

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

TESE DE DOUTORADO

**Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à
produção de cimento composto e/ou pozolânico**

Maria Tereza Fernandes Pouey

Porto Alegre
Janeiro de 2006

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

Tese de Doutorado

**Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas
à produção de cimento composto e/ou pozolânico**

Maria Tereza Fernandes Pouey

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil – PPGEC, como parte dos
requisitos para o obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Denise C. C. Dal Molin

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre
Janeiro de 2006

P872b Pouey, Maria Tereza Fernandes
Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas
à produção
de cimento composto e/ou pozolânico / Maria Tereza Fernandes Pouey.—
2006.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de
Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre,
BR-RS, 2006.

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

1. Cinza de casca de arroz. 2. Cimento Portland. 3. Materiais de construção.
I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Bergmann, Carlos Pérez,
co-orient. III. Título.

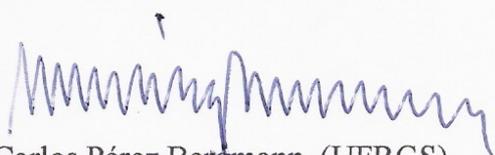
Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora:

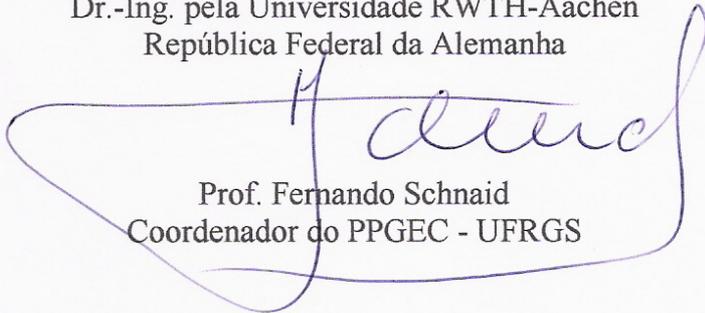


Prof.^a. Denise C. C. Dal Molin (UFRGS)
Dr.^a. pela Universidade de São Paulo

Co-Orientador:



Prof. Carlos Pérez Bergmann (UFRGS)
Dr.-Ing. pela Universidade RWTH-Aachen
República Federal da Alemanha



Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGECC - UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior (UFSC)

Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Geraldo Cechella Isaia (UFSM)

Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Ruy Cremonini (UFRGS)

Dr. pela Universidade de São Paulo

Porto Alegre, Janeiro de 2006

*À memória de meu amado pai, Darcy,
com eterna saudade*

*Aos meus queridos filhos,
Carlos Eduardo e Mariana, com carinho*

Ao Carlos, com amor

AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho foi indispensável a cooperação, o apoio e o estímulo de muitas pessoas. Cabe, portanto, agradecer a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para tal, em especial,

- à professora Denise C. C. Dal Molin, primeiramente por me aceitar como orientanda e depois, por sua orientação segura e valiosa no desenvolvimento do trabalho, além do apoio e estímulo constantemente dispensados;
- ao professor Carlos P. Bergmann, por suas sugestões e contribuições à pesquisa; além disto, por abrir as portas do Laboratório de Cerâmica – LACER / UFRGS - para a realização de vários ensaios;
- aos alunos bolsistas do NORIE que colaboraram na parte laboratorial do trabalho, em particular, às minhas “filhas” Patrícia Poyastro e Luciana Khun e ao meu “filho”, o voluntário Bernardo Etges, pela forma dedicada, responsável e eficiente que desenvolveram as tarefas a eles confiadas; também ao Andreas Berwaldt por sua colaboração nas etapas iniciais de moagem;
- ao professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, por disponibilizar dependências, equipamentos e materiais do Laboratório de Ensaios de Modelos Estruturais – LEME / UFRGS, em particular, do Laboratório de Química;
- à professora Ângela B. Masuero, pelo apoio estratégico para a realização da parte experimental da pesquisa;
- ao pessoal do Laboratório de Cerâmica – LACER - que contribuíram para a realização de diferentes ensaios e testes, em particular, ao eng. João Marcos Hohemberger, aos mestrandos Antônio Takini e André Zimmer e aos bolsistas Kareline Guerino, Renato Bonadiman e Cynthia Thompson;

