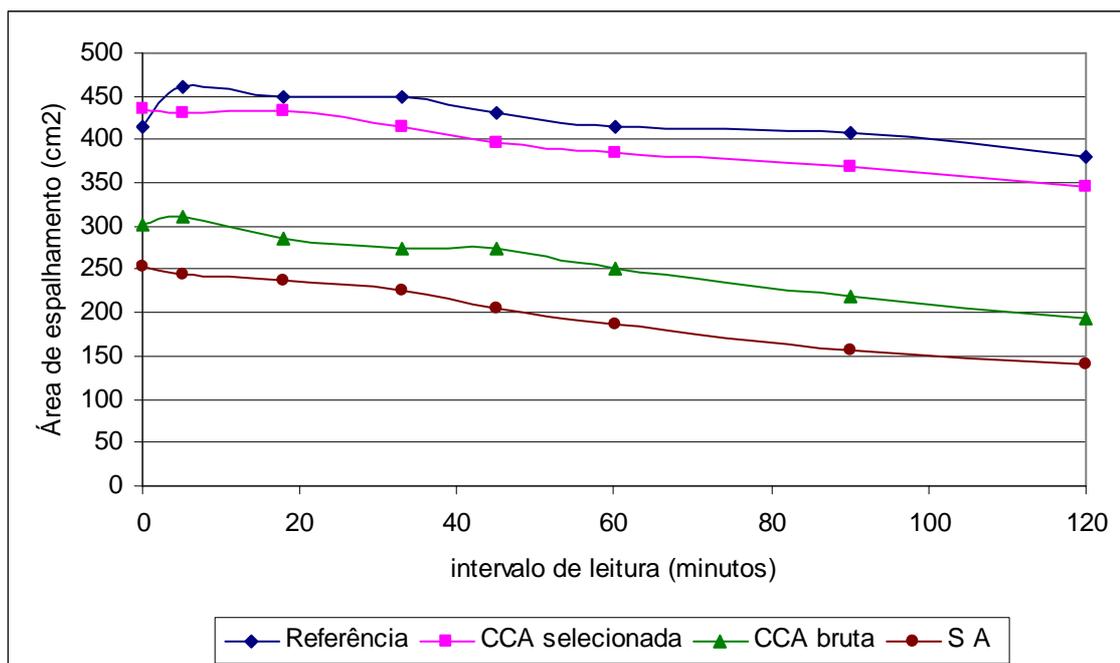


Figura 5.13– Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teor mínimo indicado pelo fabricante.

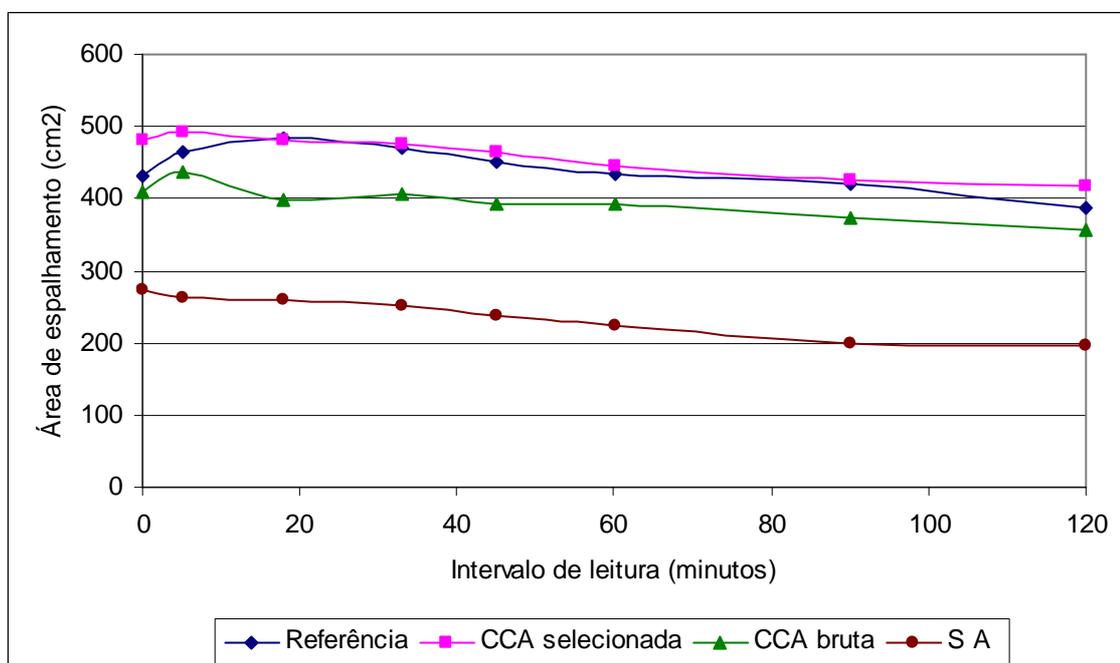


Figura 5.14– Comportamento das pastas frente ao uso de aditivo superplastificante: teor máximo indicado pelo fabricante.

O comportamento geral das pastas aponta que a melhor fluidificação, em ordem decrescente, se deu para as misturas de referência e CCA com baixo teor de carbono selecionada, seguidas pela mistura com CCA bruta e sílica ativa.

A maior diferença de comportamento observada entre as pastas com CCA e SA quando do uso do teor exigido na produção das argamassas (Figura 5.12) deve-se ao fato do teor de aditivo da pasta com SA ser menor que o teor exigido pelas pastas com CCA.

Avaliando o desempenho das CCA's em relação à sílica ativa para o mesmo consumo de aditivo (Figuras 5.13 e 5.14) percebe-se que as pastas com CCA apresentaram áreas de espalhamento superiores às encontradas nas misturas com sílica ativa, o que pode ser explicado pela diferença de tamanho de seus grãos. Como o diâmetro médio das partículas de CCA é maior do que o diâmetro médio das partículas de SA, esta última exige mais aditivo para alcançar uma mesma área de espalhamento quando comparada à primeira. Isso reforça a idéia de Santos (1997) e Dafico (2001) de que há um tamanho de grão ótimo para cada CCA que não precisa necessariamente ser muito reduzido para que um bom desempenho seja alcançado.

Em relação à CCA bruta, a CCA com baixo teor de carbono alcançou maiores áreas de espalhamento. Esta diferença de comportamento é mais evidenciada para o limite mínimo especificado pelo fabricante.

Além disso, em igualdade de condições, ou seja, teores mínimo e máximo de aditivo, após os 120 minutos de ensaio, a redução média da área de espalhamento das pastas com CCA de baixo teor de carbono foi 13 e 21%, respectivamente. Para a sílica ativa foi de 45% para o teor mínimo de aditivo e de 28% para o teor máximo.

Os resultados indicam que a perda de eficiência do aditivo em pastas com a CCA de baixo teor de carbono é menor se comparado ao da sílica ativa, o que sugere o mesmo comportamento para concretos.

5.10 Resistência mecânica dos concretos

Os concretos produzidos e descritos no item 4.9 apresentaram os resultados médios de resistência à compressão axial descritos na Tabela 5.21. As planilhas com os valores individuais, médias, desvios padrão e coeficientes de variação são apresentados no

ANEXO 8. Pelos valores obtidos percebe-se pequena dispersão nos resultados encontrados.

Tabela 5.21 – Resistência média à compressão axial dos concretos

Idade de ensaio (dias)		1	3	7	28	91	182
Concreto	Relação a/c	Resistência Média (MPa)					
Referência	0,3	34,8	42,3	50,9	65,1	66,1	69,9
Referência	0,4	18,6	27,0	33,6	42,8	46,0	46,5
CCA	0,3	36,6	46,5	56,0	70,8	72,6	75,4
CCA	0,4	21,1	27,8	32,7	45,6	47,6	49,1
S A	0,3	38,2	51,3	57,9	72,7	72,8	78,0
S A	0,4	20,8	32,1	37,3	50,6	50,8	53,3

A Figura 5.15 ilustra o desenvolvimento de resistência à compressão axial dos concretos ao longo do tempo e evidencia a diferença do comportamento da CCA com baixo teor de carbono com a variação da relação a/c. Além disso, observa-se que o incremento de resistência dos 90 para os 180 dias de ensaio é pequeno, para todas as misturas avaliadas.

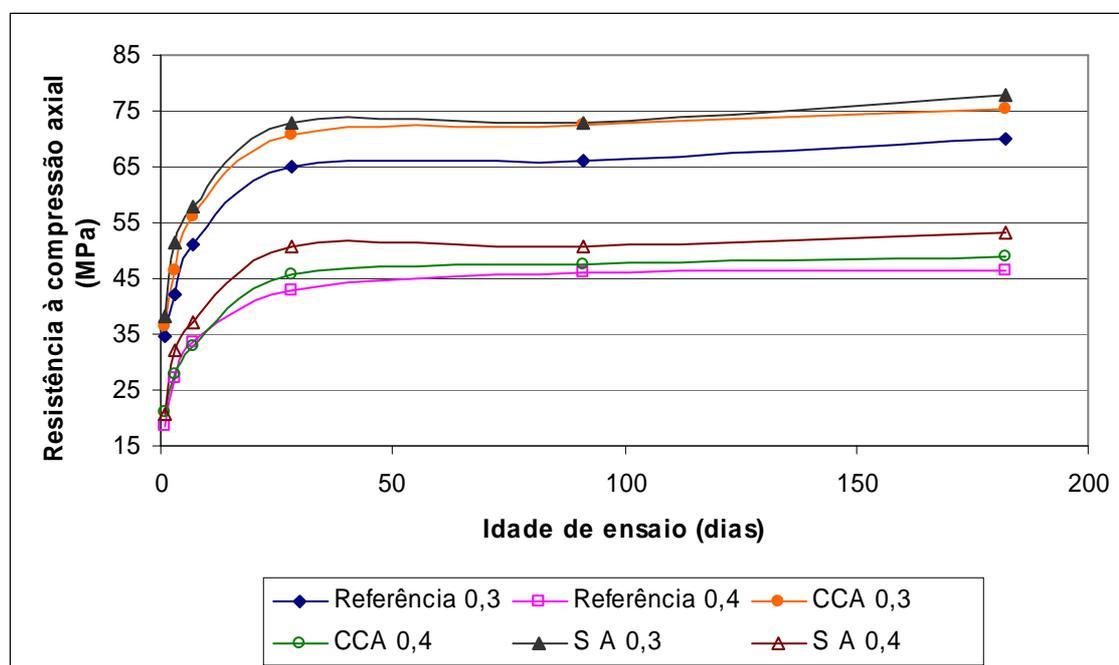


Figura 5.15 – Desenvolvimento de resistência à compressão axial dos concretos ao longo do tempo

Destaca-se que os concretos com cinza de casca de arroz demandaram menos aditivo do que os concretos com sílica ativa, conforme já foi apresentado na Tabela 4.16, confirmando o resultado obtido em pasta, no ensaio de Cone de Kantro.

Trabalho realizado por Zang e Malhotra (1996), no entanto, aponta para um maior consumo de aditivos redutores de água em concretos contendo cinza de casca de arroz, quando comparados àqueles feitos com sílica ativa. Todavia, a CCA utilizada pelos referidos autores, apresenta teor de perda ao fogo 11,7 vezes maior que o teor da CCA com baixo teor de carbono aqui utilizada. O alto teor de carbono presente na CCA utilizada pelos referidos autores pode ter contribuído para o pior desempenho da CCA frente ao uso de aditivos redutores de água (superplastificantes).

Observa-se diferença de comportamento do concreto contendo CCA com baixo teor de carbono para as duas relações a/c avaliadas. Para a relação a/c 0,3, com 1 dia de idade, o concreto de referência apresenta valores de resistência à compressão axial ligeiramente inferiores aos concretos com CCA e este, valores inferiores àqueles com sílica ativa. Esse comportamento se mantém para a idade de ensaio de três dias. A alta reatividade da sílica ativa às idades iniciais pode ser atribuída ao reduzido tamanho médio de suas partículas, da ordem de 0,67 μm ou ainda à sua ação física, reduzindo o tamanho dos poros e densificando a matriz de cimento.

A partir da idade de ensaio de 7 dias, nota-se que os concretos com cinza de casca de arroz apresentam resultados de resistência à compressão axial mais próximos daqueles obtidos com a sílica ativa. Para as idades de 90 dias não há diferença significativa entre os valores de resistência à compressão axial apresentados pelos concretos contendo sílica ativa e cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono, com valores médios da ordem de 72MPa. Aos 180 dias, os valores obtidos com SA são ligeiramente superiores aos valores alcançados com a CCA com baixo teor de carbono, indicando que os materiais apresentam comportamentos semelhantes para os teores de substituição empregados, conforme já indicado por Santos (1997).

Trabalho realizado por Santos (1997) indicava que a cinza de casca de arroz, em idades superiores aos 90 dias, superaria a resistência à compressão axial apresentada pela sílica ativa. Todavia, além da presença de alto teor de carbono, que poderia contribuir com a resistência final das misturas pelo efeito filer, a difração de raios-X da CCA residual, utilizada pela referida autora, não apresentava picos cristalinos tão bem formados,

indicando ser um material mais amorfo do que a CCA com baixo teor de carbono ora utilizada.

Para a relação a/c 0,4, apenas à idade de 1 dia, o concreto com CCA de baixo teor de carbono apresenta valores médios de resistência à compressão axial ligeiramente superiores àqueles encontrados no concreto com sílica ativa. Para todas as demais idades de ensaio nota-se que o concreto contendo cinza de casca de arroz e o concreto de referência apresentam a mesma ordem de grandeza nos resultados de resistência à compressão axial, sendo ambos inferiores àqueles obtidos na mistura com sílica ativa.

Contudo, de forma geral, nenhuma das misturas apresentou valores elevados de resistência, mesmo com relação água/materiais cimentantes baixa, da ordem de 0,3. Isso pode ser atribuído à qualidade da areia média utilizada. Trabalho recente desenvolvido por WEIDMANN (2006), buscando verificar a influência da forma do agregado miúdo nas propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa, mostrou que a areia utilizada neste trabalho possui um alto teor de mica, o que a faz demandar grande quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade. Isso, de alguma forma, pode ter prejudicado os resultados de resistência à compressão axial aqui apresentados.

5.11 Avaliação dos concretos submetidos ao ataque por sulfatos

A Tabela 5.22 apresenta os resultados de carga média de ruptura dos concretos (fatias cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 6mm de espessura média) submetidos ao ataque por sulfato, no ensaio dos quatro pontos. A Figura 5.16 mostra o padrão de ruptura das fatias, induzido pelo ensaio dos quatro pontos e a Figura 5.17 ilustra o comportamento dos concretos imersos na solução de hidróxido de cálcio (referência). A planilha completa com os dados deste ensaio é apresentada no ANEXO 9.

Tabela 5.22 – Carga de ruptura dos concretos – ensaio dos quatro pontos

Idade de ensaio (dias)	Solução	Carga de Ruptura (N)					
		Ref 0,3	Ref 0,4	CCA 0,3	CCA 0,4	SA 0,3	SA 0,4
0	Ca(OH) ₂	450,36	358,86	426,88	382,32	534,77	428,44
	Na ₂ SO ₄	450,36	358,86	426,88	382,32	534,77	428,44
15	Ca(OH) ₂	445,65	330,72	431,57	394,04	516,01	375,28
	Na ₂ SO ₄	544,16	370,59	527,74	433,92	480,80	382,30
	Variação % da carga	22,10	12,06	22,28	10,12	-6,82	1,87
30	Ca(OH) ₂	438,61	354,17	422,19	384,66	518,36	391,70
	Na ₂ SO ₄	516,01	300,20	506,63	452,68	440,95	375,28
	Variação % da carga	17,65	-15,24	20,00	17,68	-14,93	-4,19
60	Ca(OH) ₂	440,95	356,52	436,26	387,01	513,66	379,97
	Na ₂ SO ₄	410,46	133,69	415,15	328,37	412,81	315,86
	Variação % da carga	-6,91	-62,50	-4,84	-15,15	-19,63	-16,87
90	Ca(OH) ₂	445,65	368,24	438,61	382,32	508,97	370,59
	Na ₂ SO ₄	178,26	117,28	398,74	300,22	394,04	300,22
	Variação % da carga	-60,00	-68,15	-9,09	-21,47	-22,58	-18,99
180	Ca(OH) ₂	436,26	356,52	431,57	387,01	501,94	377,63
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,00	131,35	70,37	129,00	68,02
	Variação % da carga	-100,00	-100,00	-69,56	-81,82	-74,30	-81,99

**Figura 5.16** – Padrão de ruptura das fatias de concreto

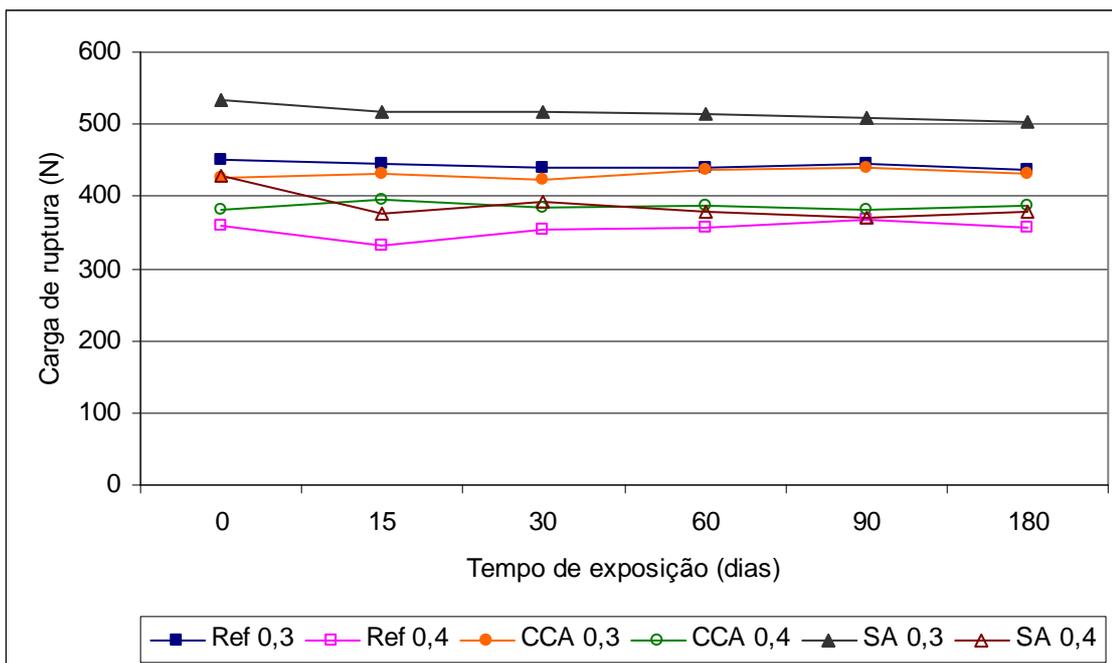


Figura 5.17 – Comportamento dos concretos curados em hidróxido de cálcio, ao longo do tempo

As amostras imersas na solução saturada de hidróxido de cálcio (referência) apresentaram carga de ruptura, ao longo do tempo, dentro de um pequeno intervalo de variação, creditado à presença/ausência de maior concentração de poros ou mesmo por micro-fissuras produzidas no momento da produção das fatias. Fica claro também que, a exemplo do que foi observado no ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos, há influência da relação água/materiais cimentantes sobre a carga de ruptura das amostras à flexão, observando-se valores maiores para menor relação a/c.

Ao contrário do que aconteceu com os valores de resistência à compressão axial, nos resultados encontrados para a relação a/c 0,3, a sílica ativa apresentou carga de ruptura superior à CCA, em todas as idades de ensaio. Já a CCA com baixo teor de carbono obteve sempre valores semelhantes aos do concreto de referência.

Para a relação a/c 0,4 as cargas de ruptura são semelhantes para as três misturas, não havendo uma diferença clara de comportamento em relação as pozolanas utilizadas. Apenas o concreto de referência apresenta valores sempre inferiores às misturas com pozolana.

A Figura 5.18 mostra o aspecto das amostras nessa solução de cura no dia do início e aos 180 dias do ensaio. Percebe-se que não há qualquer tipo de deterioração ou alteração nas amostras de referência ao longo do tempo. A Figura 5.19 ilustra o comportamento dos concretos imersos na solução agressiva de sulfato de sódio. A planilha completa com os dados deste ensaio está, também, no ANEXO 8.

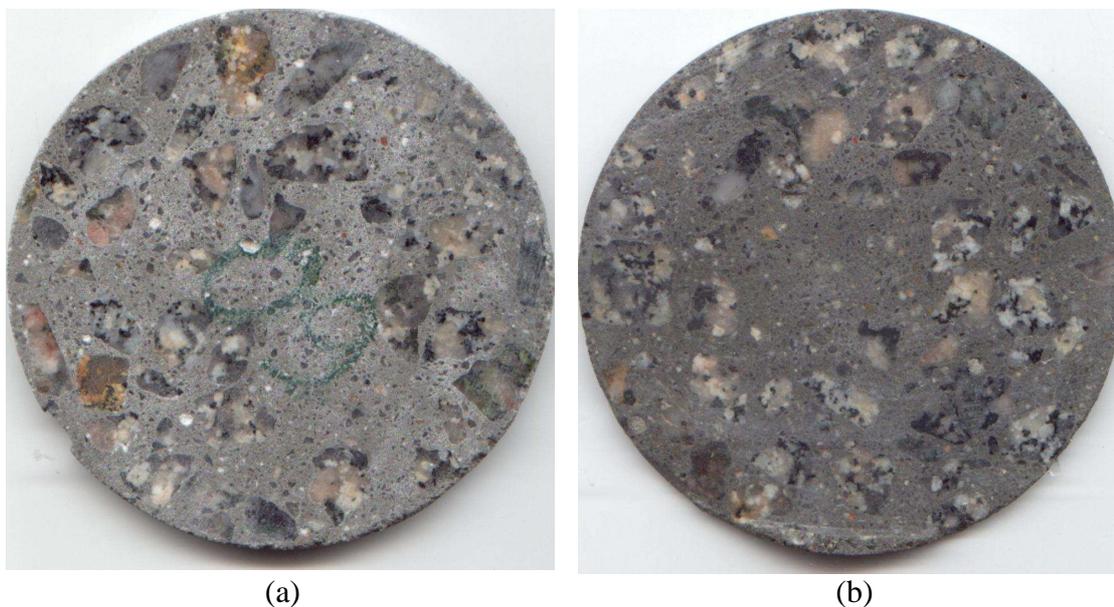


Figura 5.18 – Amostras do concreto com CCA, curadas em solução de hidróxido de cálcio: (a) início do ensaio; (b) 180 dias de ensaio

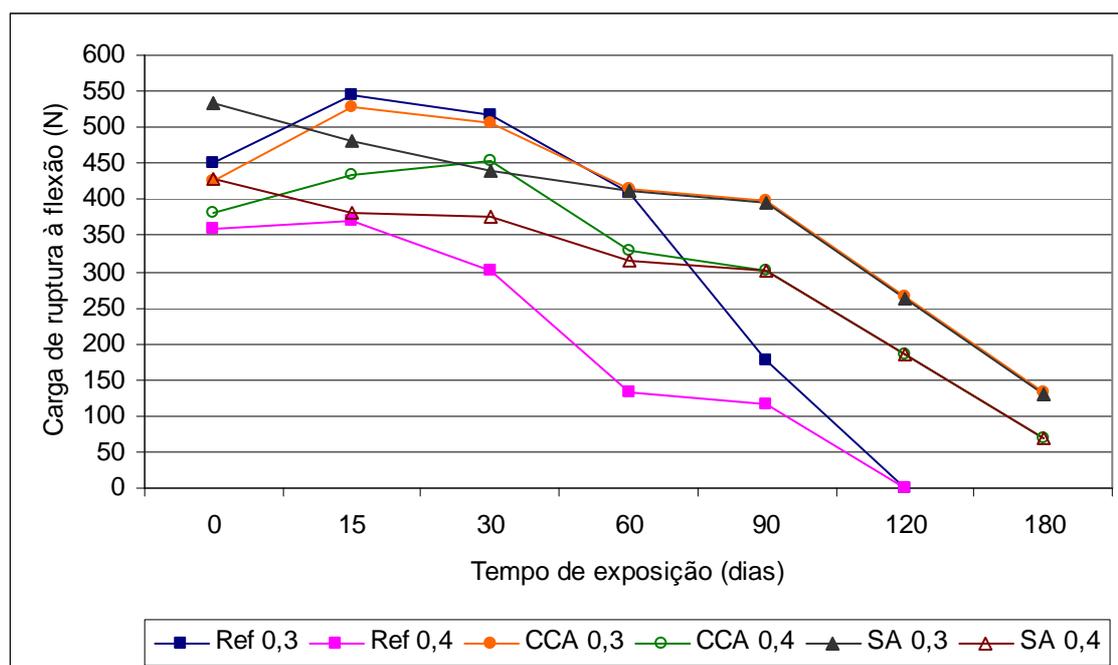


Figura 5.19 – Comportamento dos concretos curados em sulfato de sódio

Quanto às amostras submetidas ao ataque por sulfato, os resultados obtidos para os concretos de referência mostram aumento da carga de ruptura das amostras para a idade de 15 dias de ensaio, em ambas as relações água/materiais cimentantes. A partir daí, para a relação a/c 0,3, os valores de carga de ruptura diminuem, mostrando grande variação percentual das cargas médias obtidas em relação às amostras curadas em hidróxido de sódio, até que entre os 90 e os 180 dias de idade as amostras alcançaram tal estado de deterioração que não foi mais possível medir a carga de ruptura. Aos 180 dias foi possível, inclusive, quebrar as pastilhas apenas com seu manuseio. Embora com o mesmo comportamento aos 180 dias, o concreto de referência, com relação a/c 0,4, apresenta menor variação percentual nos valores de carga de ruptura entre as idades de 60 e 90 dias.

Nas misturas com SA e relação a/c 0,3 as cargas de ruptura ficaram abaixo daquelas encontradas nas misturas com CCA às idades de 15 e 30 dias de ensaio. Para as demais idades de ensaio não há diferença significativa entre os valores encontrados para ambas as pozolanas. Um comportamento idêntico foi observado para a relação a/ 0,4.

À idade de 180 dias tanto as misturas CCA quanto as misturas com SA apresentam grande variação percentual das cargas de ruptura em relação às amostras imersa em hidróxido de cálcio, indicando que, em idade superior, tendem, também, à carga nula, a exemplo dos concretos de referência imersos no sulfato.

Muito embora a idade máxima de ensaio prevista para os concretos submetidos ao ataque por sulfato tenha sido 180 dias, contados a partir dos 90 dias de cura inicial, como as amostras com CCA e SA apresentaram ainda resistência a esta idade, o ensaio foi prolongado até os 270 dias e aí, todos os concretos apresentaram resistência nula.

Mesmo imersas em solução agressiva de sulfato de sódio, as amostras com CCA, para a relação a/c 0,3, mostraram um ganho na carga de ruptura aos 15 dias de ensaio, acontecendo o mesmo com o concreto de referência, passando, ambos, a apresentar queda nos valores a partir dos 30 dias de ensaio. Comportamento semelhante foi observado para a relação a/c 0,4, porém neste caso, o concreto contendo cinza de casca de arroz só passa a apresentar redução nos valores de carga de ruptura a partir dos 60 dias de ensaio, enquanto que o concreto de referência já apresenta redução à idade de 30 dias. O ganho de carga de ruptura nas idades iniciais não foi observado para as misturas com sílica ativa.