- à Graziela Grandó, então aluna de engenharia química e estagiária do LEME, por sua contribuição na fase inicial do tratamento químico das cinzas;
- à Alexandra Passuero, então mestranda do LEME, e ao Ítalo G. Gonçalves, bolsista do Laboratório de Processamento Mineral – LAPROM / UFRGS, por suas contribuições nas medidas colorimétricas das cinzas de casca de arroz e respectivas avaliações;
- aos colegas do NORIE, em especial, aos da área de materiais, pelo convívio, coleguismo, amizade e espírito de grupo;
- aos laboratoristas do NORIE, Éder e Airton, pelo apoio nas atividades básicas de laboratório;
- à empresa Micro Service Ltda (Diadema – SP), na pessoa do Sr. Felipe Lansberger, que, gentilmente, providenciou a micronização de amostras de cinza de casca de arroz, de forma gratuita;
- à CAPES, através do Programa Institucional de Capacitação de Docentes, PICD – CAPES/UFPel, que me concedeu a bolsa de estudos;
- à Universidade Católica de Pelotas por disponibilizar as dependências do Laboratório de Resistência dos Materiais para a realização de parte dos ensaios de determinação dos tempos de pega;
- e, por fim, aos meus familiares e amigos, em especial ao Carlos, meu marido, e à minha mãe, Therezinha, pelo carinho, compreensão, estímulo e apoio dispensados ao longo destes anos de realização do trabalho; à minha amiga e ex-colega, Ângela P. Maestrini, pelo constante incentivo.

A todos, meus sinceros agradecimentos,

Maria Tereza

RESUMO

BENEFICIAMENTO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL COM VISTAS À PRODUÇÃO DE CIMENTO COMPOSTO E/OU POZOLÂNICO

Autora: *Maria Tereza Fernandes Pouey*

Orientadora: Prof^ª. Denise C. Coitinho Dal Molin

Co-orientador: Prof. Carlos Pérez Bergmann

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS

Porto Alegre, janeiro de 2006

A cinza de casca de arroz é um resíduo agro-industrial decorrente do processo de queima da casca de arroz, sendo largamente encontrada no Rio Grande do Sul, pois, historicamente, este Estado é o maior produtor de arroz no Brasil, com cerca de 45% da produção nacional. Empregada como fonte de energia, a casca de arroz é queimada em diversas empresas; algumas, devido à sua natureza, incorporam a cinza ao produto, mas a maioria não encontra outro destino que não o descarte em forma de aterro, criando, assim, um problema ambiental de poluição do solo, do ar e de rios e córregos. No entanto, devido à presença de elevado percentual de sílica (SiO_2) na sua constituição, a cinza de casca de arroz pode ter vários empregos. Na construção civil, pode ser empregada como pozolana, conforme vários estudos já vêm demonstrando. Porém, encontra restrições por motivos como sua cor escura, que confere aos cimentos, argamassas e concretos aos quais é adicionada, uma coloração também escura, e a falta de uniformidade apresentada em termos de características químicas e, principalmente, mineralógicas. A cor escura não é um problema de ordem técnica, mas estética e de aceitação no mercado. Já a composição mineralógica está associada à atividade pozolânica e a falta de uniformidade do material disponível implica na incerteza do grau de reatividade. Este trabalho teve o objetivo de verificar a viabilidade técnica do emprego de cinzas de casca de arroz residuais na confecção de cimentos Portland composto e/ou pozolânico, a partir de beneficiamentos das mesmas, que associam tratamentos físicos, químicos e/ou térmicos, os quais têm como finalidade reverter e/ou minimizar os aspectos negativos citados. Para tanto, foram empregadas três cinzas de casca de arroz, oriundas de diferentes processos de produção e com composições mineralógicas distintas. Após definidos os tratamentos a serem aplicados, através de seleção pelos critérios de cor e composição mineralógica, as cinzas tratadas foram avaliadas quanto à sua pozolanicidade, pelo Índice de Atividade Pozolânica (IAP) da NBR 5752 e também por um IAP alterado, proposto neste trabalho. A produção de cimentos com CCA beneficiada se deu a partir de um cimento base com substituição por CCA, em massa e em diferentes percentuais. Tais cimentos foram avaliados quanto à resistência à compressão, aos tempos de pega, à pozolanicidade e à expansibilidade a quente. A análise dos dados obtidos indica que os tratamentos propostos e/ou a associação deles resultam em benefício no desempenho das cinzas, em pelo menos um dos vários aspectos considerados. A presente pesquisa permite concluir que as CCA residuais têm potencial para serem empregadas na produção de cimentos, tanto aquelas menos cristalinas, quanto as mais cristalinas. Para tanto, devem ser beneficiadas, sendo pelo menos submetidas a tratamento físico para redução de sua granulometria. Se outros objetivos forem pretendidos, como coloração clara, os tratamentos térmico ou químico podem ser empregados.

ABSTRACT

THE PROCESSING OF RICE HUSK ASH WASTE FOR USE IN THE PRODUCTION OF POZZOLANIC OR COMPOSITE CEMENT

Author: *Maria Tereza Fernandes Pouey*

Thesis advisor: Prof^a. Denise C. Coitinho Dal Molin

Assistant advisor: Prof. Carlos Pérez Bergmann

Program of Postgraduation in Civil Engineering– UFRGS

Porto Alegre, January 2006

Rice husk ash (RHA) is an agricultural by-product originating from the burning of rice husks. It is widely available in the state of Rio Grande do Sul, the largest rice producer in Brazil, accounting for approximately 45% of the country's rice production. Rice husks are burned as a source of power in a number of different industries, some of which manage to incorporate the resulting ash to their products. Still, most industries have no use for the ash and dump this waste material in landfill sites, which may give rise to serious environmental problems by polluting soils, rivers, streams and the air. However, as RHA has high silica (SiO_2) content, it can be used in several applications. A number of studies have already demonstrated the potential for using this material as a pozzolan but the dark coloration of the ash is seen as a restriction to this because RHA adds a dark tint to cement, mortars and concrete. In addition, the differences in chemical composition and mineralogical characteristics between batches aggravate this problem. The dark coloration is not a technical issue but it affects the appearance of the final product and therefore its acceptance by customers. The mineralogical composition of the ash affects pozzolanic activity. The lack of homogeneity of available RHA also adds a degree of uncertainty regarding the reactivity of mortars and mixes. This study aims to investigate the technical feasibility of using processed RHA in the production of pozzolanic or composite portland cement. The processing of RHA includes physical, chemical and/or thermal treatments that aim to eliminate and/or minimize the problems faced in the use of RHA. Three different samples of RHA produced with different production processes and with different mineralogical compositions were used. The treatment processes were selected according to criteria of color and mineralogical composition of the ash. After treatment, the pozzolanic activity of ash samples was assessed using the Pozzolanic Activity Index (PAI) proposed by Brazilian Standard NBR 5752 and a modified PAI that was devised for this study. Cement samples using processed RHA were prepared using different content of RHA as substitutions for cement. The following properties were assessed in the modified cement samples: compressive strength, hardening time, pozzolanic activity and heat expansion. Results indicate that the proposed treatment (alone or in association) improve the performance of the ash in at least one of the properties investigated. It is possible to conclude that RHA (of varying degrees of crystallinity) holds a potential application in the production of cement. It is essential that the ash should undergo a physical process to reduce its particle size. If other aims are important, such as bleaching, thermal or chemical treatments may also be used.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1	
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1.1 Sílica – SiO₂	7
1.2 Casca de Arroz – CA	9
1.2.1 Usos da Casca de Arroz.....	10
1.3 A Cinza de Casca de Arroz - CCA	12
1.3.1 Métodos de Obtenção	13
1.3.1.1 Processo de combustão.....	13
1.3.1.2 Tratamentos químico-térmicos da CA.....	15
1.3.1.3 Tratamento da CA por Ataque Microbiológico.....	20
1.3.2 Características da CCA.....	21
1.3.2.1 Composição química	21
1.3.2.2 Características mineralógicas	21
1.3.2.3 Cor da cinza	24
1.3.2.4 Características físicas	25
1.3.2.5 Características Microestruturais	26
1.3.3 Tratamentos da cinza de casca de arroz.....	26
1.3.3.1 Tratamento Térmico da CCA	27
1.3.3.2 Tratamento físico da CCA.....	28
1.3.4 CCA como pozolana.....	30
1.3.4.1 Métodos para determinação da pozolanicidade.....	31
1.3.4.2 Pozolanicidade da CCA.....	34
1.4 Cimentos Produzidos a Partir da CCA	38
1.4.1 Tipos de Cimento.....	42
1.4.1.1 Cimento Portland Composto	42
1.4.1.2 Cimento Portland Pozolânico	42
1.4.1.3 Cimentos resistentes a sulfatos	44
CAPÍTULO 2	
2 LEVANTAMENTO DA QUANTIDADE E CARACTERÍSTICAS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL PRODUZIDA NA REGIÃO DE PELOTAS/RS	45
2.1 Levantamento de Dados em Pelotas / RS	48
2.1.1 Materiais e métodos.....	49
2.1.2 Resultados obtidos.....	49
2.1.2.1 Sobre a casca de arroz	49
2.1.2.2 Sobre a cinza de casca de arroz	51
2.1.2.3 Dados totais e gerais do levantamento em Pelotas	53
2.2 Conclusões	55