Essa diferença de comportamento dos concretos nas idades iniciais pode estar novamente ligada à presença ou não de pozolana (caso dos concretos de referência) e ao diâmetro médio de suas partículas.

Em uma mistura onde o material cimentante é apenas cimento Portland, o teor de hidróxido de cálcio e alumina presentes são maiores do que em misturas que contenham pozolana. A substituição de cimento por pozolana implica na redução do teor de C_3A presente, reduzindo a disponibilidade de alumina na mistura. Assim, a formação de etringita pode ser reduzida (MEHTA E MALHOTRA, 1996).

Além disso, quando materiais pozolânicos são acrescentados à mistura de cimento Portland, eles reagem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando C-S-H secundário. A formação do C-S-H secundário resulta na densificação da matriz, já que ele se deposita nos poros existentes na mistura, tornando-a menos permeável e dificultando o acesso do íon sulfato através da matriz (METHA e MONTEIRO, 1994).

Outro fato a ser destacado é que misturas que contenham apenas cimento Portland apresentam tamanho e distribuição de poros diferente de misturas que contenham pozolanas. Na mistura contendo cimento Portland, o número e o diâmetro dos vazios são maiores (MEHTA e MONTEIRO, 1994; WADA *et al*, 1998). Assim, quando do ataque por sulfato, o que acontece em um primeiro momento é a densificação da matriz pelo depósito do material produzido pela reação (neste caso, gipsita e etringita) nos poros. Em um segundo momento, estando já os poros preenchidos, a pressão gerada pela formação dos produtos de reação com sulfato faz com que a matriz inicie um processo de fissuração e conseqüente redução de resistência. Isso explica o aumento da carga de ruptura para as misturas de referência, em ambas as relações a/c avaliadas, nas primeiras idades do ensaio.

Por sua vez, o comportamento diverso entre as misturas com pozolana pode ser creditada à diferença de diâmetro médio dos grãos entre elas. Embora seja mais fina do que o cimento e promova, tanto a redução do hidróxido de cálcio disponível na mistura como o refinamento dos poros, os grãos da cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono ainda são maiores que os grãos de sílica ativa. Isso, teoricamente, faz com os poros das misturas com CCA sejam menores que os poros das misturas de referência, porém ainda maiores que aqueles presentes nas misturas com sílica ativa.

Consequentemente originam-se espaços onde os produtos resultantes do ataque por sulfato podem se depositar, densificando a matriz e aumentando a resistência.

Pelo tamanho de grão que apresenta (especialmente ϕ_{10}), a densidade da matriz com sílica ativa já é bastante grande, o que a princípio dificulta o acesso do íon sulfato. Quando esse, após certo período, consegue penetrar na matriz, não há espaço para que o produto da reação se deposite. Surgem então grandes pressões internas, da ordem de 240MPa, (COHEN, 1988 *apud* AL-DULAIJAN *et al*, 2003), responsáveis pela deterioração do material. Isso explica porque até os 90 dias de imersão em solução agressiva de sulfato de sódio, as misturas com sílica ativa mostraram pequena redução de carga de ruptura em relação à idade inicial de ensaio. A partir daí, porém, apresentam uma redução significativa.

As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 mostram a evolução da deterioração dos concretos em função do ataque por sulfato.

O exame visual periódico das amostras, feito durante os 180 dias de ensaio em solução agressiva de sulfato de sódio, revelou uma deterioração considerável, na forma de fissuras e borda de reação ao redor dos agregados. A borda de reação observada em torno das partículas de agregado, especialmente nas amostras de referência (sem pozolanas) deve-se à precipitação dos cristais de etringita. Degradações em forma de lascamento das bordas das amostras foram também detectadas. As maiores degradações foram observadas no concreto de referência.



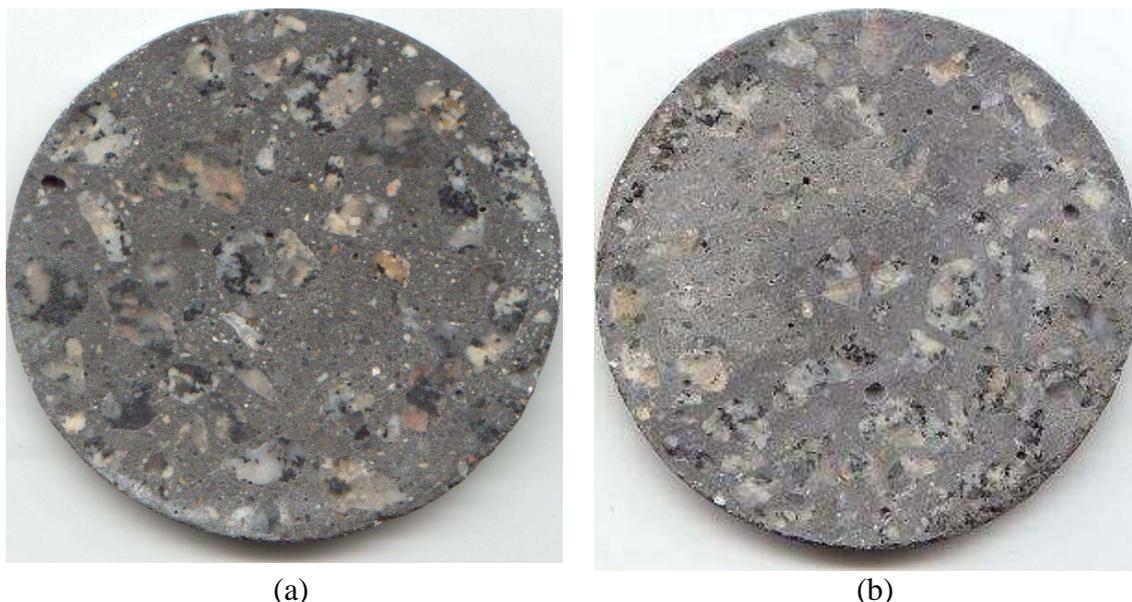
(a)



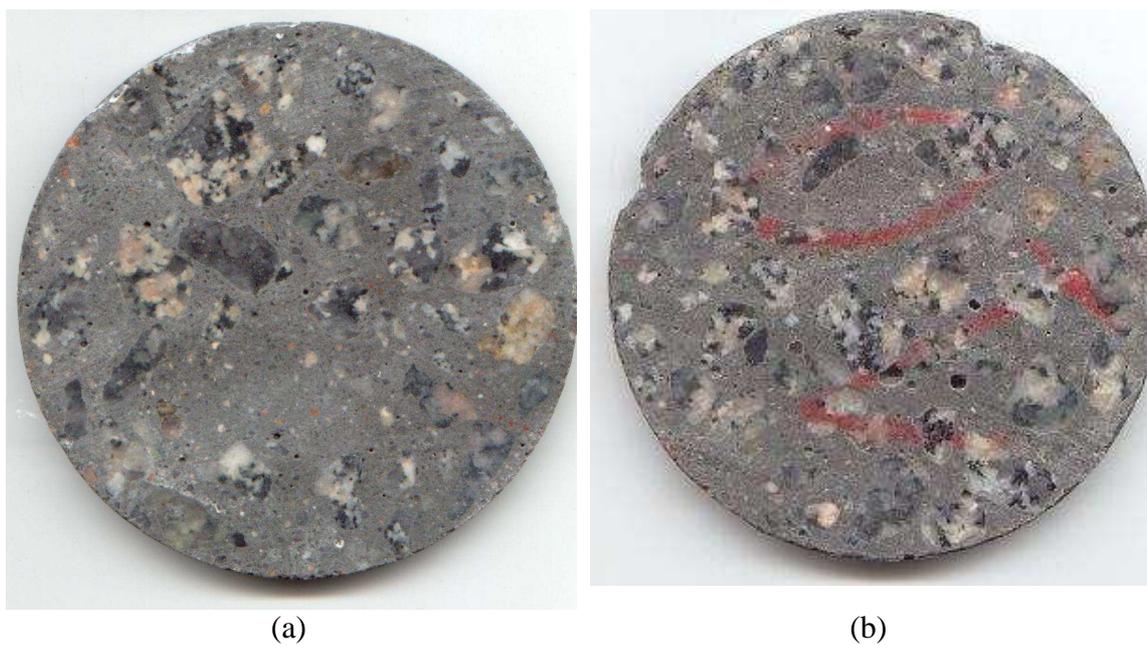
(b)



Figura 5.20 – Amostras do concreto de referência, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a) 15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio: detalhe da degradação observada



(a) (b)
Figura 5.21 – Amostras do concreto com CCA, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a) 15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio



(a) (b)
Figura 5.22 – Amostras do concreto com SA, a/c 0,3, submetidas ao ataque por sulfato: (a) 15 dias de ensaio; (b) 180 dias de ensaio

A Tabela 5.23 traz os valores variação de expansão dos concretos, causada pela ação do sulfato de sódio durante o período de ensaio e a Figura 5.13 ilustra o comportamento observado para as amostras imersas na solução de hidróxido de cálcio.

Tabela 5.23 – Expansões observadas ao longo do tempo

Concreto	Solução	Variação da expansão (%)					
		Idade de ensaio (dias)					
		0	15	30	60	90	180
Ref 0,3	Ca(OH) ₂	0,00	0,08	0,09	0,09	0,10	*
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,65	0,94	1,39	2,03	
Ref 0,4	Ca(OH) ₂	0,00	0,06	0,08	0,10	0,09	
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,72	1,19	2,01	2,34	
CCA 0,3	Ca(OH) ₂	0,00	0,06	0,06	0,07	0,06	
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,11	0,33	0,82	1,37	
CCA 0,4	Ca(OH) ₂	0,00	0,09	0,10	0,12	0,13	
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,10	0,60	1,01	1,88	
SA 0,3	Ca(OH) ₂	0,00	0,07	0,06	0,07	0,06	
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,14	0,24	0,60	1,11	
SA 0,4	Ca(OH) ₂	0,00	0,12	0,13	0,11	0,12	
	Na ₂ SO ₄	0,00	0,40	0,80	1,39	1,74	

*valor não determinado

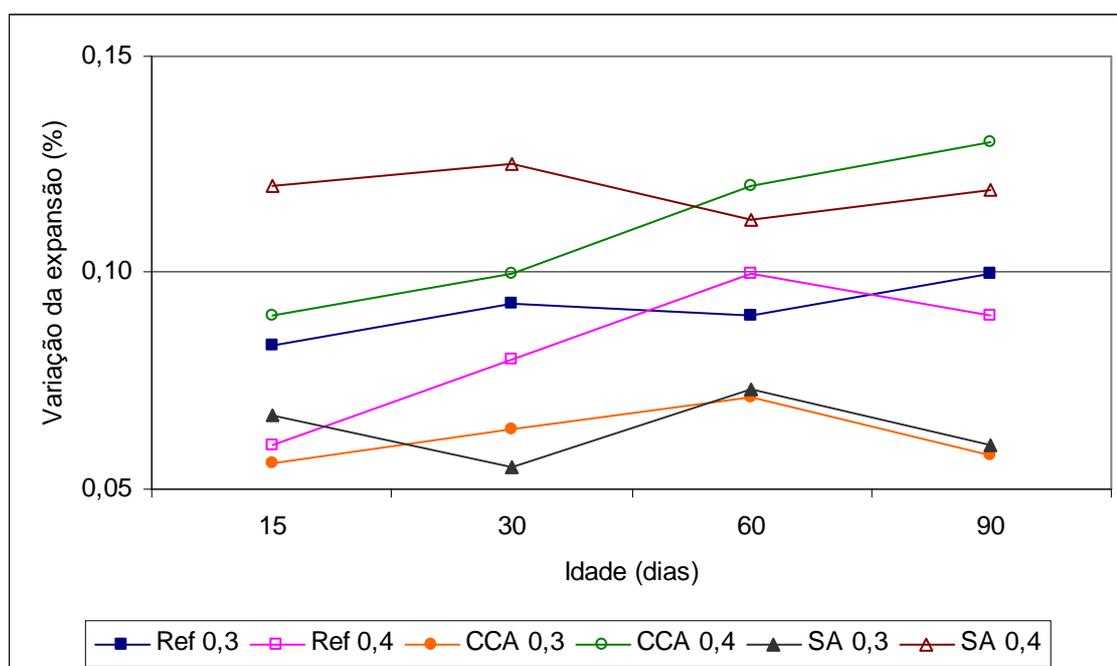


Figura 5.23 – Expansão dos concretos curados na solução de hidróxido de cálcio

A exemplo do que foi observado para o comportamento dos concretos no ensaio à flexão, não foram observadas variações significativas nos valores de expansão para nenhum das misturas curadas na solução de hidróxido de cálcio.

A Figura 5.24 mostra a expansão observada para as amostras submetidas ao ataque por sulfatos¹⁴. Os dados completos das medidas de expansão estão no ANEXO 10.

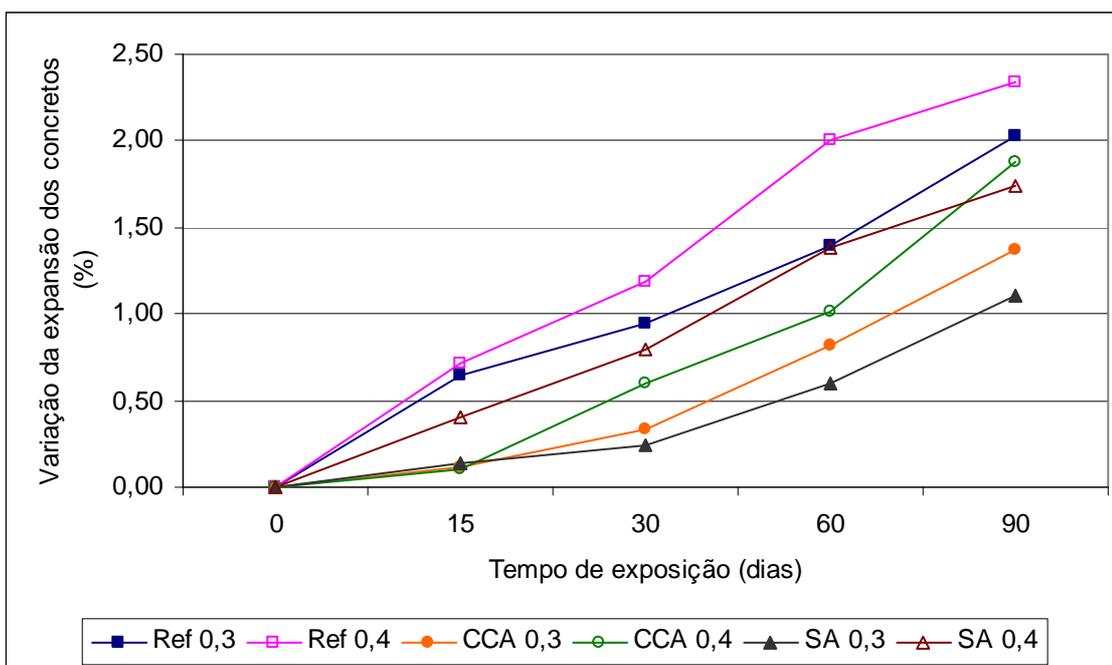


Figura 5.24 – Expansão dos concretos submetidos ao ataque por sulfato de sódio

Embora tenham sido previstas medidas de expansão até a idade de 180 dias, as mesmas apresentaram grande variabilidade nos resultados, não sendo, portanto, confiáveis. Diante disso, foram desprezadas para a análise global dos resultados. Por isso, a Tabela 5.22 e as Figuras 5.23 e 5.24 só apresentam os dados de expansão até a idade de 90 dias de ensaio.

A relação água/materiais cimentantes parece exercer influência sobre a expansão dos concretos submetidos ao ataque por sulfatos, sendo observados maiores expansões para a relação água/materiais cimentantes 0,4, em todas as misturas, a exemplo do que foi

¹⁴ As Figuras 5.23 e 5.24 trazem a variação de expansão em escalas diferentes, tendo em vista a ocorrência de diferenças significativas entre os valores observados.

observado por Chindaprasirt, *et al* (2004), em misturas contendo cinza volante como pozolana.

O material aglomerante utilizado tende a exercer influência sobre a expansão dos concretos. As misturas contendo apenas cimento Portland apresentam maiores expansões, em ambas as relações a/c se comparadas às misturas com pozolanas. O aumento acentuado dos valores de expansão a partir da idade de 30 dias coincide com a queda de resistência observada a partir desta idade em ambas as relações a/c.

Para os concretos com SA a/c 0,3, a variação da expansão mostrou-se pouco significativa até a idade de 60 dias, seguindo a tendência apresentada pelos valores de resistência a flexão até a idade de 90 dias. O mesmo comportamento foi observado para as amostras com CCA a/c 0,3, porém os valores obtidos superam os valores da sílica ativa a partir dos 30 dias de ensaio.

Para os concretos de relação a/c 0,4, as expansões observadas para o concreto com cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono foram inferiores aos da sílica ativa até a idade de 60 dias. Aos 90 dias, a expansão das amostras com CCA ultrapassa os valores obtidos com a sílica ativa.

De acordo com Metha (1973) *apud* Cohen (1983), a expansão observada pelo ataque de sulfatos em concreto está diretamente ligada ao tamanho do cristal de etringita. Na presença de maiores quantidades de hidróxido de cálcio, a hidratação dos aluminatos na reação com o sulfato é muito lenta, o que leva à formação de etringita micro-cristalina. Essa etringita tem grande superfície específica e é capaz de adsorver grande quantidade de água. Isso gera grandes pressões internas no concreto e conduz à expansão do sistema. Já quando a quantidade de Ca(OH)_2 é reduzida, a hidratação dos aluminatos na reação com o sulfato é rápida e forma grandes cristais de etringita, que contribuem menos para a expansão do concreto. Isso explica a diferença de comportamento entre as misturas com pozolana (menor quantidade de hidróxido de cálcio disponível) e as misturas de referência.

5.12 Avaliação da CCA com baixo teor de carbono na redução da reação álcali-agregado

A Tabela 5.24 apresenta os resultados das medidas de expansão para cada uma das argamassas avaliadas segundo o método ASTM 1260 (2001) para avaliação da reatividade potencial do material utilizado. A Figura 5.25 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 5.24 Reatividade potencial das diferentes argamassas avaliadas

Material cimentante	Agregado	Variação comprimento (%)														
		Idade (dias)														
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Cimento CP II F 32 (Referência)	Vidro Pyrex	0,00	0,09	0,17	0,20	0,22	0,25	0,28	0,32	0,36	0,39	0,43	0,46	0,48	0,51	0,52
Cimento CP II F 32 contendo 8% SA		0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Cimento CP II F 32 contendo 15% CCA		0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03

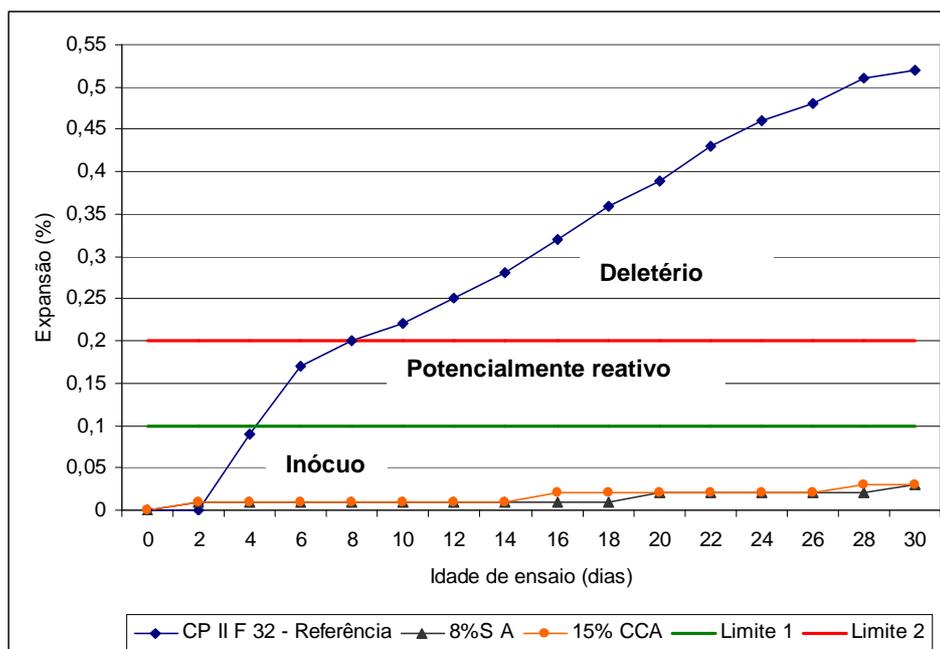


Figura 5.25 – Medidas de expansão para avaliação potencial da RAA

Em relação à norma ASTM C-1260/2001, os seguintes parâmetros são apresentados para avaliação da expansão provocada pela reação álcali-agregado:

- Expansão inócua para valor menor que 0,10%, aos 16 dias de idade, contados a partir da data de moldagem;
- Expansão deletéria para valor maior que 0,20%, aos 16 dias de idade, contados a partir da data de moldagem; e
- Valor entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias, pode ser tanto expansão inócua quanto deletéria, sendo, pois, necessárias informações suplementares sobre os materiais em evidência, ou ainda, acompanhamento da variação do comprimento até os 28 dias.

De acordo com a referida norma, os ensaios apontam que apenas para a argamassa de referência (CPII-Z 32 + vidro *Pyrex*) há comportamento deletério, tendo sido, inclusive, observadas fissuras nos corpos-de-prova, conforme mostra a Figura 5.26.

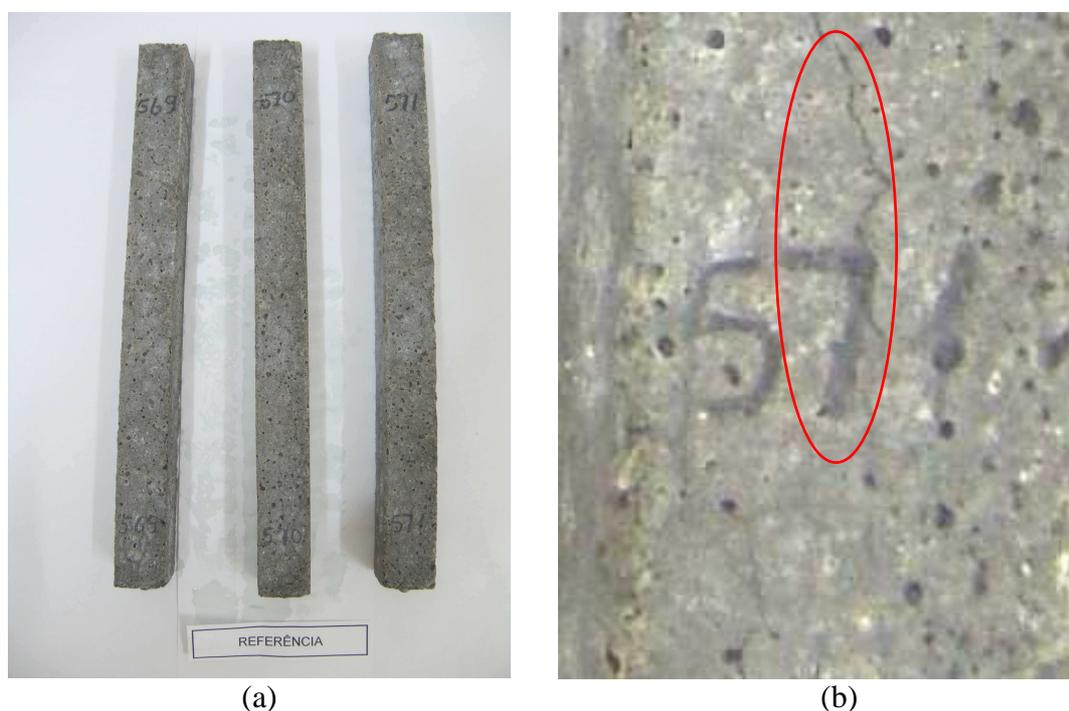


Figura 5.26 – (a) Barras da argamassa de referência aos 30 dias de ensaio; (b) detalhe da fissura em uma das barras

Já as argamassas com sílica ativa e cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono apresentaram comportamento inócuo. A Figura 5.27 mostra as argamassas produzidas com as pozolanas aos 30 dias de ensaio.

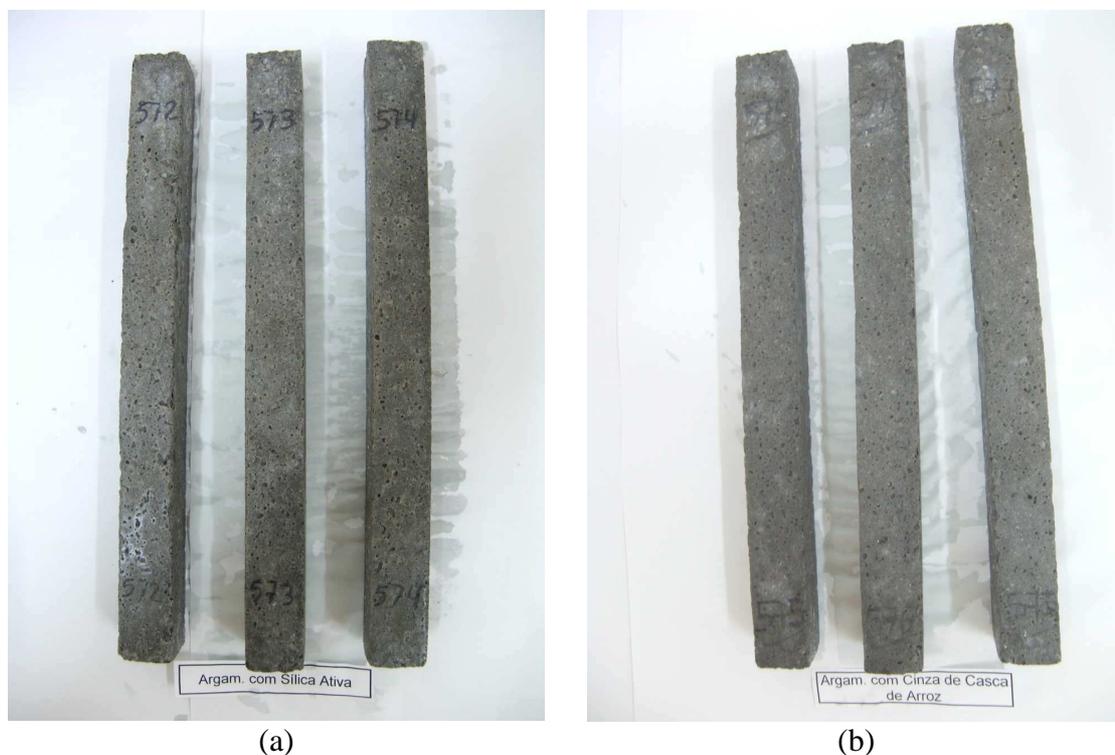


Figura 5.27 – (a) Barras da argamassa com sílica ativa; (b) Barras da argamassa com cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono

O resultado indica que para os teores de substituição utilizados, 8% e 15% em volume absoluto de cimento, respectivamente, ambas as pozolanas, são capazes de reduzir o desenvolvimento da reação álcali-agregado de forma semelhante, o que ratifica resultados apontados por vários pesquisadores (THOMAS *et al.*, 1996; HASPARYK, 1999; BODDY, *et al.* 2000).