CAPÍTULO 3

3	TRABALHO EXPERIMENTAL	56
3.1	Programa Experimental	56
3.1.1	Parte I – Tratamentos Propostos: Aplicação e Avaliação.....	57
3.1.1.1	Tratamento Físico.....	57
3.1.1.2	Tratamento Térmico.....	58
3.1.1.3	Tratamento Químico.....	58
3.1.2	Parte II - Produção e avaliação dos cimentos produzidos com CCA beneficiada.....	58
3.2	Materiais empregados	61
3.2.1	Cinza de Casca de Arroz.....	61
3.2.1.1	Caracterização mineralógica e visual.....	62
3.2.1.2	Caracterização química e Perda ao fogo.....	65
3.2.1.3	Distribuição granulométrica das CCA.....	67
3.2.2	Cinzas empregadas na produção de cimentos: CCA7; CCA9 e CCA0....	68
3.2.2.1	Caracterização química – Teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio.....	68
3.2.2.2	Caracterização física – Massa específica, área superficial e distribuição granulométrica.....	69
3.2.2.3	Caracterização microscópica.....	70
3.2.2.4	Caracterização Térmica: Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica.....	72
3.2.3	Cimento.....	74
3.2.4	Areia.....	75
3.2.5	Aditivo.....	75
3.3	Ensaio aplicados às CCA	76
3.3.1	Avaliação Colorimétrica.....	76
3.3.1.1	Sistema de Avaliação Colorimétrica.....	76
3.3.1.2	Equipamento de medição colorimétrica.....	77
3.3.1.3	Leituras colorimétricas.....	77
3.3.1.4	Análise Estatística.....	77
3.3.2	Ensaio de pozolanicidade.....	78
3.3.2.1	Ensaio descrito na NBR 5752/92 – <i>Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland</i> – Índice de Atividade Pozolânica com cimento.....	78
3.3.2.2	Ensaio descrito na NBR 5752/92 com alterações propostas neste trabalho e, aqui, identificado como “NBR 5752/92 Alterada”.....	78
3.3.2.3	Projeto estatístico.....	79
3.3.2.4	Execução dos ensaios.....	79

3.4	Ensaio aplicado aos cimentos	80
3.4.1	Resistência à compressão	80
3.4.1.1	Uso de superplastificante.....	81
3.4.1.2	Análise Estatística	81
3.4.1.3	Prensa empregada.....	82
3.4.2	Tempos de início e fim de pega.....	82
3.4.3	Expansibilidade a quente	83
3.4.4	Pozolanicidade (método químico).....	83
3.5	Equipamentos	84
3.5.1	Moinhos	84
3.5.1.1	Moinho de Bolas.....	84
3.5.1.2	Moinho Periquito.....	85
3.5.1.3	Moinho Agitador	86
3.5.1.4	Moinho Planetário	86
3.5.1.5	Micronizador	87

CAPÍTULO 4

4	TRATAMENTOS PROPOSTOS	88
4.1	Cinzas Empregadas e Amostras Tratadas	88
4.2	Tratamento Físico	89
4.2.1	Moagem em moinho de bolas.....	89
4.2.1.1	Moagem a seco	89
4.2.1.2	Moagem a úmido	93
4.2.1.3	Comparação entre os processos por via seca e úmida no moinho de bolas.....	95
4.2.2	Moagem em moinho planetário.....	95
4.2.2.1	Moagem a seco	96
4.2.2.2	Moagem a úmido.....	98
4.2.2.3	Comparação entre os processos por via seca e úmida no moinho planetário	99
4.2.3	Moagem em moinho periquito	100
4.2.4	Moagem em moinho agitador.....	101
4.2.5	Micronização	102
4.2.6	Análise geral dos dados e conclusões quanto aos tratamentos físicos ...	103
4.2.7	Avaliação comparativa entre o processo de micronização e moagem no moinho periquito, quanto ao Índice de Atividade Pozolânica-IAP - EXPERIMENTO PRELIMINAR I.....	105
4.2.7.1	Objetivo	105
4.2.7.2	Materiais e Métodos	105
4.2.7.3	Resultados obtidos.....	107
4.2.7.4	Análise e discussão dos resultados	110
4.2.7.5	Conclusões do Experimento Preliminar I.....	113

4.2.8	Avaliação comparativa entre o processo de moagem nos moinhos de bolas, periquito e agitador, quanto ao Índice de Atividade Pozolânica - IAP - EXPERIMENTO PRELIMINAR II.....	113
4.2.8.1	Objetivo	113
4.2.8.2	Materiais e Métodos	114
4.2.8.3	Resultados obtidos.....	116
4.2.8.4	Análise e discussão dos resultados	118
4.2.8.5	Discussão dos resultados	121
4.2.8.6	Conclusões do experimento preliminar II	124
4.3	Tratamento Térmico	126
4.3.1	Tratamentos térmicos empregados	126
4.3.2	Resultados quanto à cor.....	127
4.3.2.1	Tratamento Térmico 0 - TT0.....	127
4.3.2.2	Tratamento Térmico 1 – TT1	129
4.3.2.3	Tratamento Térmico 2 - TT2.....	130
4.3.2.4	Tratamento Térmico 3 - TT3.....	132
4.3.2.5	Conclusões quanto à cor após os tratamentos térmicos.....	133
4.3.3	Resultados quanto à composição mineralógica.....	133
4.3.4	Resultados quanto à composição química	135
4.3.5	Conclusões quanto aos tratamentos térmicos	136
4.4	Tratamento Químico	137
4.4.1	Tratamentos químicos empregados	137
4.4.1.1	Proporção da mistura cinza/solução	138
4.4.1.2	Outros procedimentos.....	138
4.4.2	Resultados quanto à composição química.....	138
4.4.3	Resultados quanto à presença de resíduos dos tratamentos aplicados....	140
4.4.3.1	Técnica empregada.....	141
4.4.3.2	Resíduo de cloro (Tratamentos com HCl - TQ1, TQ2 e TQ5)	141
4.4.3.3	Resíduo de enxofre (Tratamentos com H ₂ SO ₄ - TQ3 e TQ5)	142
4.4.3.4	Resíduo de sódio (Tratamento com Hidróxido de Sódio - NaOH - TQ4).....	143
4.4.4	Resultados quanto à cor.....	144
4.4.4.1	Avaliação colorimétrica.....	146
4.4.5	Resultados quanto à composição mineralógica.....	149
4.4.6	Análise dos Resultados dos Banhos químicos.....	150
4.4.6.1	Banhos químicos com soluções de diferentes concentrações de HCl.....	151
4.4.7	Conclusões quanto aos tratamentos químicos	152