Por outro lado, a literatura também aponta casos em que o uso de adições minerais desencadeou o processo de reação álcali-agregado nas misturas avaliadas. Autores como Hobbs (1988), Petterson (1992), e Diamond (1997) são mais conservadores e indicam que o uso de pozolanas como alternativa para a inibição da reação álcali-agregado deve ser vista com cautela. Isso porque o excesso de material pode resultar em efeito contrário e danoso às misturas à base de cimento Portland. Esse comportamento adverso

é creditado, na maioria dos casos, ao elevado diâmetro médio das partículas e à interação química das soluções alcalinas.

Diamond (1997) relata que alguns pesquisadores encontraram uma relação entre a ocorrência de expansão por reação álcali-agregado em misturas contendo sílica ativa não reagida. Segundo o autor, quando o diâmetro médio das partículas da pozolana utilizada (sílica ativa) apresenta-se muito acima dos comercialmente empregados, o material comporta-se como um agregado reativo, formando um gel similar ao da reação álcali-agregado quando a concentração de hidróxidos alcalinos é elevada.

O teor de material empregado também parece exercer influência sobre o comportamento das pozolanas. Por serem materiais de levada superfície específica, sua dispersão nas misturas é difícil e a má dispersão das partículas pode levar à formação de grumos. Estes grumos podem, então, apresentar comportamento de agregado reativo, a exemplo do que acontece com partículas de diâmetros elevados.

Assim, parece que o material precisa apresentar características ótimas de diâmetro médio das partículas bem como um teor ótimo empregado para que permita sua dispersão de forma adequada na mistura e faça com que o mesmo possa contribuir positivamente para a inibição da RAA.

5.13 Sobre a produção em escala da CCA com baixo teor de carbono

Há mais de 30 anos a CCA residual, ou mesmo aquela CCA produzida sob condições controladas de temperatura e tempo de exposição, porém ambas com elevado teor de carbono, vem sendo pesquisada e sua qualidade como pozolana para uso como adição em argamassas e concretos é inquestionável, especialmente com aspectos relativos à durabilidade das argamassas e concretos e com ela confeccionados. Entretanto, a transferência dessa tecnologia, ao contrário de outros materiais com características pozolânicas, ainda não se tornou realidade e seu uso continua sendo exclusivamente laboratorial, não só no Brasil, como na grande maioria dos países geradores deste resíduo.

Este comportamento, como já foi comentado, pode ser função de uma série de fatores, mas principalmente, da cor do material, uma vez que os pesquisadores, na sua maioria, preocupavam-se com a cristalinidade do material. A busca por um material totalmente amorfo e altamente reativo fez com que os teores de carbono continuassem altos mesmo em sistemas controlados de produção de CCA. Além de alterar a cor dos produtos com ela confeccionados, a CCA residual, pelo alto teor de carbono presente, apresenta dificuldades de manuseio, sujando tudo o que toca.

Outro problema decorrente do uso da CCA residual, com elevados teores de carbono, é a variação do teor de carbono entre cinzas de diferentes origens ou recolhidas em diferentes momentos. A variação do teor de carbono provoca mudanças na cor do produto final, por exemplo, o concreto. Mesmo que isso não represente problema para a maioria das aplicações, a variação do teor de carbono conduz também à variação do consumo de água e, conseqüentemente, das resistências obtidas. Admitindo a produção de CAD junto às centrais dosadoras de concreto, o controle da variação do teor de carbono e da demanda de água em função dessa variação seria muito complicado e representaria um sério problema para as empresas de serviço de concretagem, possivelmente inviabilizando o uso do material como adição pozolânica.

Um ponto a destacar com relação à utilização da CCA pela indústria da construção civil é a logística para o recolhimento do material junto às beneficiadoras do cereal. Como a produção de CCA se dá, na maioria dos casos, junto às beneficiadoras de arroz e estas, muitas vezes, não concentram, individualmente, grandes volumes de material, isso pode representar um entrave para a produção comercial de CCA com baixo teor de carbono.

Apenas as cinzas obtidas junto às usinas termoelétricas não apresentariam esse problema. Em função do grande volume gerado em um único local, o recolhimento seria facilitado. Todavia, em ambos os casos, o transporte da CCA residual a grandes distâncias torna o processo muito caro, em função de sua baixa massa unitária.

Diante desse panorama, a implantação de um processo industrial, que permita a retirada do carbono da CCA residual na forma de pequenas unidades beneficiadoras do material, contribuiria para tornar o material atrativo para a indústria da construção civil. A instalação do sistema de retirada do carbono da CCA poderia ser feita junto às cooperativas de produtores e beneficiadoras do cereal ou das usinas termoelétricas, reduzindo o custo com seu transporte e reunindo um bom volume do material. O fato de ser abastecida com CCA's brutas de diferentes origens não seria problemático, uma vez que trabalhos anteriores já comprovaram que, independente do sistema que lhes deu origem, as CCA's residuais apresentam bom desempenho como pozolanas, desde que adequadamente moídas. Uma vez recebido, o material deveria ser estocado em local coberto para posterior processamento.

Cabe apenas uma única ressalva: cinzas residuais que trazem boa parte de partículas totalmente brancas representam maior dificuldade de moagem, exigindo maior consumo de energia e demandando maior tempo durante esta etapa do processo, se comparadas àquelas onde predominam as partículas pretas. Isso porque as partículas brancas surgem em função de picos de temperatura no momento da queima da casca, originando um material cristalino de mais difícil moagem. Assim, seria necessária uma triagem no momento do recebimento, de forma a classificar o material entregue, minimizando e dosando o teor dessas partículas por partida de CCA a ser processada para a retirada do carbono.

Outro aspecto a ser reforçado é o consumo de aditivo requerido nas misturas com CCA de baixo teor de carbono: ao exigir menos aditivo, quando comparada à CCA bruta, residual, com alto teor de carbono (resultados deste estudo), o CAD torna-se ainda mais econômico, já que o aditivo superplastificante tem um custo significativo na composição de preço dos concretos de alto desempenho, justificando assim a retirada do carbono do material. Além disso, o uso de CCA com baixo teor de carbono com as características aqui apresentadas implicará, também, em um menor consumo de aditivo superplastificante em relação ao que seria exigido quando da utilização de sílica ativa e em uma menor perda de consistência ao longo do tempo. Esse resultado se mostra

particularmente interessante quando se pensa na produção de concretos de alto desempenho. Isso porque o CAD, produzido com CCA com baixo teor de carbono, em central dosadora de concreto, terá maior tempo para as operações de transporte, lançamento e adensamento, facilitando sua utilização no canteiro de obras.

Fato importante também é que a reatividade da CCA parece depender fundamentalmente da moagem e que processos que resultem em 50% das partículas com diâmetro médio entre 5 μ m e 8 μ m conduzem a um material de boa reatividade e bom desempenho como adição pozolânica.

Diante disso, fica evidente a necessidade de avaliação de outros sistemas de moagem, bem como o uso de aditivos facilitadores de moagem, de forma que se possa otimizar essa operação no sistema produtivo, ou mesmo a produção de CCA's com diferentes desempenhos, classificadas por tipo, a exemplo do que ocorre com os cimentos. Poder-se-ia, então, trabalhar com diferentes condições de moagem e, conseqüentemente, de custos de produção e comercialização. Outra possibilidade seria a produção de cimento pozolânico utilizando-se a CCA de baixo teor de carbono.

Em relação ao mercado, o uso da CCA de baixo teor de carbono representará menor custo do que a sílica ativa para a produção de CAD. De acordo com os valores atuais e já considerando a implantação do sistema proposto com uso externo de energia e um moinho comercial de alto rendimento, a CCA com baixo teor de carbono pode ser comercializada ao custo da tonelada de cimento, ou seja, algo entre US\$80.⁰⁰ e US\$ 100.⁰⁰/tonelada. Isso indica que, mesmo em um sistema sem reaproveitamento de energia, o processo pode ser sustentável. Enquanto isso, a SA é comercializada hoje pelo preço de US\$ 500.⁰⁰/tonelada.

Além das questões técnicas e comerciais já discutidas, o desenvolvimento do sistema comercial de produção de CCA reduzirá o volume de resíduo (CCA) disposto no meio ambiente. E mais: uma vez que a CCA deixa de ser um problema ambiental e passa a ser matéria-prima, também se espera aumentar a renda dos beneficiadoras de arroz que passarão a vender o material que hoje lhes causa despesa com o sistema de armazenamento exigido pelos órgãos ambientais. Este aumento de renda poderá ser investido no aumento da produção, na melhoria do sistema de beneficiamento ou ainda na geração de novos empregos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão de literatura, nos resultados experimentais e nas discussões mostradas nos capítulos anteriores, são apresentadas a seguir as conclusões, que respondem aos objetivos propostos no capítulo I. Cabe salientar que as conclusões e considerações descritas aqui são específicas deste trabalho, em função das limitações do estudo realizado.

Por fim, com o objetivo de dirimir algumas dúvidas e preencher algumas lacunas, são feitas propostas para o desenvolvimento de novos trabalhos para um melhor entendimento do desempenho da CCA com baixo teor de carbono como pozolana para a produção de CAD.

6.1 Em relação aos objetivos do trabalho

- Foi possível estabelecer os parâmetros de produção, temperatura e tempo de retenção no forno, de forma que fossem obtidas cinzas de casca de arroz com baixo teor de carbono tecnicamente viáveis para a empresa;
- A condição de moagem adotada (2h+3), mesmo sendo considerada, a princípio, elevada, em função do consumo energético que representa, permitiu estabelecer tamanho de grãos de tal grandeza que o material apresentou boa reatividade;
- As características da CCA com baixo teor de carbono (físicas e químicas) mostraram poucas alterações se comparadas à CCA bruta, residual, a não ser pela redução de carbono residual apresentada pela primeira. O mesmo aconteceu com o padrão de difração de raios-X (ângulo e intensidade relativa), indicando que o sistema de requieima empregado para a retirada do carbono residual não interfere sobre estas características do material. Assim, as CCA's com baixo teor de carbono produzidas apresentaram boas propriedades pozolânicas;
- Os concretos produzidos com a CCA com baixo teor de carbono selecionada apresentaram bom desempenho mecânico, semelhantes aos da sílica ativa e

superiores aos concretos de referência, podendo o material ser uma opção de adição para a produção do CAD;

- Para uso como pozolana, com vistas à produção de CAD, a CCA com baixo teor de carbono contribuiu para uma melhora efetiva do produto frente ao ataque por sulfatos se comparado ao concreto de referência e apresentou desempenho semelhante aos concretos com sílica ativa. Além disso, mostrou-se tão eficaz quanto à sílica ativa na inibição do desenvolvimento da RAA, para o teor de substituição aqui empregado. Dessa forma, o problema relatado por Silveira (2001) com relação à RAA desenvolvida em concretos contendo CCA parece ter sido provocado pelo alto teor de substituição empregado (até 50% em massa de cimento) ou ainda pela má dispersão do material na mistura.
- Conclui-se, portanto, que, com o processo industrial proposto, é viável a produção e utilização de pozolana de baixo teor de carbono, obtida da cinza de casca de arroz residual, para a produção de CAD.

6.2 Sugestões para novos trabalhos

- Ajustar o sistema proposto para que a temperatura de requeima possa reduzida para 500°C, de forma a minimizar o consumo energético do processo, uma vez que as cinzas produzidas a esta temperatura foram consideradas tecnicamente viáveis;
- Avaliar o desempenho da CCA com baixo teor de carbono frente ao uso de outros tipos e marcas de cimento, bem como de aditivos redutores de água (superplastificantes).
- Experimentar outros teores de CCA como adição ao cimento Portland, comparando a cor obtida com a cor do cimento de forma a estabelecer limites de utilização que não interfiram na cor do produto final obtido.
- Otimizar o tempo de moagem do material, estudando outros tipos de moinho e a utilização de aditivos facilitadores de moagem, visando à obtenção de partículas com diâmetro médio entre 5µm entre 8µm.

- Avaliar o comportamento do material em relação à RAA com teores mais elevados de substituição por cimento.
- Verificar o desempenho do material frente a outros aspectos relativos à durabilidade, como a carbonatação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, D.A. **Desing of concrete mixtures**. Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute Bulletin, n.1. Chicago, 1925, 20 p.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991. 99p.

AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CANOVAS, M.F.; SALLA, J.M. **Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón**. IETCC, Madrid, 1996. 285p.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1ª edição. São Paulo: Pini, 2000. 667p

AL-DULAIJAN, S.U., MASLEHUDDIN, M., AL-ZAHRANI, M.M., SHARIF, A.M., SHAMEEM, M., IBRAHIM, M. **Sulfate resistente of plain and blended cementsexposed to varying concentrations of sodium sulfate**. Cement and Composites, 25, 2003, p. 429-437.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Portland. **ASTM C-150**. Philadelphia, 1991.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-227/90**. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar- bar method). Phildelfia, 1997.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-295/90**. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. Phildelfia, 1997.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-618/97**. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in concrete. Philadelphia, 1997.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-856/95**. Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. Philadelphia, 1997.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. **ASTM C 1012**. Philadelphia, 1989.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1260**. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2001.

ARROZ BRASILEIRO Disponível em www.arroz.agr.br .Acessado em janeiro/2006.

ASLAM, M. SRIVASTAVA, R. S. E MINOCHA, A. K. **Durability of concrete in sulphurous atmosphere**. Indian Concrete Journal, 1987. p 135-138.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto – Especificação**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NM 53. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado - Reatividade Potencial de Álcalis em combinações cimento-agregado**: NBR 9773, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Pozolânico - determinação da pozolanicidade**. NBR 5753. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: determinação de perda ao fogo – índice de atividade pozolânica com cimento**. NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: e outros materiais em pó – determinação de massa específica**. NM 23. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland-determinação da área específica:** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimentos-Método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico:** NBR 5753. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone.** NM 67. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaios de compressão.** NM 77. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos -** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cal Portland. - Índice de atividade pozolânica:** NBR 5751. Rio de Janeiro, 1977. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Especificação.** NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação da expansibilidade de Lê Chatelier.** NBR 11582. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto: procedimento.** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – análise química: determinação de perda ao fogo.** NM18. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado: Verificação da reatividade potencial de álcalis em combinações cimento/agregado.** NBR 9773. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado: Verificação da reatividade potencial pelo método químico**. NBR 9774. Rio de Janeiro, 1987.

BARTHA, P.; HUPPERTZ, E.A. Structure and Crystallization of Sílica in Rice Husk. In: **Internacional Conference on the Utilization of Rice By-Products**, Valencia, Spain, 1974. Proceedings... Valencia: IATA, 1974, p.89-98.

BHATT, M.S.Y. Mechanism of pozzolanic reactions and control of alkali-aggregate expansion. **Cement, Concrete and Aggregates**, vol. 7, n.2, 1985, p.69-77.

BODDY, A.M.; HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A. The effect of product of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, n.30, 2000, p. 1139-1150.

BRITISH STANDARD. **Fly Ash for Concrete- definitions, requirements and Quality Control**. BS EN 450, London, 1995.

CHAKRAVERTY, A., MISHRA, P. e BANERJEE, D. **Investigation of combustion of raw and acid leached rice husk ash for production of pure amorphous white silica**. Journal of Materials Science, nº 23, 1988, p 21-24.

CHAKRAVERTY, A., MISHRA, P. e BANERJEE, D. **Investigation of thermal decomposition of rice husk**. Thermochemica Acta 94. Elsevier Science Publishers LTD. Amsterdam - 1985. p. 267-175..

CALLEJA, J. Adiciones y cementos con adiciones. **Materiales de Construction** nº190-191, 1983, Madrid, p25-52.

CALLEJA, M. **Durability of Concrete**. In: International Congress of Cement. 7th. Paris, 1980, 2v, v1.

CALLEJA, M. Adiciones y cementos con adiciones. **Materiales de Construcción**, Nº190-191, 1983, p. 25-52.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo, Pini, 1988, 522p.

CHATTERJI, S.; THAULOW, N. Studies on alkali-silica reaction: Part 5. Verification of a newly proposed reaction mechanism. **Cement and Concrete Research**, 19, 1989, p. 177-183.

CHESTER, R. **Marine Geochemistry**. London:Chapman & Hall, 1990. 698p.

CHINDAPRASIRT, P, HOMWUTTIWONG, S. SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, 34, 2004, p. 1087-1092.

COLLEPARDI, M. Concrete Deterioration from Sulfate and Acid Attacks. Course on Durability of Concrete. In: **International Congress High-Performance Concrete-Performance and Quality of Concrete Structures**, Santa Catarina, Brasil, 1996. Proceedings...Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996, 2v, v.1.

COLLEPARDI, M. Ordinary and long term durability of reinforced concrete structures. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais e...** São Paulo: IBRACON, 1998. 1 CD.

CONAB, Braisl. Disponível em www.conab.org.br . Acessado em janeiro/2006.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza da casca de arroz**. Tese de doutorado UFSC. Florianópolis, 2001, 191p.

DAFICO, J.A., et. al. Argamassa Pozolânica ou Substituição do Cimento Portland (comum) por Cinza da Casca de Arroz. **Textos para Discussão**. MEC/SESu/PROED. Goiânia, 1981.

DELLA, V. P. **Processamento e caracterização de sílica ativa obtida a partir de cinza de casca de arroz**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 2001, 69 p.

DIAMOND, S. Mineral pozzolanic reaction in one year old fly ash pastes: an SEM evaluation. In **International Conference On Cement Microscopy, 11th**. New Orleans, 1989. Proceedings... p.263-274.

DIAMOND, S. Alkali Silica Reactions – Some Paradoxes. **Cement and Concrete Composites**, V. 19, N°s 5 e 6, 1997, p. 391-401.

FURNAS, Equipe de Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e Propriedades**. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade, Ed PINI, 1997.

GAVA, G. P.L.O. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação de atividade pozolânica**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1999, 117 p.

GJØRV, O.E., High strength concrete. In: **MALHOTRA, V.M. (ed) Advances in Concrete Technology**. Ottawa: Energy Mines Resources, 1992, p.21-78.

GONZÁLES, M.A. Ambito de Aplicacion de los ensayos ASTM para la determinacion de la resistencia a los sulfatos del cemento Portland. In: **XII Reunión Técnica Dra. Haydée V. Armándola**. Proceedings... Associação Argentina de Tecnologia del Hormigón, Argentina, 1995, p. 271-285.

GOULART NETO, A.A., GALLETTI, A.A.B., TORTORELLO, F.I., HASPARYK, N.P., GÓZ, R.S., BITTENCOURT, R.M., PACELLI, W.A. Metodologia para verificação da influência da RAA em estruturas de concreto no campo e no laboratório. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais e...** São Paulo: IBRACON, 1998. 1 CD.

GUEDERT, L.O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas. UFSC. Florianópolis, 1989, 147 p.

GJØRV, O.E., SHAH, S.P. Testing Methods for Concrete Durability. **Matériaux et Constructions**. Paris, v4 (23), 1971, p. 295-304.

HASPARYK, N.P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali – Agregado – Efeito da cinza de casca de arroz e sílica ativa**. Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiânia. Goiânia, GO, 1999, 257p.

HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete**. Published by Thomas Telford Ltd. London, 1988, 183 p.

HOUSTON, D.F. Rice Hulls. In: **Rice: Chemistry and Technology**. American Association Cereal Chemists (AACC), USA, 1972, p. 301-352.

HOUSTON, D.F. **Rice, chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemical. St. Paul. Minnesota, USA, 1972, p. 301-351.

http://www.recycle.pcc.usp.br/des_sustentavel.html

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. – IPT. **Atividade Pozolânica: Método Chapelle Modificado**. Laboratório de química de materiais do IPT.6p.

ISAIA, G.C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolnas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V. M., AROZTEGUI, J. M. **Durabilidade e Vida Útil dos Edifícios**. Caderno de Engenharia. CE-05. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 1985, 30p.

JOHN, V. M. **Reciclagem e desenvolvimento sustentável**. (Documento Eletrônico).
Captura

JOSHI, R. C. LOHTIA, R. P. **Fly ash in concrete: production , proprieties and uses**. Amsterdam: OPA, 1997. 267p.

Jul. 2000.

KAPUR, P. C. Production of reactive bio-silica from the combustion of rice husk in a tube-in-basket (tib) burner. **Powder Technology**, v. 44, 1985, p. 63-67.

KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure. **Computer Methods Applied Mech. Engrg**. 2000. p. 433-454.

KIHARA, Y. Reação alkali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: **3º Congresso Brasileiro de Cimento**, São Paulo, 1993. Anais...São Paulo, ABCP, v.1, p. 319-337.

KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S.C. Reação álcali-agregado: visão atual e situação brasileira. In: **Simpósio sobre Durabilidade do Concreto**, 1998. São Paulo. Anais...São Paulo: IBRACON/USP, 1998.

KRISHNARAO, R.V., SUBRAHMANYAM, J. JAGADISH KUMAR, T. **Studies on the formation of black particles in rice husk sílica ash**. Journal of he European Ceramic Society, 21. 2000, p.99-104.

KURTIS, K.E.; MONTEIRO, P.J.M.; BROWN, J.T.; MEYER-ILSE, W. Imaging of ASRR gel by soft x-ray microscopy. **Cement and Concrete Research**, v.28, ,n.3, 1998, p. 411-421.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. Vol. 19, 1989, p. 63-68.

MAEDA, N., WADA, I., KAWAKAMI, M., UEDA, T. **Development of a New Furnace for the Production of Rice Husk Ash**. In: MALHOTRA, V.M. (ed) 7th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans. Proceedings. American Concrete Institute. Detroit, 2001, V. 2, p.835-852.

MEHTA, P. K. **Mineral Admixtures**. Concrete Admixtures Handbook-Proprieties, Science and Technology. Ed. V.S. Ramachandran. Ottawa, canadá, 1990 p.303-333.

MEHTA, P. K., POLIVKA, M. Use of Highly active pozzolans for reducind expansion in concrete containing reactive aggregate. **Living with marginal aggregates**, ASTM STP 597, 1976, p.25-53.

MEHTA, P.K **Rice husk ash - A unique supplementary cementing material**. In: Advances in concrete technology. CANMET. Ottawa, 1992, p. 407-431.

MEHTA, P.K. **Hardned cement past-microestructure and its relationship to proprieties**. In: International Congress on the Chemistry of Cement. 8th. Rio de Janeiro, 1986, v.1, p.113-121.

MEHTA, P.K., PITT, N. **A new process of rice utilization**. In: International conference on the utilization of rice by-products. Valencia, Spain, 1974. Proceedings.Valencia: IATA, published in 1977, p. 45-58.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan**. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

MEHTA, P.K. **Performance of Concrete in Marine Environment**. ACI SP-65, 1980, p 1-20.

MEHTA, P.K. **Properties of blended cements made from rice husk ash.** ACI Journal. American Concrete Institute. September, 1977, p. 440-442.

MEHTA, P.K.; GJØRV, O.E. A new test for sulfate resistance. **Journal of Testing and Evaluation**, v.2, n.6, Nov. 1975. p.510-514.

METHA, P. K. e GERWICK, B. C. J. **Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment.** Concrete International, 1982, p 45-51.

MEHTA, P.K.; MALHOTRA, V.M. **Pozzolanic and Cementitious Materials.** Advances in Concrete Technology, Vol 1, CANMET, Canadá, 1996.

METHA, P.K. e PITT, N. **Energy and industrial materials from crop residues.** Journal of Resource Recovery and Conservation, Vol 2, 1976, p 23-38

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA – Brasil. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/> . Acessado em janeiro/2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2ª edição. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

OSBORNE, G.J. The Effectiveness of a Carbonated outer layer to Concrete in the Prevention of Sulphate Attack. In: **International Conference Protection of Concrete.** Proceedings... University of Dundee, UK, 1990, p. 75-91.

PAULON V.A. **Reações Álcali-Agregado em Concreto.** (Dissertação Mestrado), Escola Politécnica da USP, 1981, 114p.

PERKINS, P.H. **Repair, Protection and Waterproofing of Concrete.** Elsevier Applied Science Publishers LTD. England, 1986. p. 34-60.

PETTERSSON, K. Effects of silica fume on alkali-silica expansion in mortar specimens. **Cement and Concrete Research**, vol. 22, 1992, p. 15-22.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 2006, 317 p.

PRUDÊNCIO JR.,L.R. Durabilidade do Concreto frente ao ataque de sulfatos e cloretos. In: **Seminário sobre a Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto**, 1993, Porto Alegre, R.S. **Anais:** Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1993, V 1, p. 1-12.

RASHEEDUZZAFAR, D.F.H. e BADER, M.A., **Toward Solving the Concrete Deterioration Problem in the Gulf Region**, Proceedings of the Second Saudi Engineers Conference, Dhahran, November 16-19, 1985, pp. 460-514.

REGO, J.H.S. **As cinzas de casca de arroz (CCA's) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas**. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia. UNB. Brasília, 2004, 274p

SHANNAG, M.J., SHAlA, H.A. **Sulfate resistance of high performance concrete**. Cement and Composites, 25, 2003, p. 363-369.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, 1997, 111 p.

SILVA FILHO, L.C.P. da. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 1996, 139 p.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 1996, 153p.

SILVEIRA, A. A. **O efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado**. Proposta de Tese. UFRGS, Porto Alegre, 2001, 102 p.

SILVEIRA, A.A. & RUARO, P. **A 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**. Seminário da disciplina de novos materiais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.

SILVEIRA, A. A., DAL MOLIN, D. C. C. A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão da argamassa. **I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Goiânia, 1995. p. 15-24.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO Disponível em www.sindicatodocimento.com.br . Acessado em 20 de fevereiro de 2006.

SINGHAL, L.K. **Experiências de Ciências dos Materiais**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1973.

SOBRAL, H.S. **Durabilidade dos Concretos**. Associação Brasileira de cimento Portland. São Paulo, 1990. 50p. (BT-43).

SOUZA, V. C. M. e RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255p.

SPONHOLZ, I. **Avaliação de desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. Florianópolis: UFSC, 1998.

SUBBARAO, E. C., CHAKRAVORTY, D. , MERRIAM, M. F., RAGHAVAN, V. e SUGITA, S., SHOYA, M.^a, TOKUDA, H. **Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash**. In: MALHOTRA, V.M. (ed)) International conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete. Proceedings. American concrete institute. Detroit, 1992, p. 495-512.

SUGITA, S. **Method of producing active rice husk ash**. USA Patent N^o 5329867. July, 1994.

SUGITA, S., YU, Q., SHOYA, M., TSUKINAGA, Y. E ISOJIMA, Y. **On the semi-industrial production of highly reactive rice husk ash and its effect on cement and concrete proprieties**. In: International Congress on the Chemistry of Cement. 10th. Gothenburg, Suíça, v.3, 1997, p. 173-181.

SUBBARAO, E.C., CHAKRAVORTY, D., MERRIAM, M.F., RAGHAVAN, V. SINGHAL, L.K., **Experiências de Ciências dos Materiais**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1973, 335p.

SWAMY, R.N. Fly ash and slag: standards and specifications - help or hindrance? **Materials and Structures**, RILEM 26.200-613, 1993, p.600-613.

THOMAS, M.D.A.; BLAKCWEEL, B.Q.; NIXON, P.J. Estimating the alkali contribution from fly ash to expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, 1996, p. 251-264.

TUTHILL, L. H. **Lasting concrete in a sulfate environment**. Concrete International, 1988, p 82-83.

TUTHILL, L.H. Lasting Concrete in a Sulfate Environment. **Concrete International**, 1988, p. 82-83.

TUTSEK, A. & BARTHA, P. **Method of producing low-carbon white husk ash**. United States Patent. No 4.049.464. EUA, 1977.

URHAN, S. Alkali-silica and pozzolanic reactions in concrete. Part I: Interpretation of published results and an hypothesis concerning mechanism. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 1, p. 141-152, 1987.