CAPÍTULO 5

5	CINZAS BENEFICIADAS: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO	153
5.1	Produção de cinzas beneficiadas	153
5.1.1	Cinzas empregadas	153
5.1.2	Tratamentos selecionados e respectivas operações unitárias	153
5.1.2.1	Tratamento físico	154
5.1.2.2	Tratamento térmico	154
5.1.2.3	Tratamento químico	154
5.1.3	Beneficiamentos	154
5.1.3.1	Aplicação dos beneficiamentos	155
5.2	Avaliação das cinzas beneficiadas	156
5.2.1	Quanto à cor	156
5.2.1.1	Avaliação qualitativa da cor	156
5.2.1.2	Avaliação colorimétrica no CIE Lab	157
5.2.2	Quanto à composição química	159
5.2.3	Quanto à composição mineralógica	160
5.2.3.1	Cinza CCA0 – referência	161
5.2.3.2	Cinza CCA7	161
5.2.3.3	Cinza CCA9	161
5.2.4	Quanto à caracterização física	163
5.2.5	Quanto à poçalnicidade	166
5.2.5.1	Resultados obtidos	166
5.2.5.2	Análise dos dados	169
5.2.5.3	Análise estatística dos dados	173
5.2.5.4	Discussão dos dados	179
5.2.6	Conclusões sobre o beneficiamento das CCA	180

CAPÍTULO 6

6	CIMENTOS COM CCA BENEFICIADA	182
6.1	Resistência à compressão do cimento	185
6.1.1	Materiais Empregados	185
6.1.2	Resultados obtidos	185
6.1.3	Análise dos resultados	185
6.1.4	Análise estatística dos dados	190
6.1.4.1	Influência isolada da idade na resistência à compressão	191
6.1.4.2	Influência isolada do tipo de moinho na resistência à compressão	193
6.1.4.3	Influência isolada do percentual de substituição na resistência à compressão	194

6.1.4.4	Influência isolada do tipo de beneficiamento na resistência à compressão	196
6.1.4.5	Influência do tipo de cinza na resistência à compressão	198
6.1.4.6	Interações entre alguns fatores	200
6.1.5	Modelagem dos dados	203
6.1.5.1	Dados totais	203
6.1.5.2	Dos tratamentos isoladamente	207
6.2	Pozolanicidade química do cimento	208
6.3	Pasta de consistência normal	214
6.4	Tempos de pega	217
6.4.1	Resultados obtidos	217
6.5	Expansibilidade de Le Chatelier	221
6.6	Quadro resumo das propriedades dos cimentos	223

CAPÍTULO 7

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	225
7.1	Conclusões parciais	225
7.1.1	Do levantamento da quantidade e características da cinza de casca de arroz residual produzida na região de Pelotas/RS	225
7.1.2	Dos tratamentos físicos propostos	226
7.1.3	Dos tratamentos térmicos propostos	226
7.1.4	Dos tratamentos químicos propostos	227
7.1.5	Do Experimento preliminar I	227
7.1.6	Do Experimento preliminar II	228
7.1.7	Das cinzas tratadas e suas pozolanidades	228
7.1.8	Da resistência à compressão dos cimentos	230
7.1.9	Da pozolanicidade química do cimento	231
7.1.10	Dos tempos de pega	231
7.1.11	Da expansibilidade a quente de Le Chatelier	232
7.2	Conclusões gerais	232
7.3	Sugestões para Futuros Pesquisas	233

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	234
---	-----

ANEXO I

Questionários do levantamento de dados em Pelotas/RS	240
--	-----

ANEXO II	
Relatório de ensaios.....	243
ANEXO III	
Dados de resultados obtidos - Cap. 4.....	245
ANEXO IV	
Resultados estatísticos.....	264
ANEXO V	
Fichas-resumo dos cimentos.....	275

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1.1	Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA.....	14
TABELA 1.2	Composição química das amostras CCA obtidas com diferentes tratamentos, por diversos autores	20
TABELA 1.3	Composição química de cinza da casca de arroz, segundo vários autores	22
TABELA 1.4	Exemplos de características físicas da CCA	25
TABELA 1.5	Propriedades físicas de CCA “ <i>in natura</i> ” e tratada termicamente (TT), quando submetidas à moagem por 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas	29
TABELA 1.6	Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade	34
TABELA 1.7	Pozolanicidade da CCA pelos métodos de Luxan e IAP	35
TABELA 1.8	Resultados obtidos pelos ensaios de Lúxan e IAP (NBR 5752/92)	35
TABELA 1.9	Resistência á compressão de argamassas com CCA tratada e não tratada	37
TABELA 1.10	Algumas exigências físicas e mecânicas para os cimentos Portland composto e Portland pozolânico, de acordo com a NBR 11578/91 e NBR 5736/91	43