WADA, I., KAWANO, T., KAWAKAMI, M., MAEDA, N. Effect of highly reactive rice husk ash on durability of concrete and mortar. Proceedings of the Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, VI, 2000, p. 205-222.

WAYERS, R.E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments. **ACI Materials Journal**, V 95, n° 4, 1998, p 445-453.

WEBER, S. L. **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 de mestrado. UFSC. Florianópolis, 2001.

WEIDMANN, D.F. **Contribuição para determinação de metodologia de avaliação da forma de agregados e análise da influência desta propriedade em argamassas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – UFSC Florianópolis, 2006.

WEST, G. Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges. Ed. Thomas Telford, London, 1996, 157p.

WORLD RICE PRODUCTION – Prospects Fall. Disponível em www.fas.usda.gov . Acessado em 12 de maio de 2003.

XU, A., SARKAR, L. NILSON, L.O., Efect of fly ash on the microstructure of cement mortar. **Materials ans Structures**, London, V.26, n16, 1993, p. 414-424.

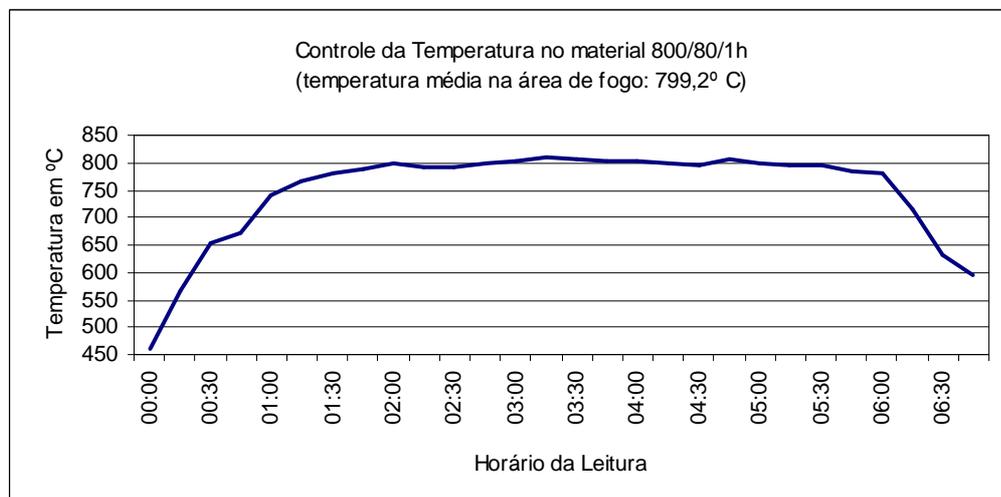
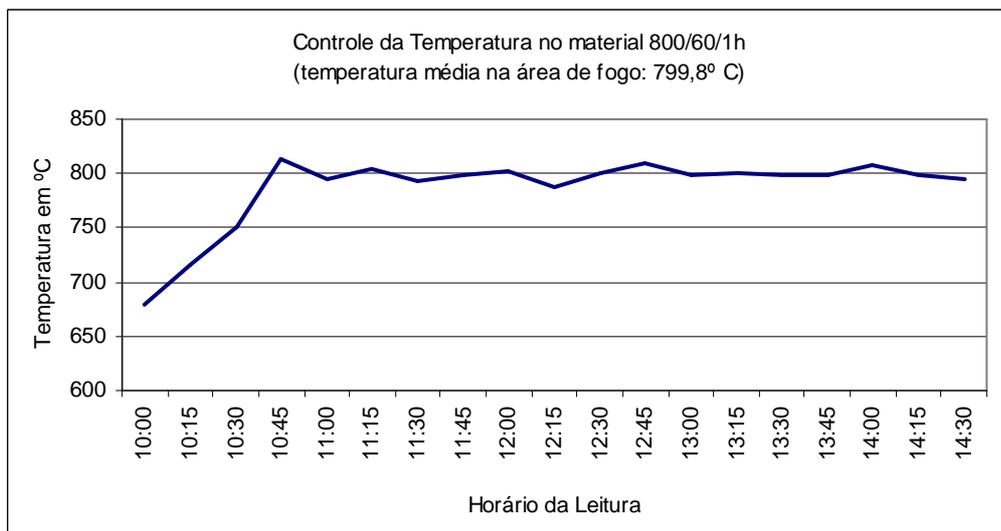
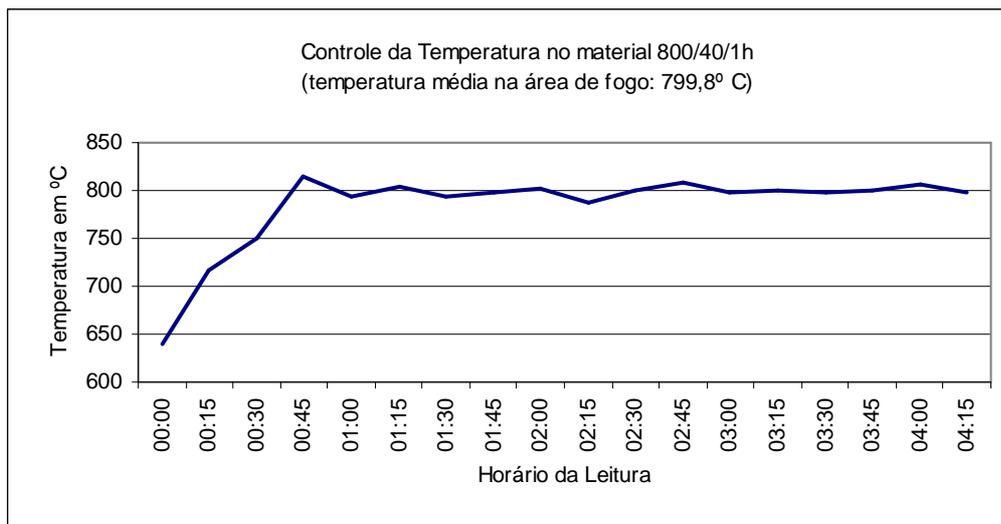
YAMAMOTO, Y. e LAKHO, M. S. Production and utilization of active rice husk ash as a substitute for cement. **Journal of Japan Society of Corrosion Engineering**, nº322. Tóquio, 1982, p. 157 – 166.

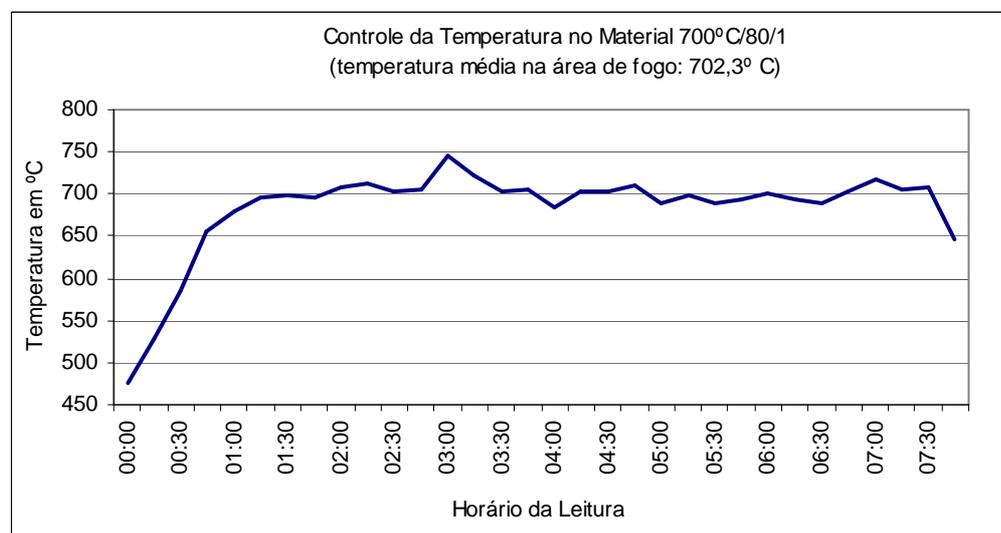
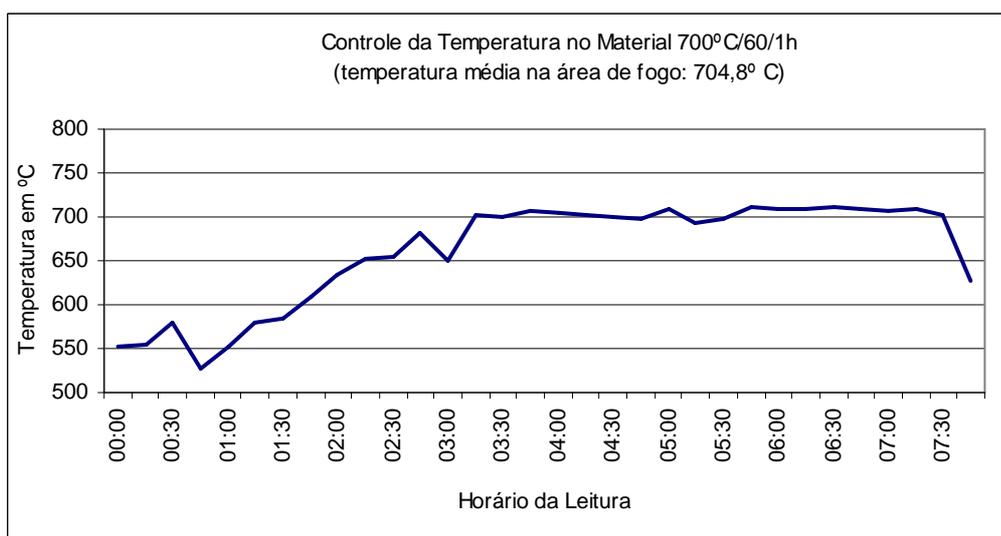
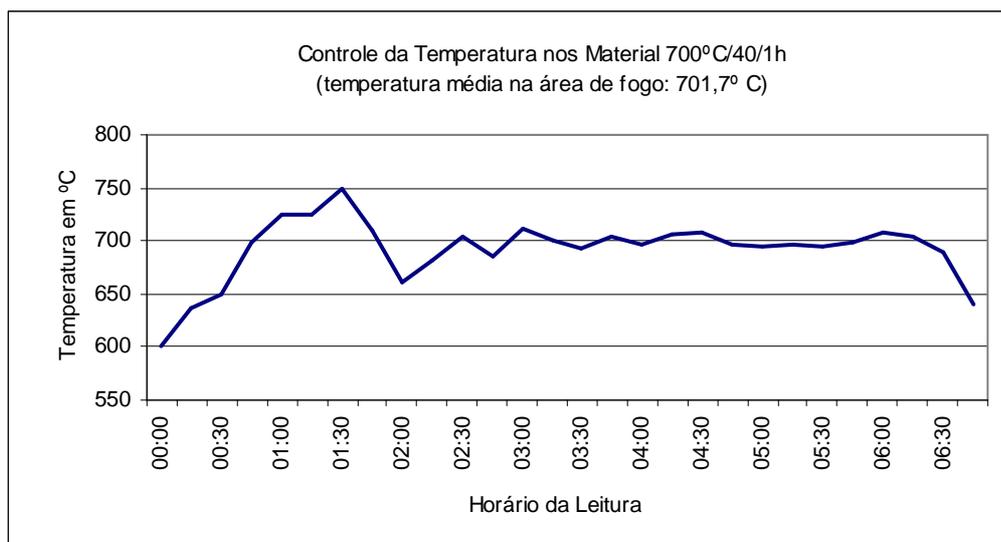
ZHANG, M., MALHOTRA, V.M. High-Performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*. V. 93, nº6, November-December, 1996, p629-636.

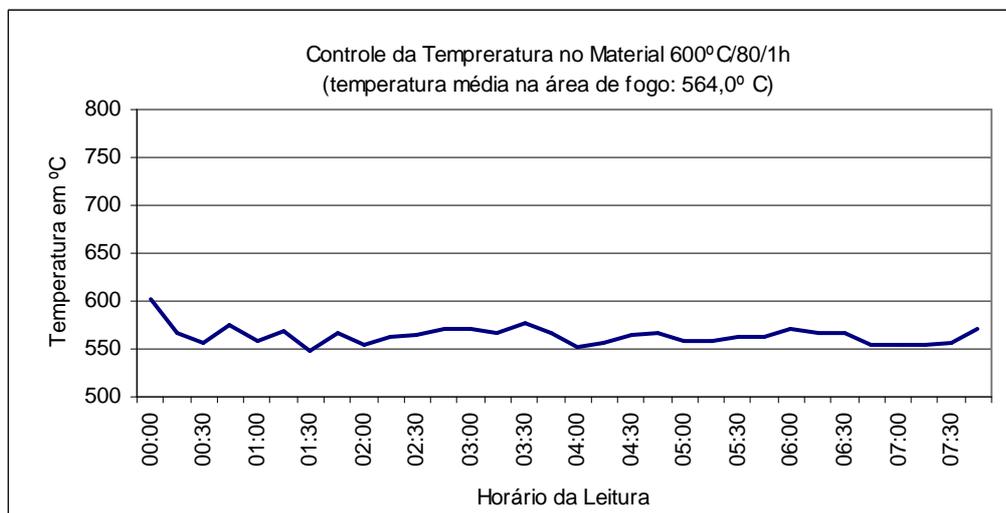
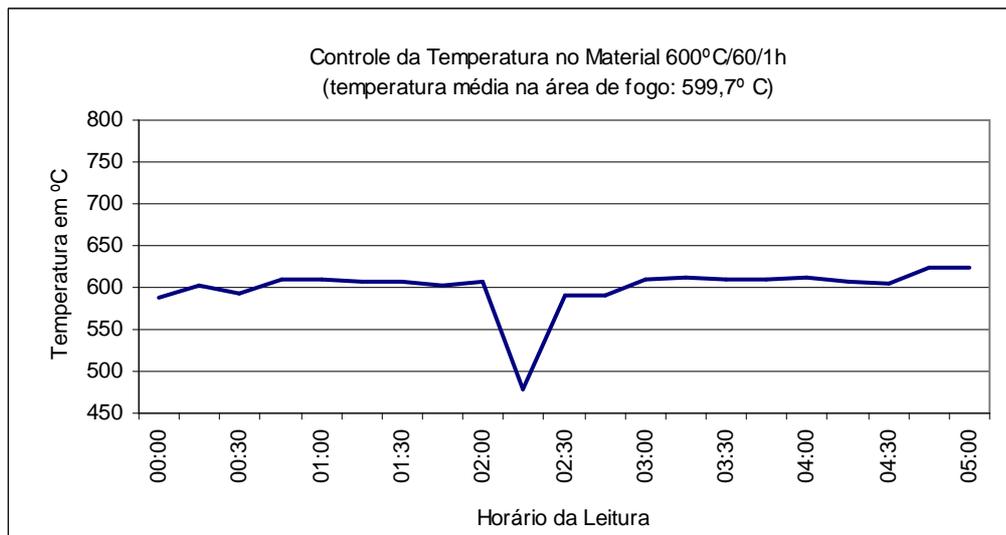
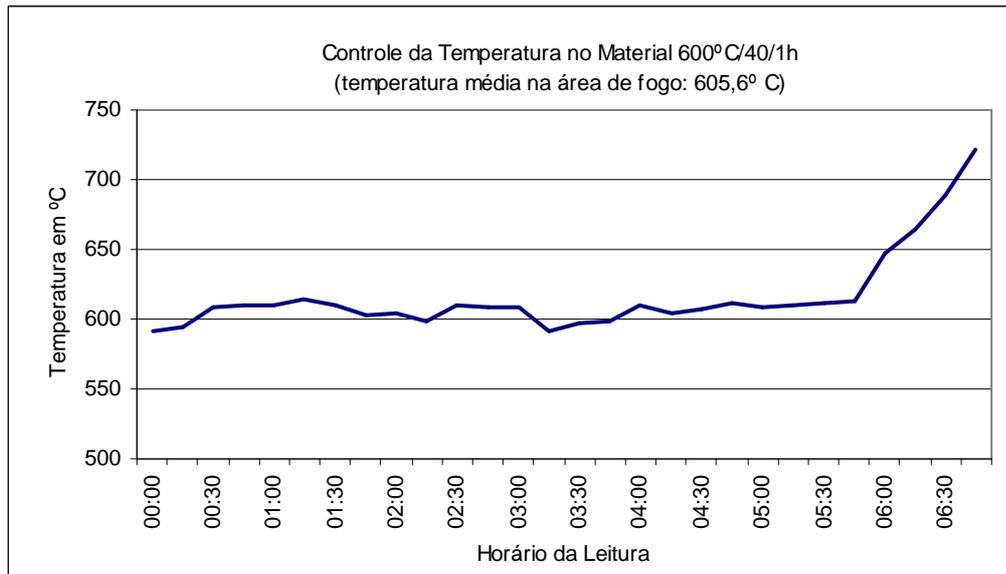
ANEXOS

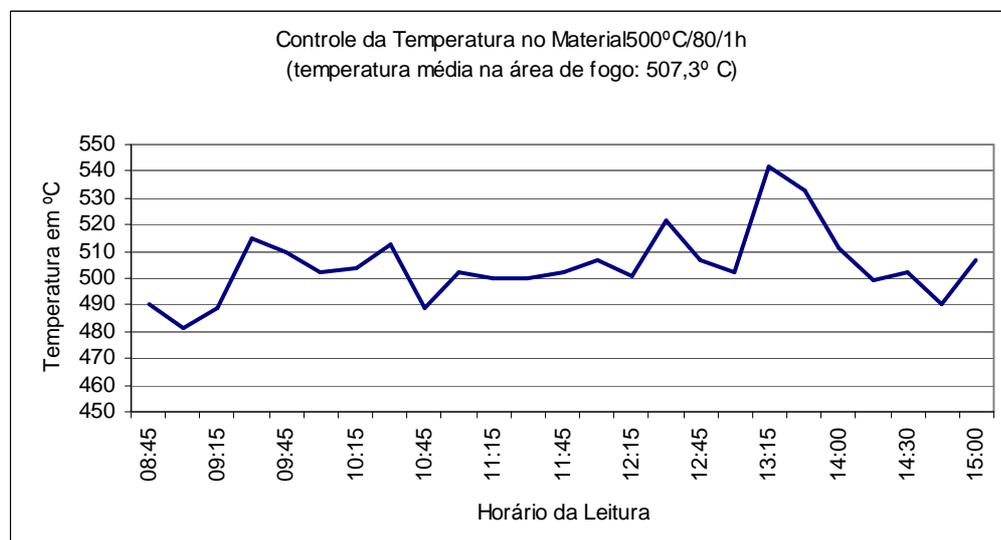
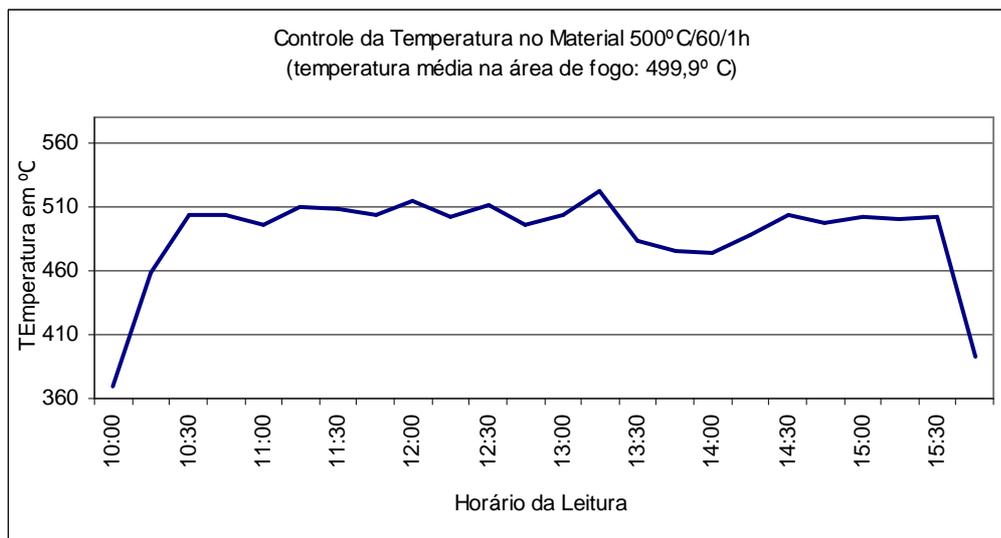
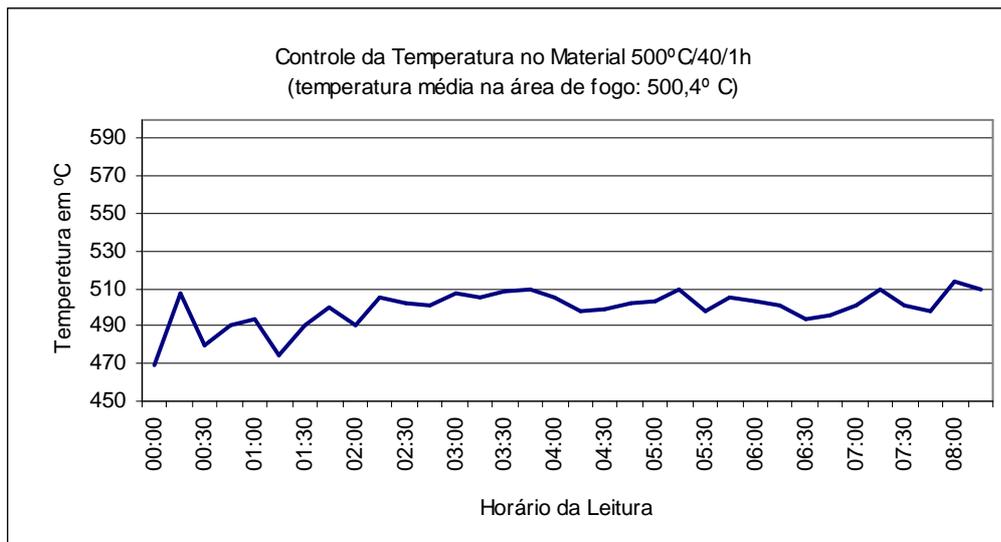
ANEXO I
LAUDOS DOS CIMENTOS

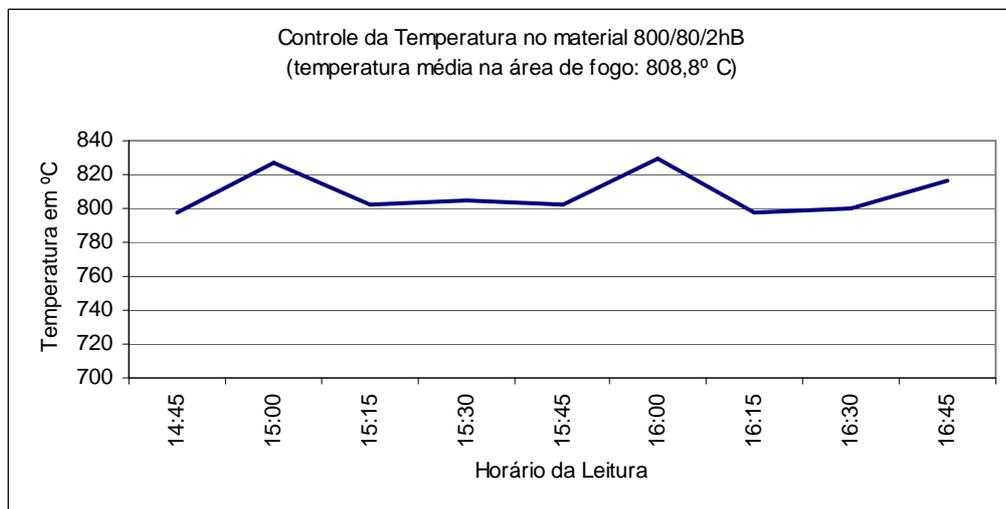
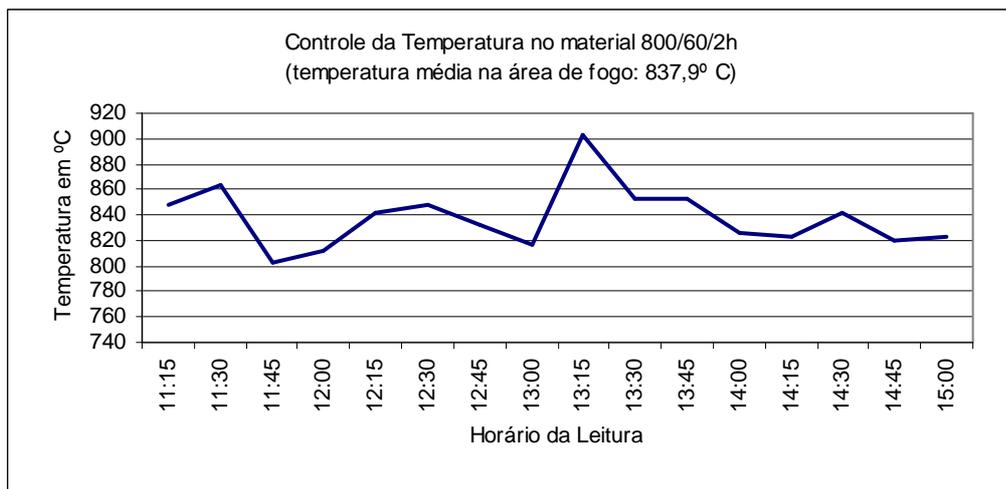
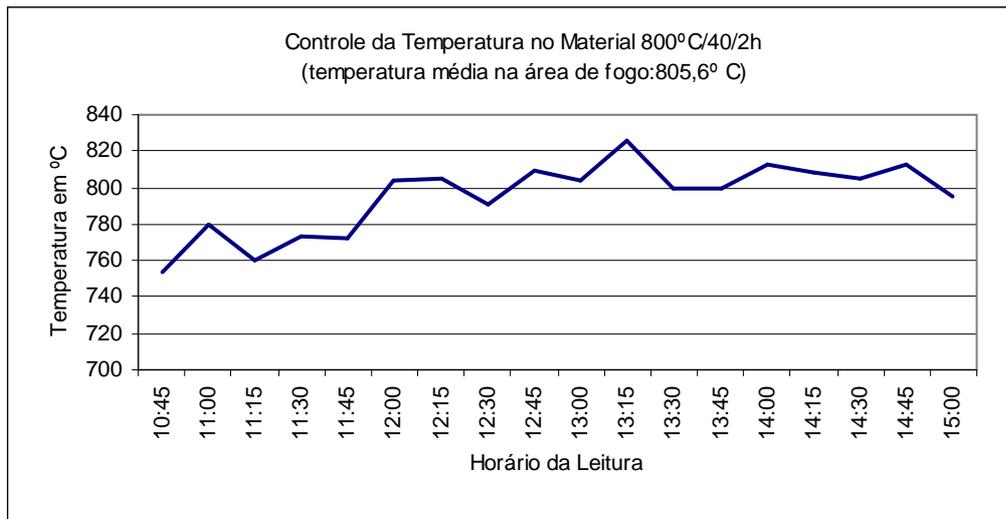
ANEXO II
GRÁFICOS DE TEMPERATURA

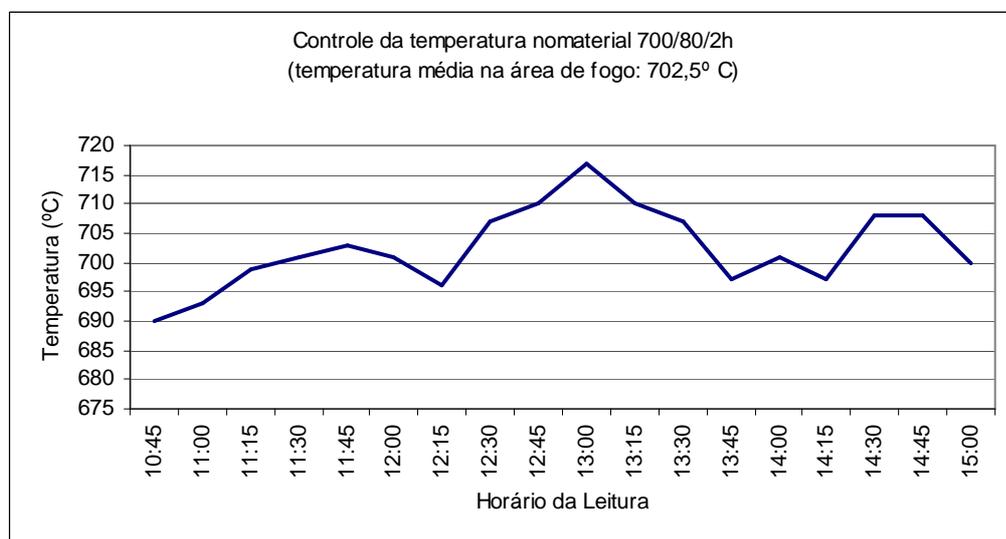
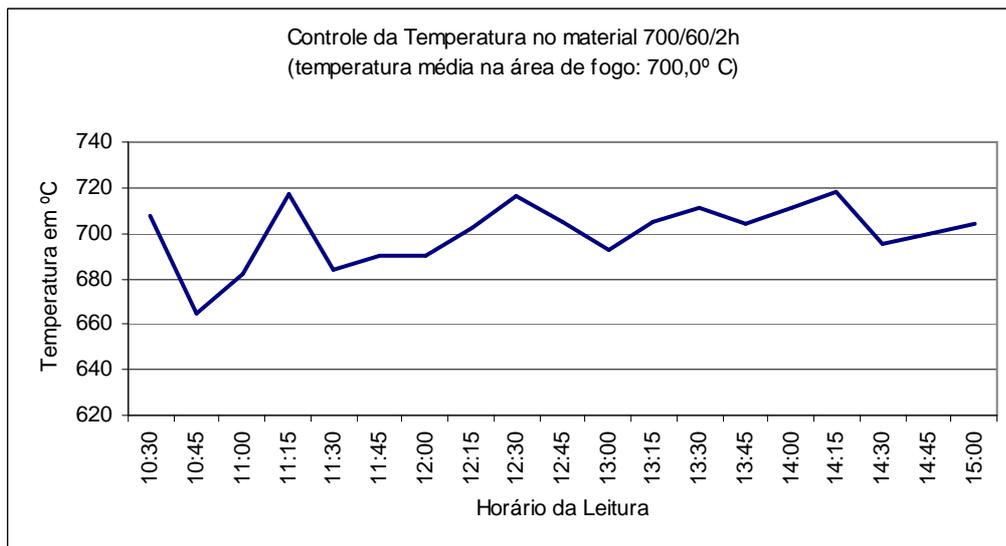
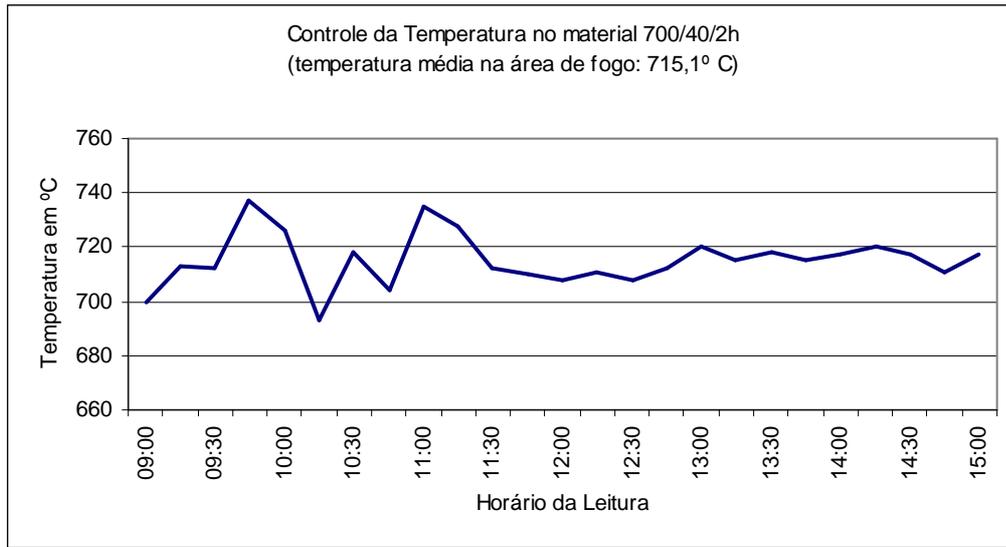


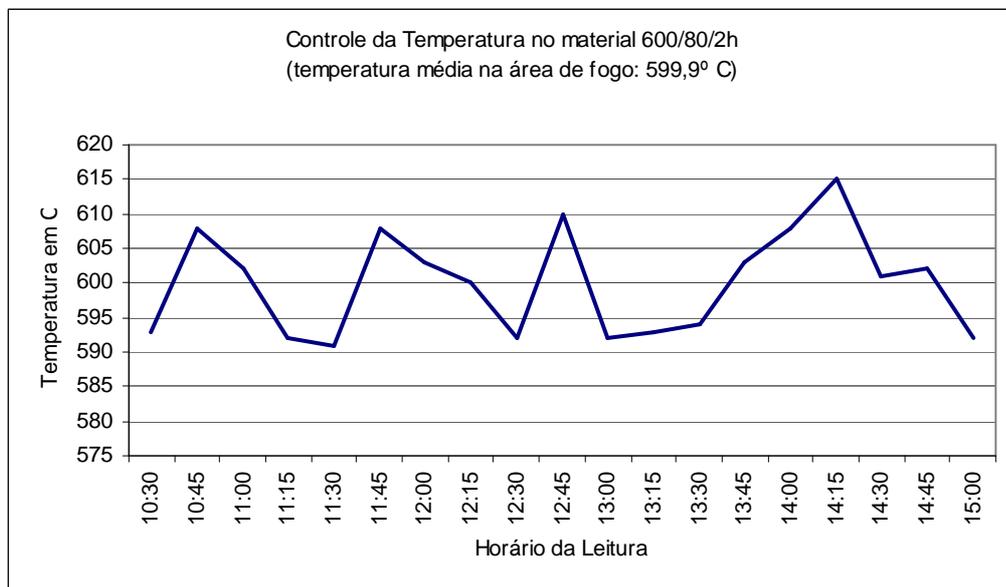
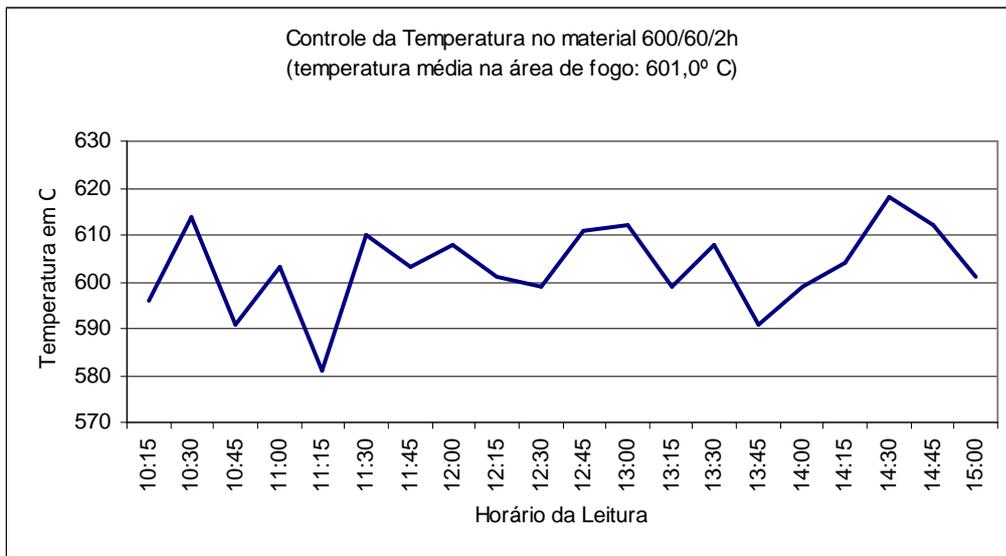
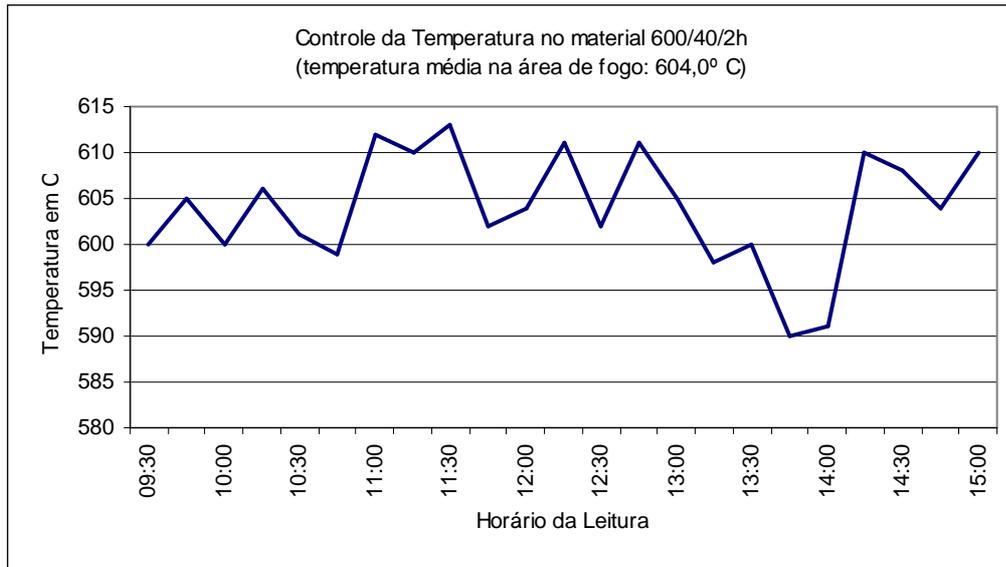


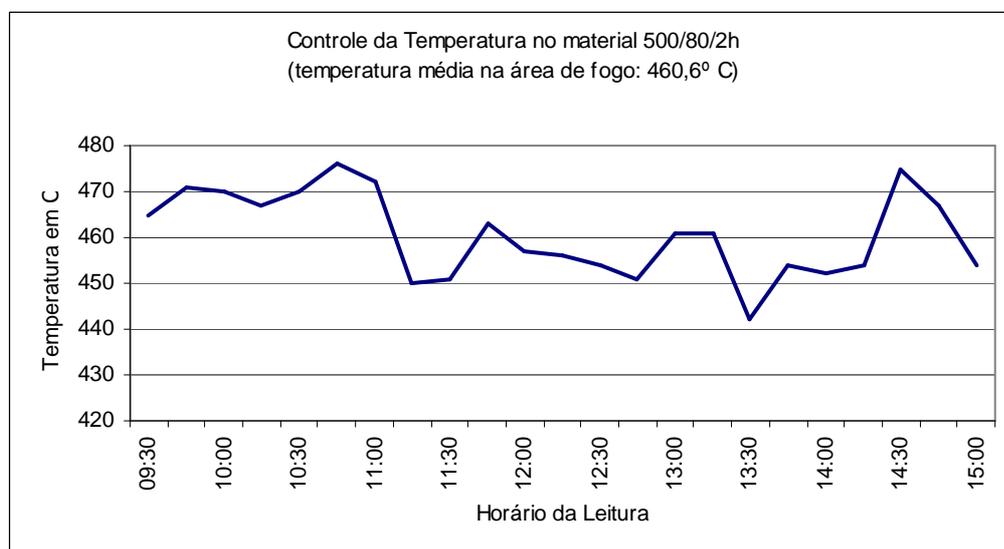
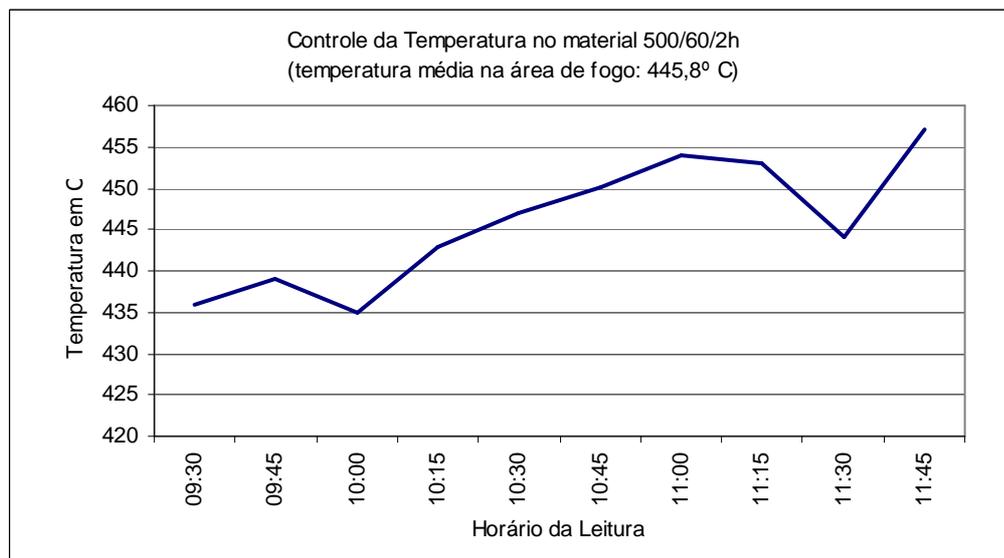
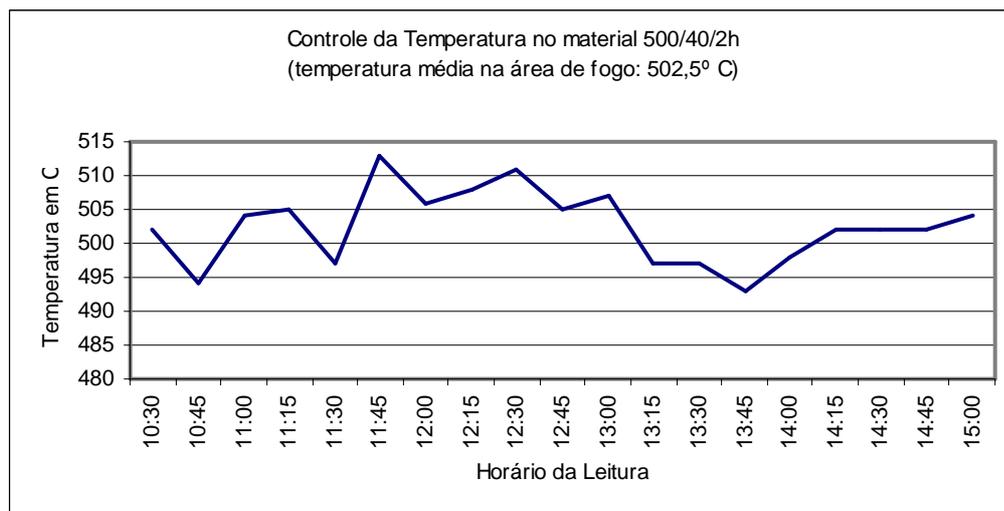












ANEXO III
GRANULOMETRIA A LASER



LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



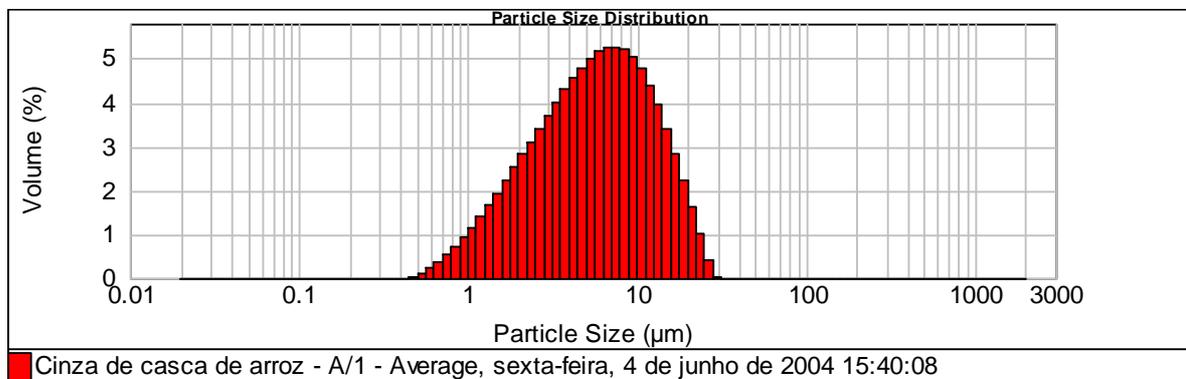
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1317.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 500º/1h**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Silvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Sciocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 12.33 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.812 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0013 %Vol	Span : 2.310	Uniformity: 0.712	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.62 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.708 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 7.133 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 1.670 um		d(0.5): 5.703 um	
		d(0.9): 14.843 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



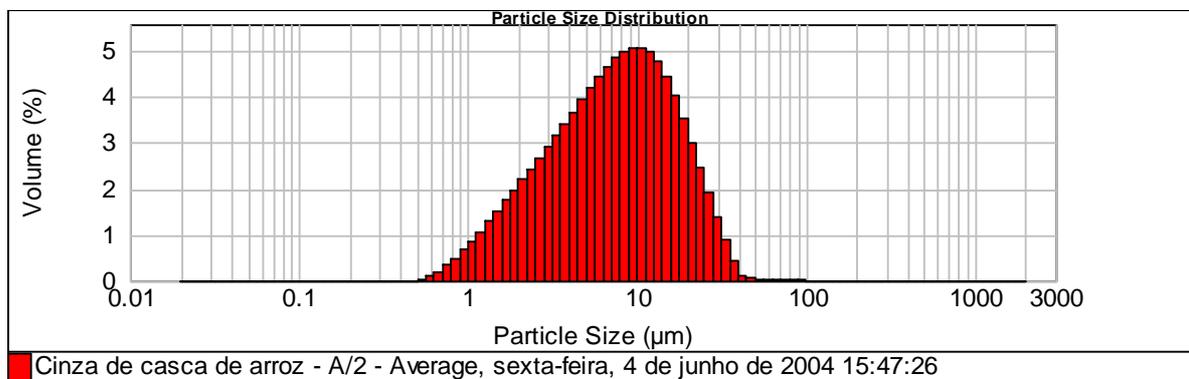
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1318.04

Data de ensaio: 04/06/04
Recebida em: 11/03/2004
INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 500º/1h+3**
REFERÊNCIA/ solicitante: Silvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Sciocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 4.75 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.524 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0006 %Vol	Span : 2.446	Uniformity: 0.766	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.31 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.565 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 9.578 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 1.976 um	d(0.5): 7.459 um		d(0.9): 20.224 um

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



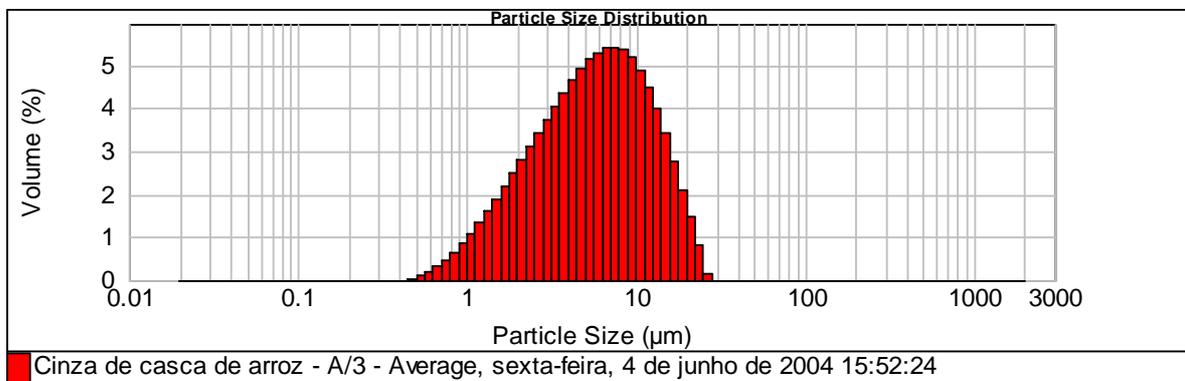
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1319.04

Data de ensaio: 04/06/04
Recebida em: 11/03/2004
INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 500°/2h+3**
REFERÊNCIA/ solicitante: Sílvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Scirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 7.59 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.838 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0008 %Vol	Span : 2.231	Uniformity: 0.687	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.59 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.772 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 7.053 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 1.719 um	d(0.5): 5.725 um	d(0.9): 14.489 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



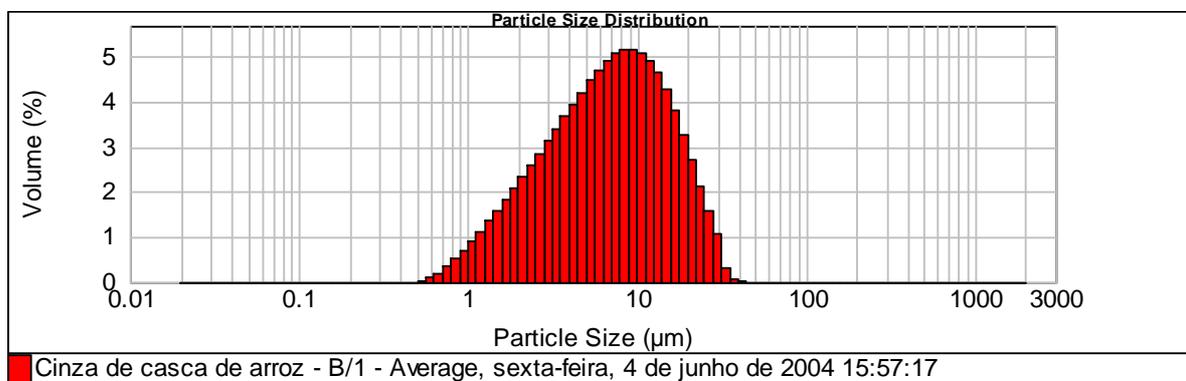
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1320.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 600º/1h**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Sílvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Sciocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 6.08 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.472 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0007 %Vol	Span : 2.387	Uniformity: 0.735	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.37 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.372 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.785 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 1.922 um	d(0.5): 6.957 um	d(0.9): 18.524 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



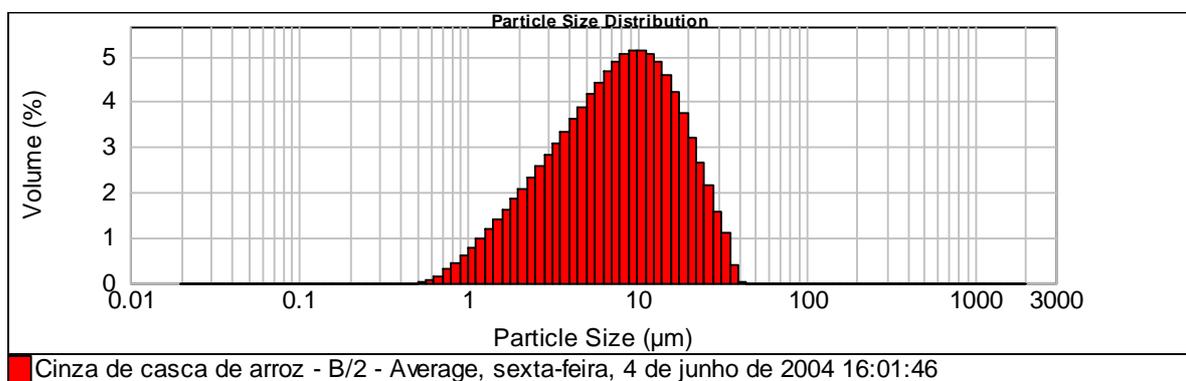
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1321.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 600º/1h+3**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Silvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Sciocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 8.75 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.297 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0012 %Vol	Span : 2.413	Uniformity: 0.743	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.26 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.756 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 9.818 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 2.072 um		d(0.5): 7.761 um	
		d(0.9): 20.801 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



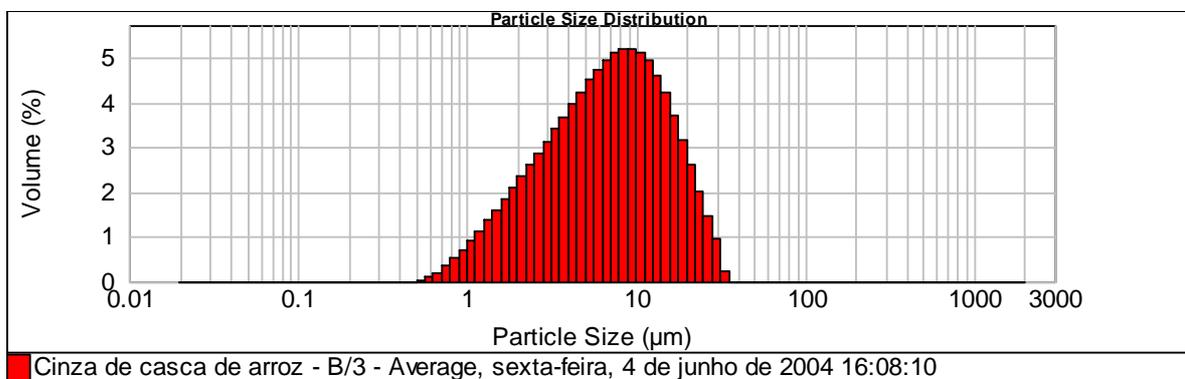
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1322.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 600°/2h+3**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Sílvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Scirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: .469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 4.90 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.487 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0006 %Vol	Span : 2.355	Uniformity: 0.725	Result units: Volume
Specific Surface Area: .38 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.333 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.635 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 1.910 um		d(0.5): 6.880 um	
		d(0.9): 18.114 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



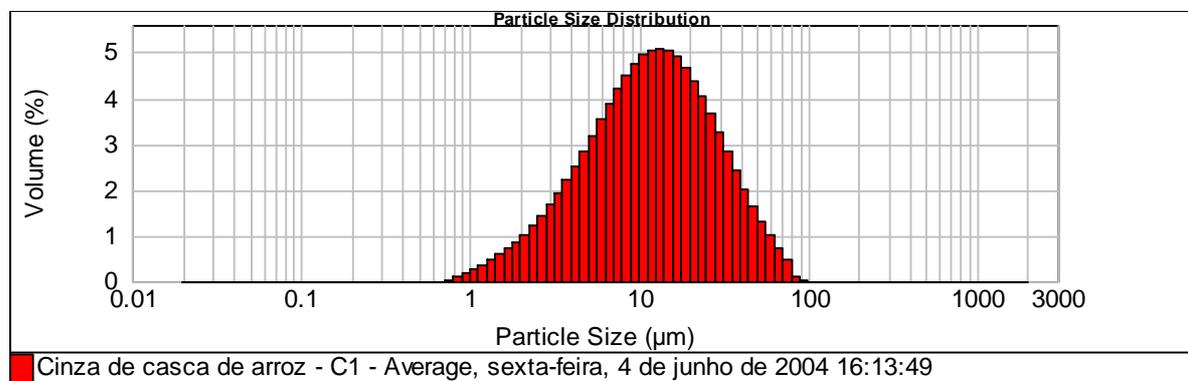
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1323.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 700°/1h**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Sílvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Scirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 4.08 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.218 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0009 %Vol	Span : 2.657	Uniformity: 0.822	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.803 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.473 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 16.200 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 3.390 um	d(0.5): 11.941 um	d(0.9): 35.112 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