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1	Características das CCA residuais menos cristalinas: CCA1; CCA6 e CCA7	63
TABELA 3.2	Características das CCA residuais mais cristalinas: CCA3; CCA8 e CCA9	64
TABELA 3.3	Características da cinza de referência – CCA 0	65
TABELA 3.4	Composição química das cinzas selecionadas para o estudo dos beneficiamentos propostos	66
TABELA 3.5	Composição granulométrica de cinzas selecionadas para as primeiras etapas	67
TABELA 3.6	Teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio das CCA0, CCA7 e CCA9	68
TABELA 3.7	Caracterização física das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, em estado natural	69
TABELA 3.8	Características do cimento CP V – ARI utilizado	75
TABELA 3.9	Projeto Estatístico: Resistência à compressão (NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 Alterada”): Análise Fatorial com repetição	79
TABELA 3.10	Resistência à compressão: análise fatorial com repetições	82
TABELA 3.11	Exemplo do Índice de atividade pozolânica proposto Isaia (1995)	84

CAPÍTULO 4

TABELA 4.1	Distribuição granulométrica das cinzas moídas em moinho planetário, via seca	96
TABELA 4.2	Composição granulométrica da CCA0 obtida no moinho periquito.....	101
TABELA 4.3	Distribuição granulométrica das cinzas micronizadas.....	103
TABELA 4.4	Projeto Estatístico: Índice de Atividade Pozolânica (NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 alterada”): análise fatorial com repetição	106
TABELA 4.5	Diâmetros 50% passante das cinzas CCA0 e CCA8 e respectivos tempos de moagem	107
TABELA 4.6	Relação água/aglomerante das argamassas para consistência (225 ± 5) mm	107
TABELA 4.7	Resistência à compressão aos 28 dias e IAP.....	108
TABELA 4.8	Projeto estatístico: Resistência à compressão (NBR 5752/96 e “NBR 5752/96 alterada”): análise fatorial com repetição	115
TABELA 4.9	Resultados da moagem das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, nos moinhos de bolas, periquito e agitador	116
TABELA 4.10	Resultados dos ensaios de determinação do Índice de Atividade Pozolânica – IAP, segundo a NBR 5752/92 e “NBR5752/92 Alterada” ...	117
TABELA 4.11	Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras submetidas à tratamento térmico	134
TABELA 4.12	Composição química das amostras com e sem tratamento térmico TT1..	135
TABELA 4.13	Composição química das amostras tratadas com TQ1, TQ2 e TQ3	139
TABELA 4.14	Composição química das amostras tratadas quimicamente com TQ4.....	143
TABELA 4.15	Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras submetidas à tratamento térmico	149
TABELA 4.16	Parâmetros colorimétricos médios de amostras da CCA0 submetidas a diferentes banhos com solução de HCl.....	152

CAPÍTULO 5

TABELA 5.1	Parâmetros cromáticos das cinzas beneficiadas.....	157
TABELA 5.2	Composição química das CCA beneficiadas.....	160
TABELA 5.3	Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras beneficiadas	160
TABELA 5.4	Caracterização física das cinzas beneficiadas.....	163
TABELA 5.5	Resultados obtidos nos ensaios de pozolanidade das cinzas beneficiadas: índice de consistência, água requerida, percentual de aditivo, resistência à compressão (fc) e índice de atividade pozolânica (IAP).....	167