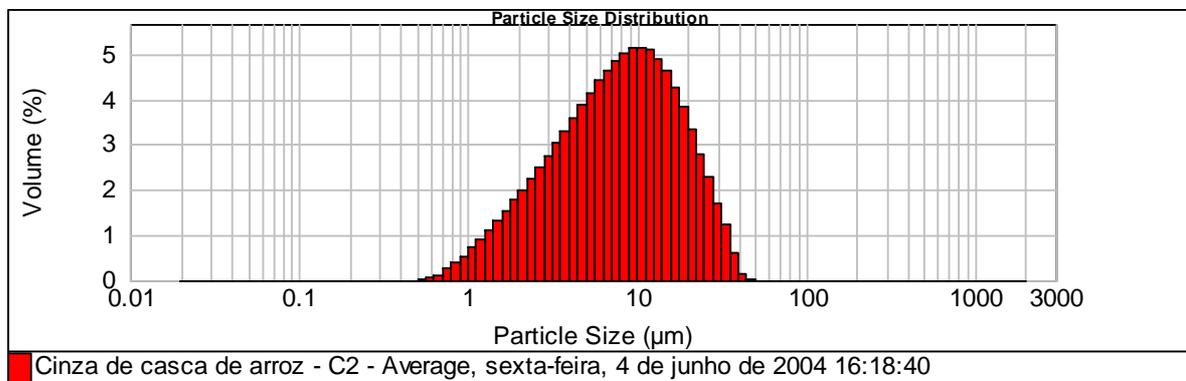
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1324.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 700°/1h+3**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Sílvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Scirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 3.81 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.367 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0005 %Vol	Span : 2.420	Uniformity: 0.744	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.22 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.934 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 10.128 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 2.163 um	d(0.5): 7.974 um	d(0.9): 21.457 um	

2- Representação Gráfica





LABORATÓRIO DE GRANULOMETRIA A LASER
Mastersizer 2000 Líquido e Seco



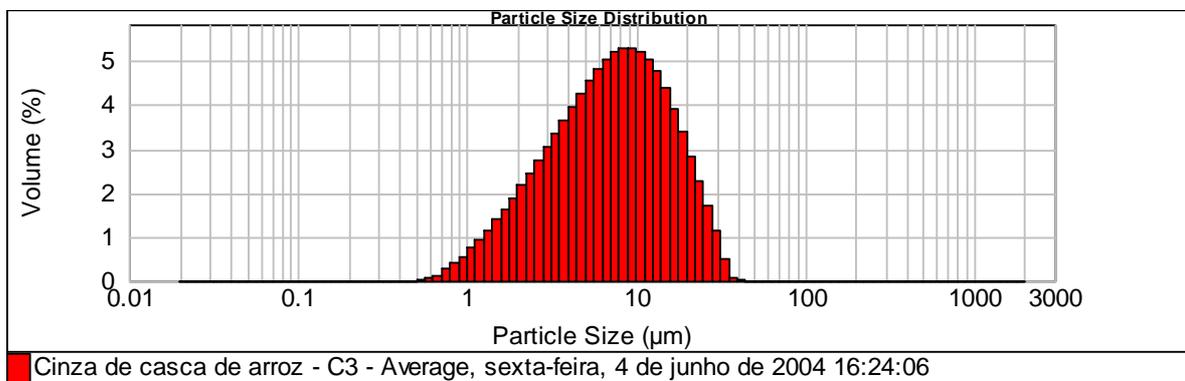
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº VC 1325.04

Data de ensaio: 04/06/04
 Recebida em: 11/03/2004
 INTERESSADO: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI - **Cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono – 700º/2h+3**
 REFERÊNCIA/ solicitante: Silvia Santos

1- Dados Obtidos

Particle Name: Silica (tridymite)	Accessory Name: Sciocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.469	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 6.56 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.353 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0009 %Vol	Span : 2.327	Uniformity: 0.717	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.29 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.663 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 9.079 um	Density: 1.000 g/cm ³
d(0.1): 2.094 um		d(0.5): 7.238 um	
		d(0.9): 18.940 um	

2- Representação Gráfica



ANEXO IV
ARGAMASSAS

ARGAMASSA DE REFERÊNCIA

Referência (M.E. cimento = 3,09 kg/dm³)			
MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	707,60	707,60	707,60
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	212,28	208,87	210,90
aditivo (g)	5,01	4,58	2,01
flow médio (cm)	24,47	23,09	23,53
R1	65,01	62,82	68,47
R2	63,66	62,97	67,13
R3	63,51	60,04	66,11
R média, 28 dias (MPa)	64,34	62,90	67,80

Sílica Ativa (M.E. 2,22 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	650,99	650,99	650,99
sílica ativa - 8%(g)	40,67	40,67	40,67
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	209,50
aditivo (g)	5,01	4,58	2,01
flow médio (cm)	23,58	22,53	24,83
R1	67,37	79,54	71,51
R2	68,78	77,74	72,87
R3	65,49	76,56	67,40
R média, 28 dias (MPa)	68,08	78,64	72,19

CCA IN NATURA – CONDIÇÃO DE MOAGEM 1h**CCA "in natura" - 1h (M.E. 2,138 kg/dm³)**

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	650,99	650,99	650,99
CCA "in natura" 15% (g)	73,44	73,44	73,44
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,66	23,81	23,88
R1	70,72	67,21	60,03
R2	72,50	65,64	56,53
R3	71,41	69,56	65,53
R média, 28 dias (MPa)	71,96	68,39	66,96

CCA IN NATURA – CONDIÇÃO DE MOAGEM 2h**CCA "in natura" - 2h (M.E. 2,19 kg/dm³)**

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	650,99	650,99	650,99
CCA "in natura" 15% (g)	75,31	75,31	75,31
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,660	23,910	24,830
R1	70,98	71,24	73,89
R2	70,43	71,50	71,83
R3	69,80	71,38	72,40
R média, 28 dias (MPa)	70,71	71,37	73,15

ARGAMASSA COM CCA – CONDIÇÃO DE MOAGEM 1h**CCA 800/40 (M.E. 2,283 kg/dm³)**

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	78,42	78,42	78,42
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	208,73
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,95	22,57	24,58
R1	51,04	64,94	78,52
R2	58,89	64,89	72,63
R3	49,86	52,69	66,90
R média, 28 dias (MPa)	54,97	64,92	75,58

CCA 800/60 (M.E. 2,215 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,08	76,08	76,08
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,80	22,87	25,00
R1	61,87	69,88	65,49
R2	67,69	66,82	66,66
R3	65,01	65,56	72,24
R média, 28 dias (MPa)	66,35	68,35	69,45

CCA 800/80 (M.E. 2,241 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,97	76,97	76,97
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,85	24,24	24,81
R1	70,51	69,57	72,24
R2	68,63	63,92	76,64
R3	58,42	43,66	54,18
R média, 28 dias (MPa)	69,57	66,75	74,44

CCA 700/40 (M.E. 2,212 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,98	75,98	75,98
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,67	24,05	24,43
R1	70,98	68,71	77,66
R2	70,98	67,21	63,21
R3	68,47	62,74	62,97
R média, 28 dias (MPa)	70,98	67,96	70,44

CCA 700/60 (M.E. 2,178 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,81	74,81	74,81
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,67	24,63	23,61
R1	75,85	72,71	74,59
R2	74,59	78,28	73,26
R3	63,84	61,64	62,66
R média, 28 dias (MPa)	75,22	75,50	73,93

CCA 700/80 (M.E. 2,183 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,98	74,98	74,98
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,47	23,86	25,00
R1	62,82	67,68	66,51
R2	64,94	61,87	63,92
R3	61,87	61,25	63,52
R média, 28 dias (MPa)	63,88	64,78	65,22

CCA 600/40 (M.E. 2,193 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,32	75,32	75,32
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,81	24,63	23,02
R1	70,12	77,89	78,36
R2	67,76	71,61	69,80
R3	67,06	48,13	65,41
R média, 28 dias (MPa)	68,94	74,75	74,08

CCA 600/60 (M.E. 2,202 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,63	75,63	75,63
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,48	24,16	24,11
R1	70,98	73,34	77,50
R2	69,26	70,43	76,64
R3	68,16	69,02	75,77
R média, 28 dias (MPa)	70,12	71,89	77,07

CCA 600/80 (M.E. 2,201 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,60	75,60	75,60
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,41	24,77	21,14
R1	71,45	75,38	74,58
R2	69,88	73,02	73,02
R3	68,47	72,40	71,76
R média, 28 dias (MPa)	70,67	74,20	73,80

CCA 500/40 (M.E. 2,179 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,85	74,85	74,85
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,24	24,73	24,78
R1	74,52	80,25	79,93
R2	73,65	71,56	77,89
R3	62,66	69,41	70,35
R média, 28 dias (MPa)	74,09	75,91	78,91

CCA 500/60 (M.E. 2,261 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	77,66	77,66	77,66
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,69	23,48	25,00
R1	66,59	72,40	79,38
R2	75,38	73,34	80,80
R3	74,59	69,88	71,06
R média, 28 dias (MPa)	74,99	72,87	80,09

CCA 500/80 (M.E. 2,198kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,50	75,50	75,50
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,13	23,67	23,78
R1	67,92	77,89	73,73
R2	72,87	75,38	81,74
R3	70,67	61,09	76,63
R média, 28 dias (MPa)	71,77	76,64	79,19

ARGAMASSA COM CCA – CONDIÇÃO DE MOAGEM 1h+3**CCA 800/40 (M.E. 2,283 kg/dm³)**

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	78,42	78,42	78,42
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	208,73
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,83	24,09	23,86
R1	71,61	71,61	70,26
R2	70,35	69,02	71,61
R3	69,02	69,94	65,17
R média, 28 dias (MPa)	70,98	70,78	70,94

CCA 800/60 (M.E. 2,215 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,08	76,08	76,08
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,04	24,97	23,51
R1	64,41	66,67	75,65
R2	62,47	66,07	77,68
R3	60,93	68,41	65,96
R média, 28 dias (MPa)	63,44	67,54	76,67

CCA 800/80 (M.E. 2,241 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,97	76,97	76,97
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,66	25,00	24,23
R1	67,82	71,22	72,19
R2	61,72	72,63	78,36
R3	69,57	69,72	76,79
R média, 28 dias (MPa)	68,70	71,93	77,58

CCA 700/40 (M.E. 2,212 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,98	75,98	75,98
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,82	24,74	23,54
R1	66,13	66,59	68,78
R2	68,70	69,12	71,00
R3	65,92	67,68	69,85
R média, 28 dias (MPa)	67,42	68,40	70,43

CCA 700/60 (M.E. 2,178 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,81	74,81	74,81
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,77	24,70	23,65
R1	66,89	66,62	69,71
R2	64,62	62,97	67,66
R3	51,67	66,67	55,12
R média, 28 dias (MPa)	65,76	66,65	68,69

CCA 700/80 (M.E. 2,183 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,98	74,98	74,98
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,78	24,75	24,44
R1	68,77	72,08	73,02
R2	68,84	69,02	75,14
R3	65,96	68,72	73,26
R média, 28 dias (MPa)	68,81	70,55	74,20

CCA 600/40 (M.E. 2,193 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,32	75,32	75,32
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,66	24,14	23,40
R1	69,47	67,92	72,40
R2	67,61	67,92	70,23
R3	66,85	66,27	72,40
R média, 28 dias (MPa)	68,54	67,92	72,40

CCA 600/60 (M.E. 2,202 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,63	75,63	75,63
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,63	24,77	23,62
R1	68,71	77,00	72,73
R2	67,07	74,99	73,34
R3	69,02	73,37	74,12
R média, 28 dias (MPa)	68,87	76,00	73,73

CCA 600/80 (M.E. 2,201 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,60	75,60	75,60
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,96	24,34	24,83
R1	72,90	70,57	81,43
R2	73,43	69,97	80,80
R3	70,43	71,89	79,15
R média, 28 dias (MPa)	73,17	71,23	81,12

CCA 500/40 (M.E. 2,179 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	74,85	74,85	74,85
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,90	24,78	24,42
R1	64,07	72,08	74,43
R2	71,77	72,40	70,59
R3	70,77	71,53	73,34
R média, 28 dias (MPa)	71,27	72,24	73,89

CCA 500/60 (M.E. 2,261 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	77,66	77,66	77,66
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,98	24,00	22,80
R1	70,90	74,59	72,71
R2	73,34	67,13	69,80
R3	73,89	73,50	72,80
R média, 28 dias (MPa)	73,62	74,05	72,76

CCA 500/80 (M.E. 2,198kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,50	75,50	75,50
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,75	24,88	23,90
R1	63,57	72,00	77,45
R2	64,89	70,51	75,38
R3	62,73	73,55	76,05
R média, 28 dias (MPa)	64,23	72,78	76,75

ARGAMASSA COM CCA – CONDIÇÃO DE MOAGEM 2h+3**CCA 800/40 (M.E. 2,307kg/dm³)**

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	79,27	79,27	79,27
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,73	208,73
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,15	24,79	22,51
R1	66,07	70,22	66,62
R2	63,52	69,92	68,16
R3	68,88	67,06	67,37
R média, 28 dias (MPa)	67,48	70,07	67,77

CCA 800/60 (M.E.2,215 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,08	76,08	76,08
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,95	24,86	24,92
R1	73,94	75,69	73,64
R2	75,68	74,05	75,02
R3	75,85	75,84	75,06
R média, 28 dias (MPa)	75,77	74,77	75,04

CCA 800/80 (M.E. 2,2117 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	72,72	72,72	72,72
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,04	24,68	24,60
R1	72,75	77,61	73,85
R2	72,79	73,96	74,09
R3	74,10	79,13	70,03
R média, 28 dias (MPa)	73,45	78,37	73,97

CCA 700/40 (M.E.2,290 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	78,66	78,66	78,66
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,53	24,66	25,03
R1	70,15	80,88	79,31
R2	74,06	78,91	78,37
R3	75,36	75,38	80,38
R média, 28 dias (MPa)	74,71	79,90	79,85

CCA 700/60 (M.E.2,260 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	77,62	77,62	77,62
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,75	24,89	24,28
R1	74,59	77,66	73,26
R2	74,59	75,91	80,17
R3	72,00	77,03	82,68
R média, 28 dias (MPa)	74,59	77,35	81,43

CCA 700/80 (M.E.2,27 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	77,97	77,97	77,97
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,21	25,20	24,79
R1	70,35	72,70	83,70
R2	65,72	73,40	81,82
R3	71,61	72,90	81,43
R média, 28 dias (MPa)	70,98	73,15	82,76

CCA 600/40 (M.E.2,24 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,94	76,94	76,94
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,97	24,31	24,15
R1	78,21	80,40	77,66
R2	77,40	84,96	78,36
R3	75,86	84,17	79,62
R média, 28 dias (MPa)	77,81	84,57	78,99

CCA 600/60 (M.E.2,21 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,90	75,90	75,90
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	8,00	3,00
flow médio (cm)	24,14	24,70	23,55
R1	67,96	69,75	75,92
R2	69,60	73,05	71,25
R3	64,42	72,03	75,92
R média, 28 dias (MPa)	68,78	72,54	75,92

CCA 600/80 (M.E.2,20 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	75,56	75,56	75,56
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	23,04	24,82	23,27
R1	69,75	72,56	77,15
R2	66,85	74,55	75,32
R3	71,74	73,68	74,31
R média, 28 dias (MPa)	70,75	74,12	76,24

CCA 500/40 (M.E.2,27 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	78,00	78,00	78,00
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,80	23,89	23,62
R1	72,08	78,71	85,82
R2	74,65	77,50	78,36
R3	76,26	71,61	84,00
R média, 28 dias (MPa)	75,46	78,11	84,91

CCA 500/60 (M.E.2,25 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	77,28	77,28	77,28
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	22,97	24,97	23,55
R1	73,28	78,91	80,56
R2	71,06	79,15	78,89
R3	68,93	72,14	79,31
R média, 28 dias (MPa)	72,17	79,03	79,94

CCA 500/80 (M.E.2,24 kg/dm³)

MATERIAL	R1000	R2000 - B	G51
cimento (g)	601,46	601,46	601,46
CCA 15% (g)	76,94	76,94	76,94
areia fina (g)	175,40	175,40	175,40
areia média (g)	701,60	701,60	701,60
água (g)	208,54	208,54	209,50
aditivo (g)	9,50	9,16	3,00
flow médio (cm)	24,95	24,55	23,58
R1	68,72	77,32	73,63
R2	68,49	73,50	75,40
R3	68,98	77,66	69,33
R média, 28 dias (MPa)	68,85	77,49	74,52

ANEXO V
SELEÇÃO DO MELHOR MATERIAL – TESTE DE DUNCAN

		500			600			700			800		
		1h	1h+3	2h+3									
R 1000	40	72,87	63,57	68,72	71,45	72,90	69,75	62,82	68,77	70,35	70,51	67,82	74,10
		70,67	64,89	68,98	69,88	73,43	71,74	64,94	68,84	71,61	68,63	69,57	72,79
	60	75,38	73,34	73,28	70,98	68,71	67,96	75,85	66,89	74,59	67,69	64,41	75,68
		74,59	73,89	71,06	69,26	69,02	69,60	74,59	64,62	74,59	65,01	62,47	75,85
	80	73,65	71,77	74,65	70,12	69,47	78,21	70,98	66,13	74,06	51,04	71,61	66,07
		74,52	70,77	76,26	67,76	67,61	77,40	70,98	68,70	75,36	58,89	70,35	68,88
R 2000 B	40	77,89	72,00	77,32	75,38	70,57	74,55	67,68	72,08	73,40	69,57	71,22	77,61
		75,38	73,55	77,66	73,02	71,89	73,68	61,87	69,02	72,90	63,92	72,63	79,13
	60	80,25	72,08	78,71	77,89	67,92	84,96	68,71	69,12	80,88	64,94	71,61	70,22
		71,56	72,40	77,50	71,61	67,92	84,17	67,21	67,68	78,91	64,89	69,90	69,92
	80	72,40	74,59	78,91	73,34	77,00	73,05	72,71	62,97	77,66	69,88	66,67	75,69
		73,34	73,50	79,15	70,43	74,99	72,03	78,28	66,67	77,03	66,82	68,41	75,84
G51	40	81,74	77,45	73,63	74,58	81,43	77,15	66,51	75,14	83,70	72,24	78,36	73,85
		76,63	76,05	75,40	73,02	80,80	75,32	63,92	73,26	81,82	76,64	76,79	74,09
	60	79,38	72,71	80,56	77,50	73,34	75,92	74,59	69,71	80,17	66,66	75,65	75,02
		80,80	73,80	79,31	76,64	74,12	75,92	73,26	67,66	82,68	72,24	77,68	75,06
	80	79,93	74,43	85,82	78,36	78,36	78,36	77,66	71,00	79,31	78,52	70,26	68,16
		77,89	73,34	84,00	69,80	72,40	79,62	63,21	69,85	80,38	72,63	71,61	67,37

Fixando R1000 e TM=1h

	500	600	700	800
	72,87	71,45	62,82	70,51
	70,67	69,88	64,94	68,63
	75,38	70,98	75,85	67,69
	74,59	69,26	74,59	65,01
	73,65	70,12	70,98	51,04
	74,52	67,76	70,98	58,89

média	73,61	69,91	70,03	63,63
S.j	1,680127	1,311982	5,1838814	7,371541
n.j	6	6	6	6
T.j	441,68	419,45	420,16	381,77
X..	69,29			
T..	1663,06			
N	24			
K	4			

m. ordem	63,63	69,91	70,03	73,61
MQR	21,439092			
Scom	4,6302367			
Sx	2,3151183			
GDL	20			

grupos		2	3	4
rk		2,95	3,58	3,96
RK		6,8295991	8,2881236	9,1678686

X4-X3	3,59	não difere	6,8295991
X4-x2	3,71	não difere	8,2881236
X4-x1	9,99	difere	9,1678686
x3-x2	0,12	não difere	6,8295991
x3-x1	6,40	não difere	8,2881236
x2-x1	6,28	não difere	6,8295991

Fixando R1000 e TM=1h+3

	500	600	700	800
	63,57	72,90	68,77	67,82
	64,89	73,43	68,84	69,57
	73,34	68,71	66,89	64,41
	73,89	69,02	64,62	62,47
	71,77	69,47	66,13	71,61
	70,77	67,61	68,70	70,35

	69,71	70,19	67,33	67,71
	4,4033703	2,3906401	1,74402695	3,5776738
	6	6	6	6
	418,23	421,14	403,95	406,23
	68,73			
	1649,55			
	24			
	4			

	67,33	67,71	69,71	70,19
	10,236553			
	3,1994613			
	1,5997306			
	20			

		2	3	4
		2,95	3,58	3,96
		4,7192054	5,7270357	6,3349333

X4-X3	0,48	não difere	4,7192054
X4-x2	2,49	não difere	5,7270357
X4-x1	2,86	não difere	6,3349333
x3-x2	2,00	não difere	4,7192054
x3-x1	2,38	não difere	5,7270357
x2-x1	0,38	não difere	4,7192054

Fixando R1000 e TM=2h+3

	500	600	700	800
	68,72	69,75	70,35	74,10
	68,98	71,74	71,61	72,79
	73,28	67,96	74,59	75,68
	71,06	69,60	74,59	75,85
	74,65	78,21	74,06	66,07
	76,26	77,40	75,36	68,88

	72,16	72,44	73,43	72,23
	3,0796261	4,3302779	1,98049152	3,949315975
	6	6	6	6
	432,95	434,66	440,56	433,37
	72,56			
	1741,54			
	24			
	4			

	72,16	72,23	72,44	73,43
	11,938712			
	3,4552441			
	1,727622			
	20			

		2	3	4
		2,95	3,58	3,96
		5,096485	6,1848869	6,84138328

X4-X3	0,98	não difere	5,096485021
X4-x2	1,20	não difere	6,184886907
X4-x1	1,27	não difere	6,841383282
x3-x2	0,22	não difere	5,096485021
x3-x1	0,29	não difere	6,184886907
x2-x1	0,07	não difere	5,096485021

Fixando R2000 e TM=1h

	500	600	700	800
	77,89	75,38	67,68	69,57
	75,38	73,02	61,87	63,92
	80,25	77,89	68,71	64,94
	71,56	71,61	67,21	64,89
	72,40	73,34	72,71	69,88
	73,34	70,43	78,28	66,82

média	75,14	73,61	69,41	66,67
S.j	3,385148	2,6827107	5,5631178	2,547956
n.j	6	6	6	6
T.j	450,82	441,67	416,46	400,02
X..	71,21			
T..	1708,97			
N	24			
K	4			

m. ordem	66,67	69,41	73,61	75,14
MQR	14,024131			
Scom	3,7448806			
Sx	1,8724403			
GDL	20			

grupos		2	3	4
rk		2,95	3,58	3,96
RK		5,5236989	6,7033363	7,4148636

X4-X3	1,53	não difere	5,5236989
X4-x2	5,73	não difere	6,7033363
X4-x1	8,47	difere	7,4148636
x3-x2	4,20	não difere	5,5236989
x3-x1	6,94	difere	6,7033363
x2-x1	2,74	não difere	5,5236989

Fixando R2000 e TM=1h+3

	500	600	700	800
	72,00	70,57	72,08	71,22
	73,55	71,89	69,02	72,63
	72,08	67,92	69,12	71,61
	72,40	67,92	67,68	69,90
	74,59	77,00	62,97	66,67
	73,50	74,99	66,67	68,41

	73,02	71,72	67,92	70,07
	1,0280661	3,7095161	3,03572506	2,2177526
	6	6	6	6
	438,12	430,29	407,54	420,44
	70,68			
	1696,39			
	24			
	4			

	67,92	70,07	71,72	73,02
	7,2378708			
	2,6903291			
	1,3451646			
	20			

		2	3	4
		2,95	3,58	3,96
		3,9682355	4,81568914	5,3268517

X4-X3	1,30	não difere	3,9682355
X4-x2	2,95	não difere	4,8156891
X4-x1	5,10	não difere	5,3268517
x3-x2	1,64	não difere	3,9682355
x3-x1	3,79	não difere	4,8156891
x2-x1	2,15	não difere	3,9682355

Fixando R2000 e TM=2h+3

	500	600	700	800
	77,32	74,55	73,40	77,61
	77,66	73,68	72,90	79,13
	78,71	84,96	80,88	70,22
	77,50	84,17	78,91	69,92
	78,91	73,05	77,66	75,69
	79,15	72,03	77,03	75,84

	78,21	77,07	76,80	74,74
	0,8027806	5,8662856	3,11964528	3,828423958
	6	6	6	6
	469,25	462,44	460,78	448,41
	76,70			
	1840,88			
	24			
	4			

	74,74	76,80	77,07	78,21
	14,861695			
	3,8550869			
	1,9275434			
	20			

		2	3	4
		2,95	3,58	3,96
		5,6862532	6,9006055	7,63307206

X4-X3	1,135	não difere	5,686253176
X4-x2	1,41	não difere	6,900605549
X4-x1	3,47	não difere	7,63307206
x3-x2	0,28	não difere	5,686253176
x3-x1	2,34	não difere	6,900605549
x2-x1	2,06	não difere	5,686253176

Fixando G51 e TM=1h

	500	600	700	800
	81,74	74,58	66,51	72,24
	76,63	73,02	63,92	76,64
	79,38	77,50	74,59	66,66
	80,80	76,64	73,26	72,24
	79,93	78,36	77,66	78,52
	77,89	69,80	63,21	72,63

média	79,40	74,98	69,86	73,16
S.j	1,8798803	3,2051313	6,0910013	4,1246467
n.j	6	6	6	6
T.j	476,37	449,90	419,15	438,93
X..	74,35			
T..	1784,35			
N	24			
K	4			

m. ordem	69,86	73,16	74,98	79,40
MQR	16,979956			
Scom	4,1206742			
Sx	2,0603371			
GDL	20			

grupos		2	3	4
rk		2,95	3,58	3,96
RK		6,0779944	7,3760068	8,1589349

X4-X3	4,41	não difere	6,0779944
X4-x2	6,24	não difere	7,3760068
X4-x1	9,54	difere	8,1589349
x3-x2	1,83	não difere	6,0779944
x3-x1	5,13	não difere	7,3760068
x2-x1	3,30	não difere	6,0779944

Fixando G51 e TM=1h+3

	500	600	700	800
	77,45	81,43	75,14	78,36
	76,05	80,80	73,26	76,79
	72,71	73,34	69,71	75,65
	73,80	74,12	67,66	77,68
	74,43	78,36	71,00	70,26
	73,34	72,40	69,85	71,61

média	74,63	76,74	71,10	75,06
S.j	1,7915468	3,9588908	2,69537876	3,3477719
n.j	6	6	6	6
T.j	447,78	460,45	426,62	450,35
X..	74,38			
T..	1785,20			
N	24			
K	4			

m. ordem	71,10	74,63	75,06	76,74
MQR	9,338775			
Scom	3,0559409			
Sx	1,5279705			
GDL	20			

grupos		2	3	4
rk		2,95	3,58	3,96
RK		4,5075129	5,47013427	6,0507631

X4-X3	1,68	não difere	4,5075129
X4-x2	2,11	não difere	5,4701343
X4-x1	5,64	não difere	6,0507631
x3-x2	0,43	não difere	4,5075129
x3-x1	3,96	não difere	5,4701343
x2-x1	3,53	não difere	4,5075129

Fixando G51 e TM=2h+3

	500	600	700	800
	73,63	77,15	83,70	73,85
	75,40	75,32	81,82	74,09
	80,56	75,92	80,17	75,02
	79,31	75,92	82,68	75,06
	85,82	78,36	79,31	68,16
	84,00	79,62	80,38	67,37

média	79,79	77,05	81,34	72,26
S.j	4,7355239	1,6659942	1,67373435	3,522972703
n.j	6	6	6	6
T.j	478,72	462,29	488,06	433,55
X..	77,61			
T..	1862,62			
N	24			
K	4			

m. ordem	72,26	77,05	79,79	81,34
MQR	10,103362			
Scom	3,1785786			
Sx	1,5892893			
GDL	20			

grupos		2	3	4
rk		2,95	3,58	3,96
RK		4,6884034	5,6896556	6,29358555

X4-X3	1,56	não difere	4,688403377
X4-x2	4,30	não difere	5,689655624
X4-x1	9,09	difere	6,29358555
x3-x2	2,74	não difere	4,688403377
x3-x1	7,53	difere	5,689655624
x2-x1	4,79	difere	4,688403377

Fixando temperatura 500 e TM=1h

R1000	R2000	G51
72,87	77,89	81,74
70,67	75,38	76,63
75,38	80,25	79,38
74,59	71,56	80,80
73,65	72,40	79,93
74,52	73,34	77,89

média	73,61	75,14	79,40
S.j	1,680127	3,385148	1,8798803
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	441,68	450,82	476,37
X..	76,05	77,27	79,40
T..	1368,87		
N	18		
K	3		
m. ordem	73,61	75,14	79,40
MQR	5,9386678		
Scom	2,4369382		
Sx	1,4069669		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		4,2349704	5,1635686

x3-x2	4,26	difere	4,2349704
x3-x1	5,78	difere	5,1635686
x2-x1	1,52	não difere	4,2349704

Fixando temperatura 500 e TM=1h+3

R1000	R2000	G51
63,57	72,00	77,45
64,89	73,55	76,05
73,34	72,08	72,71
73,89	72,40	73,80
71,77	74,59	74,43
70,77	73,50	73,34

média	69,71	73,02	74,63
S.j	4,4033703	1,0280661	1,7915468
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	418,23	438,12	447,78
X..	72,45		
T..	1304,13		
N	18		
K	3		
m. ordem	69,71	73,02	74,63
MQR	7,88541		
Scom	2,8080972		
Sx	1,6212557		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		4,8799796	5,9500084

x3-x2	1,61	não difere	4,8799796
x3-x1	4,93	não difere	5,9500084
x2-x1	3,32	não difere	4,8799796

Fixando temperatura 500 e TM=2h+3

R1000	R2000	G51
68,72	77,32	73,63
68,98	77,66	75,40
73,28	78,71	80,56
71,06	77,50	79,31
74,65	78,91	85,82
76,26	79,15	84,00

média	72,16	78,21	79,79
S.j	3,0796261	0,8027806	4,7355239
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	432,95	469,25	478,72
X..	76,72		
T..	1380,92		
N	18		
K	3		
m. ordem	72,16	78,21	79,79
MQR	10,851247		
Scom	3,294123		
Sx	1,9018628		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		5,7246071	6,9798366

x3-x2	1,58	não difere	5,724607117
x3-x1	7,63	difere	6,979836584
x2-x1	6,05	difere	5,724607117

Fixando temperatura 600 e TM=1h

R1000	R2000	G51
71,45	75,38	74,58
69,88	73,02	73,02
70,98	77,89	77,50
69,26	71,61	76,64
70,12	73,34	78,36
67,76	70,43	69,80

média	69,91	73,61	74,98
S.j	1,311982	2,6827107	3,2051313
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	419,45	441,67	449,90
X..	72,83	74,30	74,98
T..	1311,02		
N	18		
K	3		
m. ordem	69,91	73,61	74,98
MQR	6,3970333		
Scom	2,5292357		
Sx	1,4602549		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		4,3953673	5,3591356

x3-x2	1,37	não difere	4,3953673
x3-x1	5,08	não difere	5,3591356
x2-x1	3,70	não difere	4,3953673

Fixando temperatura 600 e TM=1h+3

R1000	R2000	G51
72,90	70,57	81,43
73,43	71,89	80,80
68,71	67,92	73,34
69,02	67,92	74,12
69,47	77,00	78,36
67,61	74,99	72,40

média	70,19	71,72	76,74
S.j	2,3906401	3,7095161	3,9588908
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	421,14	430,29	460,45
X..	72,88		
T..	1311,88		
N	18		
K	3		
m. ordem	70,19	71,72	76,74
MQR	11,716162		
Scom	3,422888		
Sx	1,9762053		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		5,948378	7,2526735

x3-x2	5,03	não difere	5,948378
x3-x1	6,55	não difere	7,2526735
x2-x1	1,53	não difere	5,948378

Fixando temperatura 600 e TM=2h+3

R1000	R2000	G51
69,75	74,55	77,15
71,74	73,68	75,32
67,96	84,96	75,92
69,60	84,17	75,92
78,21	73,05	78,36
77,40	72,03	79,62

média	72,44	77,07	77,05
S.j	4,3302779	5,8662856	1,6659942
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	434,66	462,44	462,29
X..	75,52		
T..	1359,39		
N	18		
K	3		
m. ordem	72,44	77,05	77,07
MQR	18,646717		
Scom	4,3181844		
Sx	2,4931049		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		7,5042459	9,1496951

x3-x2	0,03	não difere	7,504245858
x3-x1	4,63	não difere	9,149695115
x2-x1	4,61	não difere	7,504245858

Fixando temperatura 700 e TM=1h

R1000	R2000	G51
62,82	67,68	66,51
64,94	61,87	63,92
75,85	68,71	74,59
74,59	67,21	73,26
70,98	72,71	77,66
70,98	78,28	63,21

média	70,03	69,41	69,86
S.j	5,1838814	5,5631178	6,0910013
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	420,16	416,46	419,15
X..	69,77	69,63	69,86
T..	1255,77		
N	18		
K	3		
m. ordem	69,41	69,86	70,03
MQR	31,640401		
Scom	5,6249801		
Sx	3,2475838		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		9,7752272	11,918632

x3-x2	0,17	não difere	9,7752272
x3-x1	0,62	não difere	11,918632
x2-x1	0,45	não difere	9,7752272

Fixando temperatura 700 e TM=1h+3

R1000	R2000	G51
68,77	72,08	75,14
68,84	69,02	73,26
66,89	69,12	69,71
64,62	67,68	67,66
66,13	62,97	71,00
68,70	66,67	69,85

média	67,33	67,92	71,10
S.j	1,7440269	3,0357251	2,6953788
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	403,95	407,54	426,62
X..	68,78		
T..	1238,11		
N	18		
K	3		
m. ordem	67,33	67,92	71,10
MQR	6,5074411		
Scom	2,5509687		
Sx	1,4728024		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		4,4331354	5,405185

x3-x2	3,18	não difere	4,4331354
x3-x1	3,78	não difere	5,405185
x2-x1	0,60	não difere	4,4331354

Fixando temperatura 700 e TM=2h+3

R1000	R2000	G51
70,35	73,40	83,70
71,61	72,90	81,82
74,59	80,88	80,17
74,59	78,91	82,68
74,06	77,66	79,31
75,36	77,03	80,38

média	73,43	76,80	81,34
S.j	1,9804915	3,1196453	1,6737343
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	440,56	460,78	488,06
X..	77,19		
T..	1389,40		
N	18		
K	3		
m. ordem	73,43	76,80	81,34
MQR	5,4853067		
Scom	2,3420732		
Sx	1,3521966		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		4,0701117	4,9625614

x3-x2	4,55	difere	4,070111666
x3-x1	7,92	difere	4,962561401
x2-x1	3,37	não difere	4,070111666

Fixando temperatura 800 e TM=1h

R1000	R2000	G51
70,51	69,57	72,24
68,63	63,92	76,64
67,69	64,94	66,66
65,01	64,89	72,24
51,04	69,88	78,52
58,89	66,82	72,63

média	63,63	66,67	73,16
S.j	7,371541	2,547956	4,1246467
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	381,77	400,02	438,93
X..	67,82	69,91	73,16
T..	1220,72		
N	18		
K	3		

m. ordem	63,63	66,67	73,16
MQR	25,948136		
Scom	5,0939312		
Sx	2,9409826		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		8,8523576	10,793406

x3-x2	6,48	não difere	8,8523576
x3-x1	9,53	não difere	10,793406
x2-x1	3,04	não difere	8,8523576

Fixando temperatura 800 e TM=1h+3

R1000	R2000	G51
67,82	71,22	78,36
69,57	72,63	76,79
64,41	71,61	75,65
62,47	69,90	77,68
71,61	66,67	70,26
70,35	68,41	71,61

média	67,71	70,07	75,06
S.j	3,5776738	2,2177526	3,3477719
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	406,23	420,44	450,35
X..	70,95		
T..	1277,02		
N	18		
K	3		

m. ordem	67,71	70,07	75,06
MQR	9,6419178		
Scom	3,1051438		
Sx	1,7927556		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		5,3961943	6,579413

x3-x2	4,99	não difere	5,3961943
x3-x1	7,35	difere	6,579413
x2-x1	2,37	não difere	5,3961943

Fixando temperatura 800 e TM=2h+3

R1000	R2000	G51
74,10	77,61	73,85
72,79	79,13	74,09
75,68	70,22	75,02
75,85	69,92	75,06
66,07	75,69	68,16
68,88	75,84	67,37

média	72,23	74,74	72,26
S.j	3,949316	3,828424	3,5229727
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	433,37	448,41	433,55
X..	73,07		
T..	1315,33		
N	18		
K	3		

m. ordem	72,23	72,26	74,74
MQR	14,221754		
Scom	3,7711741		
Sx	2,1772884		
GDL	15		

grupos		2	3
rk		3,01	3,67
RK		6,5536381	7,9906485

x3-x2	2,48	não difere	6,55363811
x3-x1	2,51	não difere	7,99064846
x2-x1	0,03	não difere	6,55363811

Fixando temperatura 500 e aditivo R1000

1h	1h+3	2h+3
72,87	63,57	68,72
70,67	64,89	68,98
75,38	73,34	73,28
74,59	73,89	71,06
73,65	71,77	74,65
74,52	70,77	76,26

média	73,61	69,71	72,16
S.j	1,680127	4,40337	3,0796261
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	441,68	418,23	432,95
X..	71,83	70,93	72,16
T..	1292,86		
N	18		
K	3		
m. ordem	69,71	72,16	73,61
MQR	10,565531		
Scom	3,2504663		
Sx	1,8766576		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	5,648739	6,8873333	7,656763

x3-x2	1,46	não difere	5,648739
x3-x1	3,91	não difere	6,887333
x2-x1	2,45	não difere	5,648739

Fixando temperatura 600 e aditivo R1000

1h	1h+3	2h+3
71,45	72,90	69,75
69,88	73,43	71,74
70,98	68,71	67,96
69,26	69,02	69,60
70,12	69,47	78,21
67,76	67,61	77,40

média	69,91	70,19	72,44
S.j	1,311982	2,39064	4,3302779
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	419,45	421,14	434,66
X..	70,85		
T..	1275,25		
N	18		
K	3		
m. ordem	69,91	70,19	72,44
MQR	8,729254		
Scom	2,954531		
Sx	1,705799		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	5,134456	6,260284	6,95966142

x3-x2	2,25	não difere	5,134456
x3-x1	2,54	não difere	6,260284
x2-x1	0,28	não difere	5,134456

Fixando temperatura 700 e aditivo R 1000

1h	1h+3	2h+3
62,82	68,77	70,35
64,94	68,84	71,61
75,85	66,89	74,59
74,59	64,62	74,59
70,98	66,13	74,06
70,98	68,70	75,36

média	70,03	67,33	73,43
S.j	5,183881	1,744027	1,98049152
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	420,16	403,95	440,56
X..	70,26		
T..	1264,67		
N	18		
K	3		
m. ordem	67,33	70,03	73,43
MQR	11,27887		
Scom	3,358403		
Sx	1,938975		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	5,836314	7,116037	7,91101647

x3-x2	3,40	não difere	5,836314
x3-x1	6,10	não difere	7,116037
x2-x1	2,70	não difere	5,836314

Fixando temperatura 800 e aditivo R1000

R1000	R2000	G51
70,51	67,82	74,10
68,63	69,57	72,79
67,69	64,41	75,68
65,01	62,47	75,85
51,04	71,61	66,07
58,89	70,35	68,88

média	63,63	67,71	72,23
S.j	7,371541	3,577674	3,94931597
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	381,77	406,23	433,37
X..	67,85		
T..	1221,37		
N	18		
K	3		
m. ordem	63,63	67,71	72,23
MQR	27,57882		
Scom	5,251554		
Sx	3,031986		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	9,126278	11,12739	12,3705037

x3-x2	4,52	não difere	9,1262785
x3-x1	8,60	não difere	11,127389
x2-x1	4,08	não difere	9,1262785

Fixando temperatura 500 e aditivo R2000

1h	1h+3	2h+3
77,89	72,00	77,32
75,38	73,55	77,66
80,25	72,08	78,71
71,56	72,40	77,50
72,40	74,59	78,91
73,34	73,50	79,15

média	75,14	73,02	78,21
S.j	3,385148	1,028066	0,8027806
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	450,82	438,12	469,25
X..	75,46	75,61	78,21
T..	1358,19		
N	18		
K	3		

m. ordem	73,02	75,14	78,21
MQR	4,3868678		
Scom	2,0944851		
Sx	1,2092515		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	3,639847	4,4379531	4,933746

x3-x2	3,07	não difere	3,639847
x3-x1	5,19	difere	4,437953
x2-x1	2,12	não difere	3,639847

Fixando temperatura 600 e aditivo R2000

1h	1h+3	2h+3
75,38	70,57	74,55
73,02	71,89	73,68
77,89	67,92	84,96
71,61	67,92	84,17
73,34	77,00	73,05
70,43	74,99	72,03

média	73,61	71,72	77,07
S.j	2,682711	3,709516	5,86628559
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	441,67	430,29	462,44
X..	74,13		
T..	1334,40		
N	18		
K	3		

m. ordem	71,72	73,61	77,07
MQR	18,45692		
Scom	4,296152		
Sx	2,480384		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	7,465957	9,10301	10,1199677

x3-x2	3,46	não difere	7,465957
x3-x1	5,36	não difere	9,10301
x2-x1	1,90	não difere	7,465957

Fixando temperatura 700 e aditivo R 2000

1h	1h+3	2h+3
67,68	72,08	73,40
61,87	69,02	72,90
68,71	69,12	80,88
67,21	67,68	78,91
72,71	62,97	77,66
78,28	66,67	77,03

média	69,41	67,92	76,80
S.j	5,563118	3,035725	3,11964528
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	416,46	407,54	460,78
X..	71,38		
T..	1284,78		
N	18		
K	3		

m. ordem	67,92	69,41	76,80
MQR	16,63203		
Scom	4,078239		
Sx	2,354572		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	7,087262	8,64128	9,60665468

x3-x2	7,39	difere	7,087262
x3-x1	8,87	difere	8,64128
x2-x1	1,49	não difere	7,087262

Fixando temperatura 800 e aditivo R2000

R1000	R2000	G51
69,57	71,22	77,61
63,92	72,63	79,13
64,94	71,61	70,22
64,89	69,90	69,92
69,88	66,67	75,69
66,82	68,41	75,84

média	66,67	70,07	74,74
S.j	2,547956	2,217753	3,82842396
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	400,02	420,44	448,41
X..	70,49		
T..	1268,87		
N	18		
K	3		

m. ordem	66,67	70,07	74,74
MQR	8,689112		
Scom	2,94773		
Sx	1,701873		
GDL	15		

grupos	2	3	4
rk	3,01	3,67	4,08
RK	5,122637	6,245873	6,94364068

x3-x2	4,66	não difere	5,1226369
x3-x1	8,07	difere	6,2458729
x2-x1	3,40	não difere	5,1226369

Fixando temperatura 500 e aditivo G51)

1h	1h+3	2h+3
81,74	77,45	73,63
76,63	76,05	75,40
79,38	72,71	80,56
80,80	73,80	79,31
79,93	74,43	85,82
77,89	73,34	84,00

média	79,40	74,63	79,79
S.j	1,8798803	1,791547	4,7355239
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	476,37	447,78	478,72
X..	77,94	77,21	79,79
T..	1402,87		
N	18		
K	3		

m. ordem	74,63	79,40	79,79
MQR	9,7229256		
Scom	3,1181606		
Sx	1,8002709		
GDL	15		

grupos		2	3	4
rk		3,01	3,67	4,08
RK		5,418815	6,6069941	7,345105

x3-x2	0,39	não difere	5,418815
x3-x1	5,16	não difere	6,606994
x2-x1	4,77	não difere	5,418815

Fixando temperatura 600 e aditivo G51

1h	1h+3	2h+3
74,58	81,43	77,15
73,02	80,80	75,32
77,50	73,34	75,92
76,64	74,12	75,92
78,36	78,36	78,36
69,80	72,40	79,62

média	74,98	76,74	77,05
S.j	3,205131	3,958891	1,6659942
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	449,90	460,45	462,29
X..	76,26		
T..	1372,64		
N	18		
K	3		

m. ordem	74,98	76,74	77,05
MQR	9,57374		
Scom	3,094146		
Sx	1,786406		
GDL	15		

grupos		2	3	4
rk		3,01	3,67	4,08
RK		5,377082	6,55611	7,28853679

x3-x2	0,31	não difere	5,377082
x3-x1	2,07	não difere	6,55611
x2-x1	1,76	não difere	5,377082

Fixando temperatura 700 e aditivo G51

1h	1h+3	2h+3
66,51	75,14	83,70
63,92	73,26	81,82
74,59	69,71	80,17
73,26	67,66	82,68
77,66	71,00	79,31
63,21	69,85	80,38

média	69,86	71,10	81,34
S.j	6,091001	2,695379	1,67373435
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	419,15	426,62	488,06
X..	74,10		
T..	1333,83		
N	18		
K	3		

m. ordem	69,86	71,10	81,34
MQR	15,72225		
Scom	3,965129		
Sx	2,289268		
GDL	15		

grupos		2	3	4
rk		3,01	3,67	4,08
RK		6,890698	8,401615	9,34021524

x3-x2	10,24	difere	6,890698
x3-x1	11,49	difere	8,401615
x2-x1	1,25	não difere	6,890698

Fixando temperatura 800 e aditivo G51

R1000	R2000	G51
72,24	78,36	73,85
76,64	76,79	74,09
66,66	75,65	75,02
72,24	77,68	75,06
78,52	70,26	68,16
72,63	71,61	67,37

média	73,16	75,06	72,26
S.j	4,124647	3,347772	3,5229727
n.j	6,00	6,00	6,00
T.j	438,93	450,35	433,55
X..	73,49		
T..	1322,83		
N	18		
K	3		

m. ordem	72,26	73,16	72,26
MQR	13,54387		
Scom	3,6802		
Sx	2,124765		
GDL	15		

grupos		2	3	4
rk		3,01	3,67	4,08
RK		6,395542	7,797886	8,66903977

x3-x2	-0,90	não difere	6,3955416
x3-x1	0,00	não difere	7,7978863
x2-x1	0,90	não difere	6,3955416

ANEXO VI
TESTE DE DUNCAN – CONDIÇÃO DE MOAGEM

Condição de Moagem			
	1h	1h+3	2h+3
	77,89	72,00	77,32
	75,38	73,55	77,66
	76,63	77,45	73,63
	81,74	76,05	75,40
	72,40	74,59	78,91
	73,34	73,50	79,15
	79,38	72,71	80,56
	80,80	73,80	79,31
	80,25	72,08	78,71
	71,56	72,40	77,50
	79,93	74,43	85,82
	77,89	73,34	84,00
	75,38	70,57	74,55
	73,02	71,89	73,68
	74,58	81,43	77,15
	73,02	80,80	75,32
	73,34	77,00	73,05
	70,43	74,99	72,03
	77,50	74,12	75,92
	76,64	73,34	75,92
	77,89	67,92	84,96
	71,61	67,92	84,17
	78,36	78,36	78,36
	69,80	69,80	79,62
	67,68	72,08	73,40
	61,87	69,02	72,90
	63,92	75,15	83,70
	66,51	73,26	81,82
	72,71	66,62	77,66
	78,28	66,67	77,03
	74,59	67,66	80,17
	73,26	69,71	82,68
	68,71	69,12	80,88
	67,21	67,68	78,91
	77,66	71,00	79,31
	63,21	69,85	80,38
média	73,73	72,55	78,38
S _j	5,122514659	3,702370283	3,643478932
n _j	36	36	36
T _j	2654,37	2611,86	2821,54

X..	74,89
T..	8087,77
N	108
K	3

	x1	x2	x3
médias ordenadas	72,55166667	73,7325	78,37611111
S combinado	MQR	54,24	
	Scomb	7,364537016	
	Sx	2,454845672	
número de grupos	2	3	
rk	2,807	3,369	
grau de liberdade	105		
Rk	3,901736605	4,804273542	
x3-x2	4,6436111	>	2,807 DS
x3-x1	5,824444444	>	3,369 DS
x2-x1	1,180833333	<	2,807

DS diferem significativamente

O tempo de moagem 2h+3 (x3) difere significativamente dos demais, sendo este o que apresentou os melhores resultados

ANEXO VII
TESTE DE DUNCAN – PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

	CCA bruta	CP II Z 32	CP IV	CCA selec	CCA selec + CP II Z 32
L*	25,5274	63,3045	63,3103	55,5811	62,0027
	24,9105	63,3714	63,408	55,5809	61,845
	25,538	63,6646	63,255	55,2517	61,9435
média	25,33	63,45	63,32	55,47	61,93
S.j	0,359266	0,191535	0,077473	0,190121	0,079662
n.j	3	3	3	3	3
T.j	75,98	190,34	189,97	166,41	185,79
X..	53,90				
T..	808,49				
N	15				
K	5				

	CCA Bruta	CCA selec	CCA selec + CP II Z 32	CP IV	CP II Z 32
m. ordem	25,33	55,47	61,93	63,32	63,45
MQR	0,04285				
Sc_{om}	0,207004				
S_x	0,092575				
GDL	10				

grupos	2	3	4	5
rk	2,95	3,58	3,96	4,24
RK	0,273096	0,331418	0,366596	0,392517

X5-X4	0,12	não difere	0,273096
X5-x3	1,52	difere	0,331418
X5-x2	7,98	difere	0,366596
x5-x1	38,12	difere	0,392517
X4-X3	1,39	difere	0,273096
X4-x2	7,85	difere	0,331418
X4-x1	38,00	difere	0,366596
x3-x2	6,46	difere	0,273096
x3-x1	36,61	difere	0,331418
x2-x1	30,15	difere	0,273096

ANEXO VIII
RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS

Traço Referência

a/c = 0,3

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	35,0 35,0 34,6 33,0	34,4	0,9	2,7
3	42,1 41,9 42,1 42,5	42,2	0,3	0,6
7	51,1 50,9 51,0 50,7	50,9	0,2	0,3
28	62,8 64,8 66,7 67,4	65,4	2,0	3,1
90	66,1 68,4 66,0 66,2	66,7	1,2	1,7
180	70,9 71,9 68,0 69,0	69,9	1,8	2,5

Traço Referência

a/c = 0,4

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	18,3 19,3 17,9 18,8	18,6	0,6	3,3
3	27,7 24,9 28,7 26,7	27,0	1,6	6,0
7	33,7 32,5 34,5 33,5	33,6	0,8	2,5
28	43,0 43,8 41,9 42,6	42,8	0,8	1,8
90	45,8 46,6 45,4 46,2	46,0	1,8	3,9
180	46,4 45,4 45,0 49,0	46,5	1,8	3,9

Traço CCA

a/c = 0,3

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	37,1 36,3 37,0 36,1	36,6	0,5	1,4
3	46,2 47,3 45,5 46,8	46,5	0,8	1,7
7	53,5 58,0 58,3 54,0	56,0	2,6	4,6
28	71,7 70,3 71,5 69,9	70,8	0,9	1,3
90	73,5 72,4 72,8 71,7	72,6	0,7	1,0
180	75,3 74,3 76,2 75,6	75,4	0,8	1,0

Traço CCA

a/c = 0,4

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	21,1 21,0 20,9 21,2	21,1	0,1	0,6
3	28,2 27,9 27,7 27,3	27,8	0,4	1,4
7	33,6 32,5 33,4 31,4	32,7	1,0	3,1
28	45,6 45,8 45,4 45,6	45,6	0,2	0,4
90	47,5 46,1 49,0 47,6	47,6	1,8	3,8
180	49,6 51,3 47,0 48,6	49,1	1,8	3,7

Traço S A

a/c = 0,3

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	38,6 39,3 37,1 37,8	38,2	1,0	2,5
3	51,8 52,6 49,9 50,9	51,3	1,2	2,3
7	56,5 58,7 57,0 59,3	57,9	1,3	2,3
28	69,2 72,8 72,7 76,3	72,7	2,9	4,0
90	73,7 74,1 71,5 72,1	72,8	1,3	1,7
180	78,9 77,5 80,0 79,7	79,0	1,1	1,4

Traço S A

a/c = 0,4

Idade de ensaio (dias)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
1	21,46 20,30 21,60 19,92	20,8	0,8	4,0
3	32,55 32,37 31,79 31,72	32,1	0,4	1,3
7	37,82 39,40 35,33 36,78	37,3	1,7	4,6
28	50,44 50,10 51,29 50,76	50,6	0,5	1,0
90	51,65 50,36 51,13 49,95	50,8	1,6	3,2
180	55,00 51,25 52,90 54,00	53,3	1,6	3,0

ANEXO IX
RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS CONCRETOS

Planilha de Resultado de Resistência à Flexão
Idade de exposição: 15 dias

Constante do Anel 93,82 kgf/mm
Leitura = 0,01mm

Concreto	Solução	Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leitura de Ensaio	Leitura Média	Carga Média (N)	Sd (N)	CV (%)
Ref (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	58	5,7	0,45	0,48	445,65	0,05	0,011220
		63	6,2	0,45				
		66	6	0,55				
		74	6,1	0,45				
	Na ₂ SO ₄	***	***		0,58	544,16	0,04	0,007351
		12	5,7	0,54				
		15	5,9	0,58				
		20	6,1	0,62				
Ref (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	4	5,7	0,42	0,35	330,72	0,05	0,013829
		30	5,6	0,34				
		41	5,9	0,33				
		47	5,7	0,32				
	Na ₂ SO ₄	3	5,8	0,32	0,40	370,59	0,05	0,013671
		9	5,9	0,42				
		17	5,7	0,41				
		40	5,8	0,43				
CCA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	50	5,4	0,44	0,46	431,57	0,04	0,009460
		53	5,8	0,45				
		62	5,8	0,43				
		68	5,8	0,52				
	Na ₂ SO ₄	9	5,9	0,62	0,56	527,74	0,07	0,012317
		60	5,8	0,47				
		65	5,9	0,59				
		72	5,8	0,57				
CCA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	27	5,8	0,47	0,42	394,04	0,05	0,011903
		52	6,2	0,45				
		58	5,8	0,38				
		65	5,8	0,38				
	Na ₂ SO ₄	30	6,2	0,45	0,46	433,92	0,01	0,003457
		32	6,2	0,45				
		42	5,9	0,47				
		70	6,1	0,48				
SA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	12	5,9	0,57	0,55	516,01	0,02	0,003165
		25	6,1	0,53				
		54	6,1	0,55				
		67	5,9	0,55				
	Na ₂ SO ₄	4	6,3	0,53	0,51	480,83	0,04	0,009046
		6	5,9	0,52				
		9	5,9	0,45				
		16	6,1	0,55				
SA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	6	5,9	0,38	0,40	375,28	0,03	0,008426
		22	6,2	0,37				
		26	6,2	0,41				
		44	6,1	0,44				
	Na ₂ SO ₄	10	6,3	0,49	0,41	382,32	0,06	0,016317
		33	5,9	0,37				
		60	5,8	0,35				
		65	6,1	0,42				

Notas (***) Amostra perdida durante o ensaio

Planilha de Resultado de Resistência à Flexão
Idade de exposição: 30 dias

Constante do Anel 93,82 kgf/mm
Leitura = 0,01mm

Concreto	Solução	Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leitura de Ensaio	Leitura Média	Carga Média (N)	Sd (N)	CV (%)
Ref (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	37	5,6	0,5	0,47	438,61	0,05	0,010592
		70	6,1	0,51				
		23	6,2	0,45				
		61	6,1	0,41				
	Na ₂ SO ₄	34	5,4	0,48	0,55	516,01	0,09	0,017832
		26	6,2	0,68				
		10	6,1	0,55				
		8	6,1	0,49				
Ref (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	8	5,7	0,4	0,38	354,17	0,02	0,006261
		23	5,7	0,35				
		38	5,9	0,37				
		56	5,9	0,39				
	Na ₂ SO ₄	13	5,8	0,31	0,32	300,22	0,02	0,007195
		16	5,7	0,3				
		36	5,8	0,32				
		70	6,1	0,35				
CCA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	52	5,9	0,48	0,45	422,19	0,03	0,008205
		54	5,8	0,46				
		55	6	0,4				
		61	5,9	0,46				
	Na ₂ SO ₄	13	6,2	0,57	0,54	506,63	0,04	0,008374
		20	5,9	0,58				
		33	5,8	0,49				
		58	5,8	0,52				
CCA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	3	5,9	0,44	0,41	384,66	0,03	0,009006
		5	5,8	0,38				
		47	6,2	0,38				
		56	5,8	0,44				
	Na ₂ SO ₄	12	6,1	0,48	0,48	452,68	0,05	0,011027
		25	6,1	0,47				
		40	6,2	0,55				
		43	6,2	0,43				
SA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	26	5,9	0,50	0,55	518,36	0,04	0,006933
		28	6	0,56				
		31	5,8	0,58				
		46	6,1	0,57				
	Na ₂ SO ₄	7	6,1	0,44	0,47	440,95	0,03	0,007856
		13	6	0,46				
		63	5,8	0,46				
		65	6,3	0,52				
SA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	2	5,7	0,50	0,42	391,70	0,06	0,015371
		3	6,3	0,42				
		54	6,2	0,39				
		69	5,6	0,36				
	Na ₂ SO ₄	14	5,9	0,35	0,40	375,28	0,05	0,013234
		15	5,9	0,42				
		40	6,2	0,37				
		48	6,1	0,46				

Planilha de Resultado de Resistência à Flexão
Idade de exposição: 60 dias

Constante do Anel 93,82 kgf/mm
Leitura = 0,01mm

Concreto	Solução	Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leitura de Ensaio	Leitura Média	Carga Média (N)	Sd (N)	CV (%)
Ref (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	24	6,1	0,47	0,47	440,95	0,05	0,011564
		30	6,1	0,52				
		51	6,1	0,4				
		64	5,7	0,49				
	Na ₂ SO ₄	5	6,5	0,53	0,44	410,46	0,06	0,015710
		6	6,1	0,42				
		7	6,4	0,42				
		11	6,1	0,38				
Ref (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	21	6,2	0,41	0,38	356,52	0,04	0,009983
		29	5,8	0,4				
		32	5,8	0,38				
		42	5,9	0,33				
	Na ₂ SO ₄	6	5,7	0,15	0,14	133,69	0,02	0,011220
		24	5,8	0,15				
		51	5,8	0,15				
		66	5,8	0,12				
CCA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	2	6,2	0,49	0,47	436,26	0,02	0,004389
		24	6,1	0,45				
		35	6,1	0,45				
		66	5,8	0,47				
	Na ₂ SO ₄	21	6,3	0,53	0,44	415,15	0,06	0,015282
		26	5,9	0,44				
		29	6,1	0,42				
		39	5,8	0,38				
CCA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	9	6,1	0,48	0,41	387,01	0,06	0,014825
		36	5,8	0,36				
		44	6,2	0,44				
		66	5,9	0,37				
	Na ₂ SO ₄	4	6,1	0,40	0,35	328,37	0,05	0,013844
		33	5,9	0,35				
		34	6,3	0,36				
		50	6,1	0,29				
SA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	24	6	0,56	0,55	513,66	0,02	0,003685
		33	6	0,52				
		35	6,1	0,56				
		55	5,9	0,55				
	Na ₂ SO ₄	11	6	0,46	0,44	412,81	0,05	0,011701
		20	6	0,45				
		52	5,8	0,48				
		72	5,8	0,37				
SA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	12	6,1	0,41	0,41	379,97	0,02	0,005039
		25	6,1	0,39				
		32	5,9	0,39				
		73	5,9	0,43				
	Na ₂ SO ₄	9	6,2		0,34	315,86	0,07	0,020599
		19	5,9	0,27				
		31	6,1	0,34				
		36	6,3	0,40				

Planilha de Resultado de Resistência à Flexão
Idade de exposição: 90 dias

Constante do Anel 93,82 kgf/mm
Leitura = 0,01mm

Concreto	Solução	Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leitura de Ensaio	Leitura Média	Carga Média (N)	Sd (N)	CV (%)
Ref (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	32	5,9	0,44	0,48	445,65	0,04	0,007880
		42	6,3	0,45				
		65	6,2	0,51				
		72	5,9	0,5				
	Na ₂ SO ₄	9	5,5	0,15	0,19	178,26	0,05	0,029329
		13	6,1	0,15				
		23	6,2	0,20				
		29	5,6	0,26				
Ref (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	1	5,7	0,4	0,39	368,24	0,01	0,002600
		2	5,7	0,38				
		48	5,9	0,39				
		73	5,9	0,4				
	Na ₂ SO ₄	5	5,7	0,11	0,13	117,28	0,02	0,014769
		10	5,7	0,11				
		25	5,7	0,14				
		39	5,9	0,14				
CCA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	12	6,2	0,51	0,47	438,61	0,04	0,007980
		34	5,9	0,48				
		39	5,8	0,43				
		56	5,8	0,45				
	Na ₂ SO ₄	7	5,9	0,42	0,43	398,74	0,03	0,008566
		11	6,2	0,44				
		63	6,1	0,38				
		67	5,8	0,46				
CCA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	8	6,1	0,34	0,41	382,32	0,05	0,012338
		16	6,2	0,45				
		29	6,2	0,42				
		37	6,2	0,42				
	Na ₂ SO ₄	2	6,2	0,37	0,32	300,22	0,09	0,031364
		35	6,2	0,18				
		41	6,2	0,38				
		45	5,9	0,35				
SA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	18	6,1	0,50	0,54	508,97	0,03	0,006082
		62	6,3	0,54				
		64	5,8	0,56				
		69	5,8	0,57				
	Na ₂ SO ₄	5	6,3	0,50	0,42	394,04	0,06	0,014356
		34	5,9	0,42				
		59	5,8	0,38				
		73	5,8	0,38				
SA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	8	6,4	0,38	0,40	370,59	0,02	0,004674
		47	5,7	0,39				
		51	5,6	0,39				
		58	6,1	0,42				
	Na ₂ SO ₄	1	5,7	0,19	0,32	300,22	0,09	0,030406
		39	6,3	0,36				
		43	6,4	0,40				
		59	6,1	0,33				

Planilha de Resultado de Resistência à Flexão
Idade de exposição: 180 dias

Constante do Anel
Leitura = 0,01mm

93,82 kgf/mm

Concreto	Solução	Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leitura de Ensaio	Leitura Média	Carga Média (N)	Sd (N)	CV (%)
Ref (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	35	5,9	0,45	0,47	436,26	0,02	0,004389
		43	6,4	0,49				
		45	6,3	0,45				
		50	6,1	0,47				
	Na ₂ SO ₄	18	6,1	0	0,00	0,00	0,00	
		59	6,1	0				
		67	6,1	0				
		***	***					
Ref (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	14	5,6	0,36	0,38	356,52	0,01	0,003967
		15	5,6	0,39				
		27	5,7	0,39				
		53	5,8	0,38				
	Na ₂ SO ₄	28	5,6	0	0,00	0,00	0,00	
		34	6,1	0				
		59	5,7	0				
		63	5,7	0				
CCA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	30	5,8	0,5	0,46	431,57	0,06	0,013511
		37	5,8	0,41				
		64	5,8	0,41				
		69	5,7	0,52				
	Na ₂ SO ₄	51	5,9	0,13	0,14	131,35	0,02	0,015227
		17	6,2	0,13				
		75	6,1	0,17				
		77	5,9	0,13				
CCA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	72	5,8	0,39	0,41	387,01	0,03	0,006796
		6	6	0,4				
		26	5,9	0,41				
		59	5,8	0,45				
	Na ₂ SO ₄	1	6,3	0,08	0,08	70,37	0,01	0,018347
		54	5,8	0,06				
		61	5,9	0,07				
			0,09					
SA (a/c 0,3)	Ca(OH) ₂	71	5,8	0,55	0,54	501,94	0,04	0,007365
		61	5,7	0,51				
		47	6,3	0,58				
		10	6,1	0,5				
	Na ₂ SO ₄	43	5,9	0,14	0,14	129,00	0,02	0,013239
		38	6,2	0,13				
		44	5,8	0,16				
		17	6,1	0,12				
SA (a/c 0,4)	Ca(OH) ₂	53	5,8	0,39	0,40	377,63	0,04	0,009996
		16	5,8	0,36				
		62	5,8	0,41				
		28	5,7	0,45				
	Na ₂ SO ₄	5	5,9	0,07	0,07	68,02	0,01	0,018499
		50	6,4	0,07				
		37	5,8	0,09				
		57	6,2	0,06				

Nota (***) ruptura fora do padrão esperado

ANEXO X
MEDIDAS DE EXPANSÃO DOS CONCRETOS

Concreto Referência a/c = 0,3

60 dias

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,394

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)
31	6,4	L1	8,468	8,470	8,472	8,470	5,045	0,039	5,123	11,151	9,438	9,440	9,438	5,862	0,046	9,439	5,622	-0,117	5,388	11,685	6,022	-1,316
		L2	8,720	8,722	8,716	8,719	5,194	-0,045	5,104		8,960	8,978	8,968			8,969	5,342	-0,026	5,291			
		L3	8,344	8,340	8,350	8,345	4,971	0,014	5,000		8,488	8,490	8,492			8,490	5,057	-0,060	4,937			
38	5,3	L1				8,35	4,974	0,111	5,197	11,188				5,880	0,606	8,729	5,200	-0,056	5,087	11,101	5,847	-1,058
		L2	8,720	8,710	8,722	8,717	5,193	-0,019	5,154		8,594	8,594	8,596			8,595	5,120	-0,052	5,016			
		L3	8,258	8,258	8,258	8,258	4,919	-0,003	4,912		8,724	8,724	8,724			8,724	5,197	-0,054	5,088			
48	6,6	L1	9,294	9,276	9,282	9,284	5,530	-0,134	5,263	12,555	9,504	9,506	9,502	6,373	3,420	9,504	5,661	-0,051	5,560	11,354	5,978	-1,141
		L2	8,530	8,524	8,522	8,525	5,078	0,503	6,085		8,450	8,436	8,440			8,442	5,029	-0,079	4,872			
		L3	8,346	8,334	8,342	8,341	4,968	0,014	4,997		8,604	8,604	8,604			8,604	5,125	-0,057	5,012			

Variação média do diâmetro (%)

1,357

Variação média do diâmetro (%)

-1,172

0,093

Concreto Referência a/c = 0,3

90 dias

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,352

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)
31	6,4	L1	8,328	8,326	8,330	8,328	4,986	0,098	5,183	11,241	9,424	9,414	9,414	5,887	0,483	9,417	5,638	-0,132	5,373	11,645	6,017	-1,399
		L2	8,668	8,656	8,670	8,665	5,187	-0,038	5,111		8,856	8,854	8,872			8,861	5,305	0,012	5,329			
		L3	8,310	8,314	8,296	8,307	4,973	0,012	4,997		8,518	8,518	8,516			8,517	5,099	-0,102	4,895			
38	5,3	L1				8,325	4,984	0,101	5,187	11,083				5,855	0,176	8,728	5,225	-0,082	5,062	10,987	5,817	-1,567
		L2	8,700	8,700	8,700	8,700	5,208	-0,035	5,138		8,594	8,594	8,594			8,594	5,145	-0,077	4,990			
		L3	8,294	8,286	8,284	8,288	4,962	-0,046	4,869		8,726	8,726	8,726			8,726	5,224	-0,082	5,061			
48	6,6	L1	9,076	9,072	9,062	9,070	5,430	-0,033	5,363	12,829	9,502	9,512	9,506	6,433	4,380	9,507	5,691	-0,081	5,530	11,298	5,958	-1,472
		L2	8,420	8,416	8,428	8,421	5,042	0,540	6,122		8,384	8,378	8,388			8,383	5,019	-0,069	4,881			
		L3	8,242	8,252	8,254	8,249	4,939	0,044	5,027		8,602	8,602	8,602			8,602	5,150	-0,081	4,987			

Variação média do diâmetro (%)

1,679

Variação média do diâmetro (%)

-1,479

0,100

CCA a/c = 0,3

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,47

60 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II							Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Lado II (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)									
27	5,9	L1	8,668	8,668	8,668	8,668	5,117	-0,143	4,941	11,239	8,500	8,500	8,506	5,907	0,815	8,502	5,019	0,075	5,580	11,633	6,040	-1,035			
		L2	8,286	8,288	8,288	8,287	4,892	0,211	5,360		8,630	8,624	8,632			8,629	5,094	-0,197	5,119						
		L3	8,974	8,974	8,974	8,974	5,298	0,028	5,013		9,082	9,072	9,080			9,078	5,359	-0,078	4,919						
32	5,7	L1	8,952	8,958	8,962	8,957	5,288	0,056	5,141	11,123	8,566	8,556	8,550	5,855	0,182	8,557	5,052	0,014	5,157	11,488	5,952	0,717			
		L2	7,432	7,438	7,442	7,437	4,390	-0,097	5,077		8,102	8,114	8,120			8,112	4,789	-0,018	5,049						
		L3	8,278	8,292	8,280	8,283	4,890	0,075	4,990		8,462	8,458	8,470			8,463	4,996	0,110	5,252						
40	5,8	L1	8,680	8,672	8,660	8,671	5,118	-0,024	5,373	12,160	8,758	8,758	8,758	6,148	-0,233	8,758	5,170	-0,021	5,589	11,662	6,046	-0,020			
		L2	8,314	8,314	8,314	8,314	4,908	-0,041	5,540		8,324	8,324	8,324			8,324	4,914	0,012	4,962						
		L3	8,790	8,804	8,806	8,800	5,195	0,040	5,023		8,590	8,590	8,606			8,595	5,074	0,016	5,084						

Variação média do diâmetro (%) **0,254** Variação média do diâmetro (%) **-0,113**

Variação média do diâmetro (%) **0,071**

CCA a/c = 0,3

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,520

90 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II							Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Lado II (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)									
27	5,9	L1	8,656	8,658	8,648	8,654	5,079	-0,105	4,980	11,383	8,436	8,438	8,450	5,943	1,430	8,441	4,954	0,140	5,645	11,815	6,092	-0,170			
		L2	8,292	8,294	8,296	8,294	4,867	0,236	5,385		8,620	8,624	8,618			8,621	5,059	-0,163	5,154						
		L3	8,970	8,972	8,972	8,971	5,265	0,060	5,045		9,070	9,090	9,086			9,082	5,330	-0,049	4,948						
32	5,7	L1	8,962	8,968	8,962	8,964	5,261	0,083	5,168	10,374	8,606	8,614	8,606	5,694	-2,573	8,609	5,052	0,014	5,157	11,427	5,933	0,382			
		L2	8,338	8,338	8,338	8,338	4,893	-0,599	4,574		8,090	8,090	8,090			8,090	4,748	0,023	5,090						
		L3	8,318	8,324	8,318	8,320	4,883	0,082	4,998		8,660	8,658	8,666			8,661	5,083	0,023	5,165						
40	5,8	L1	8,662	8,662	8,662	8,662	5,083	0,011	5,408	12,310	8,696	8,692	8,698	6,194	0,516	8,695	5,103	0,046	5,656	11,856	6,101	0,901			
		L2	8,238	8,236	8,238	8,237	4,834	0,032	5,614		8,310	8,314	8,316			8,313	4,879	0,047	4,997						
		L3	8,852	8,856	8,846	8,851	5,194	0,041	5,024		8,590	8,592	8,580			8,587	5,040	0,050	5,118						

Variação média do diâmetro (%) **-0,209** Variação média do diâmetro (%) **0,371**

Variação média do diâmetro (%) **0,081**

CCA a/c = 0,4

60 dias

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,538

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)
22	6,3	L1	8,436	8,430	8,434	8,433	4,939	0,034	5,118	11,204	8,630	8,636	8,644	5,879	0,335	8,637	5,058	0,070	5,575	12,045	6,129	0,426
		L2	8,564	8,552	8,554	8,557	5,011	0,028	5,177		8,496	8,496	8,496			8,496	4,975	0,003	5,320			
		L3	8,626	8,6,34	8,632	8,629	5,053	-0,014	4,971		8,536	8,534	8,534			8,535	4,998	-0,019	4,978			
62	5,7	L1				8,439	4,942	0,101	5,187	11,416				5,937	1,590	8,585	5,028	0,028	5,171	10,544	5,743	-2,822
		L2	8,779	8,784	8,790	8,784	5,144	0,072	5,245		7,848	7,842	7,844			7,845	4,594	0,043	5,110			
		L3	8,404	8,402	8,412	8,406	4,923	0,067	4,983		8,598	8,604	8,604			8,602	5,037	-0,559	4,583			
64	5,7	L1	9,110	9,100	9,100	9,103	5,331	0,010	5,406	12,273	8,472	8,486	8,484	6,185	0,367	8,481	4,966	0,032	5,643	11,862	6,098	0,842
		L2	8,538	8,536	8,514	8,529	4,995	0,021	5,602		8,636	8,628	8,630			8,631	5,055	0,112	5,062			
		L3	8,522	8,470	8,470	8,487	4,970	0,030	5,013		8,450	8,448	8,444			8,447	4,947	-0,004	5,065			
												Varição média do diâmetro (%)		0,764				Varição média do diâmetro (%)		-0,518		
																		Varição média do diâmetro (%)		0,123		

CCA a/c = 0,4

90 dias

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,502

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)
22	6,3	L1	8,528	8,530	8,530	8,529	5,016	-0,043	5,041	11,072	8,710	8,692	8,700	5,842	-0,286	8,701	5,117	0,011	5,516	11,897	6,089	-0,227
		L2	8,570	8,566	8,562	8,566	5,038	0,002	5,151		8,466	8,466	8,466			8,466	4,979	0,000	5,317			
		L3	8,568	8,576	8,574	8,573	5,042	-0,002	4,983		8,556	8,564	8,568			8,563	5,036	-0,057	4,940			
62	5,7	L1				8,453	4,971	0,072	5,157	11,443				5,940	1,629	8,551	5,029	0,026	5,170	10,486	5,738	-2,916
		L2	8,788	8,778	8,792	8,786	5,167	0,049	5,223		7,758	7,764	7,778			7,767	4,568	0,069	5,137			
		L3	8,266	8,258	8,262	8,262	4,859	0,131	5,047		8,660	8,654	8,648			8,654	5,089	-0,611	4,531			
64	5,7	L1	8,670	8,978	8,966	8,871	5,217	0,124	5,520	12,533	8,358	8,364	8,378	6,243	1,303	8,367	4,920	0,078	5,689	11,931	6,123	1,266
		L2	8,524	8,526	8,528	8,526	5,014	0,002	5,583		8,584	8,584	8,570			8,579	5,045	0,121	5,071			
		L3	8,348	8,340	8,336	8,341	4,906	0,095	5,078		8,410	8,410	8,414			8,411	4,947	-0,003	5,065			
												Varição média do diâmetro (%)		0,882				Varição média do diâmetro (%)		-0,626		
																		Varição média do diâmetro (%)		0,128		

SA a/c = 0,3

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra **8,532**

60 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)
40	6,0	L1	8,544	8,544	8,544	8,544	5,007	-0,053	5,032	11,034	8,408	8,414	8,400	5,834	-0,418	8,407	4,927	0,046	5,552	11,878	6,096	-0,119
		L2	8,714	8,714	8,714	8,714	5,107	0,019	5,168		8,186	8,192	8,192			8,190	4,800	0,015	5,332			
		L3	7,494	7,485	7,480	7,486	4,387	-0,033	4,952		8,500	8,490	8,492			8,494	4,978	-0,105	4,892			
42	6,0	L1				8,74	5,122	0,005	5,091	10,991				5,824	-0,352	8,473	4,965	0,018	5,162	11,449	5,942	0,548
		L2	9,584	9,592	9,572	9,583	5,616	-0,047	5,126		8,752	8,772	8,748			8,757	5,132	-0,036	5,032			
		L3	8,612	8,612	8,612	8,612	5,047	-0,009	4,906		8,952	8,968	8,980			8,967	5,255	0,096	5,239			
58	6,0	L1	8,260	8,260	8,260	8,260	4,841	-0,017	5,379	12,122	8,800	8,808	8,812	6,145	-0,294	8,807	5,161	0,116	5,726	11,806	6,112	1,071
		L2	8,332	8,338	8,330	8,333	4,884	-0,030	5,552		8,282	8,296	8,290			8,289	4,858	0,088	5,038			
		L3	8,704	8,704	8,704	8,704	5,101	0,005	4,988		9,052	9,054	9,048			9,051	5,304	-0,066	5,002			

Varição média do diâmetro (%) **-0,354**

Varição média do diâmetro (%) **0,500**
0,073

SA a/c = 0,3

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra **8,540**

90 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II												
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Varição do Diâmetro (%)
40	6,0	L1	8,452	8,450	8,450	8,451	4,948	0,007	5,091	11,113	8,370	8,384	8,394	5,855	-0,072	8,383	4,908	0,066	5,571	12,102	6,141	0,619
		L2	8,734	8,736	8,738	8,736	5,115	0,011	5,160		8,180	8,180	8,180			8,180	4,789	0,026	5,342			
		L3	7,490	7,488	7,490	7,489	4,385	-0,031	4,954		8,336	8,320	8,326			8,327	4,875	-0,003	4,994			
42	6,0	L1	8,756	8,756	8,758	8,757	5,127	0,000	5,086	11,010	8,554	8,556	8,560	5,829	-0,266	8,557	5,010	-0,026	5,118	11,203	5,879	-0,530
		L2	9,576	9,564	9,568	9,569	5,603	-0,034	5,139		8,872	8,866	8,876			8,871	5,194	-0,098	4,970			
		L3				8,612	5,042	-0,005	4,911							9,077	5,314	0,037	5,179			
58	6,0	L1	8,262	8,264	8,264	8,263	4,838	-0,015	5,382	12,148	8,780	8,784	8,780	6,148	-0,234	8,781	5,141	0,135	5,746	11,690	6,098	0,844
		L2	8,352	8,352	8,352	8,352	4,890	-0,036	5,546		8,446	8,462	8,456			8,455	4,950	-0,004	4,946			
		L3	8,680	8,688	8,682	8,683	5,084	0,022	5,005		9,044	9,024	9,036			9,035	5,290	-0,051	5,017			

Varição média do diâmetro (%) **-0,190**

Varição média do diâmetro (%) **0,311**
0,060

SA a/c = 0,4

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,484

60 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II													
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	
11	11,0	L1	8,564	8,556	8,564	8,561	5,046	0,117	5,201	11,249	8,656	8,638	8,648	5,889	0,515	8,647	5,096	-0,074	5,431	11,833	6,069	-0,550	
		L2	8,820	8,824	8,822	8,822	5,199	-0,110	5,039		8,694	8,698	8,684			8,692	5,123	0,061	5,378				
		L3	8,438	8,448	8,444	8,443	4,976	0,071	5,056		8,706	8,698	8,714			8,706	5,131	-0,079	4,918				
20	20,0	L1				8,433	4,970	0,166	5,251	11,199				5,886	0,715	8,881	5,234	0,051	5,194	11,392	5,925	0,263	
		L2	8,436	8,420	8,420	8,425	4,965	-0,054	5,120		9,630	9,632	9,636			9,633	5,677	-0,023	5,044				
		L3	8,650	8,630	8,650	8,643	5,094	-0,012	4,904		8,458	8,470	8,464			8,464	4,988	0,010	5,152				
38	38,0	L1	8,376	8,364	8,360	8,367	4,931	-0,018	5,379	12,153	8,838	8,842	8,828	6,158	-0,075	8,836	5,207	0,011	5,622	11,558	6,035	-0,196	
		L2	8,560	8,552	8,558	8,557	5,043	0,008	5,590		8,356	8,338	8,352			8,349	4,920	-0,045	4,905				
		L3	8,898	8,896	8,896	8,897	5,243	-0,004	4,978		8,284	8,284	8,284			8,284	4,882	-0,009	5,059				
Variação média do diâmetro (%)													0,385	Variação média do diâmetro (%)								-0,161	0,112

SA a/c = 0,4

Solução Ca(OH)₂

Leitura da barra Lbarra 8,456

90 dias

Amostra nº	Espessura Média (mm)	Leituras	Lado I							Lado II													
			Lado I (mm)			Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Lado II (mm)			Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	Média (mm)	Distância Média (cm)	Expansão (cm)	Distância Final (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Variação do Diâmetro (%)	
11	11,0	L1	8,506	8,502	8,502	8,503	5,028	0,134	5,218	11,050	8,570	8,578	8,580	5,844	-0,249	8,576	5,071	-0,049	5,457	11,908	6,074	-0,465	
		L2	8,786	8,796	8,772	8,785	5,194	-0,105	5,044		8,864	8,864	8,858			8,862	5,240	-0,056	5,260				
		L3	8,662	8,670	8,668	8,667	5,125	-0,077	4,908		8,474	8,472	8,464			8,470	5,008	0,043	5,040				
20	20,0	L1				8,803	5,205	-0,069	5,016	10,835				5,783	-1,050	8,907	5,267	0,018	5,162	12,165	6,147	4,011	
		L2	8,384	8,390	8,408	8,394	4,963	-0,052	5,122		8,684	8,682	8,678			8,681	5,133	0,521	5,588				
		L3	8,666	8,666	8,644	8,659	5,120	-0,038	4,878		8,388	8,376	8,380			8,381	4,956	0,043	5,185				
38	38,0	L1	8,350	8,354	8,360	8,355	4,940	-0,027	5,369	12,046	8,802	8,808	8,808	6,128	-0,558	8,806	5,207	0,012	5,622	11,304	5,988	-0,973	
		L2	8,598	8,612	8,604	8,605	5,088	-0,037	5,545		8,448	8,448	8,448			8,448	4,995	-0,120	4,830				
		L3	8,900	8,900	8,900	8,900	5,263	-0,024	4,959		8,384	8,374	8,386			8,381	4,956	-0,083	4,985				
Variação média do diâmetro (%)													-0,619	Variação média do diâmetro (%)								0,858	0,119