CAPÍTULO 6

TABELA 6.1	Identificação dos cimentos produzidos a partir de substituição por CCA beneficiada.....	183
TABELA 6.2	Médias de resistência individual à compressão e percentual de aditivo usado dos cimentos C1 a C90.....	186
TABELA 6.3	Diferenças entre a resistência à compressão individual e a resistência do cimento de referência, nas diferentes idades C1 a C90.....	187
TABELA 6.4	Diferenças entre a resistência à compressão individual e a resistência do cimento de referência, em percentual do valor de referência, nas diferentes idades, dos cimentos C1 a C90.....	188
TABELA 6.5	Análise de variância para os dados de resistência à compressão - ANOVA.....	190
TABELA 6.6	Análise de variância para os dados de resistência à compressão, aos 28 dias.....	191
TABELA 6.7	Exemplos de valores estimados de acordo com a regressão múltipla linear.....	204
TABELA 6.8	Dados de regressão múltipla linear entre a Resistência à Compressão com tipo de cinza, tipo de tratamento, tipo de moinho, percentual de substituição e idade.....	205
TABELA 6.9	Dados de regressão múltipla não-linear entre a Resistência à Compressão com tipo de moinho, percentual de substituição e idade.....	205
TABELA 6.10	Variáveis, níveis e códigos empregados nas regressões múltiplas linear e não linear.....	205
TABELA 6.11	Exemplos de valores estimados de acordo com a regressão múltipla não linear.....	206
TABELA 6.12	Dados de regressão múltipla não-linear entre a Resistência à Compressão com tipo de moinho, percentual de substituição e idade, para os diferentes tratamentos.....	207
TABELA 6.13	Resultados do ensaio de pozolanicidade química para os cimentos C1 a C90, por CCA.....	209
TABELA 6.14	Comparação de valores médios de IAP determinados segundo a NBR 5752, “NBR 5752 Alterada” e Isaia (1995).....	214
TABELA 6.15	Consistência normal da pasta de cimento.....	215
TABELA 6.16	Tempos de pega: início, fim e diferença entre eles.....	218
TABELA 6.17	Resultados obtidos no ensaio de expansibilidade de Le Chatelier, a quente.....	222
TABELA 6.18	Tabela-resumo de classificação dos cimentos produzidos com cinza de casca de arroz.....	224

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

FIGURA I.1 Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual	2
---	---

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 Representação esquemática das formas cristalina e amorfa da sílica (a) cristalina; (b) amorfa	8
FIGURA 1.2 Micrografia da casca de arroz	10
FIGURA 1.3 Curvas TG, DTG e DTA da casca de arroz, em atmosfera de ar estático - (a) sem tratamento; (b) com tratamento químico 3 N HCl	17
FIGURA 1.4 Difractogramas de raios X de CCA produzidas a diferentes temperaturas	23
FIGURA 1.5 Difractogramas de raios X de CCA produzidas a diferentes taxas de fluxo de ar– (1) -0,55; (2) 0,55; (3) 0,666; (4) 0,8; (5) 1,98 m ³ (m ² . h) ⁻¹	23
FIGURA 1.6 Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado	26
FIGURA 1.7 Relação entre a mudança de condutividade e a temperatura de queima .	37
FIGURA 1.8 Resistência à compressão em cimentos com substituição de 0% (referência), 10, 20 e 30%, para diferentes idades.....	41

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 Séries históricas de produção de arroz no Brasil e no Rio Grande do Sul ..	46
FIGURA 2.2 Percentuais de produção de arroz por região e por estado da Região Sul – Safra 2004/05	46
FIGURA 2.3 Séries históricas de quantidade de arroz beneficiado	47
FIGURA 2.4 Quantidade e percentual de arroz beneficiado nos principais municípios beneficiadores do Rio Grande do Sul, nos dois últimos anos	48
FIGURA 2.5 Quantidades de arroz e casca levantadas em Pelotas, por engenho de grande porte e pelo somatório dos pequenos.....	50
FIGURA 2.6 Dados sobre a casca de arroz, levantados junto aos engenhos	51
FIGURA 2.7 Destino da casca descartada.....	51
FIGURA 2.8 Quantidades de casca de arroz queimada e de cinza produzida e sistema de queima: dados levantados na região de Pelotas, por empresa ..	52
FIGURA 2.9 Dados sobre sistemas de escoamento e queima – (a) Sistemas de escoamento das cinzas; (b) Sistemas de queima empregados	53
FIGURA 2.10 Destino dado à cinza de casca de arroz na região de Pelotas	53

FIGURA 2.11	Quantidades totais de arroz beneficiado, casca produzida e queimada e cinza produzida, levantadas na região de Pelotas	54
-------------	--	----

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1	Esquema geral do Programa Experimental.....	56
FIGURA 3.2	Programa Experimental – Parte II	60
FIGURA 3.3	Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários – MEV - das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, em estado natural	71
FIGURA 3.4	Análise térmica das cinzas - (a) CCA0; (b) CCA7 e (c) CCA9	73
FIGURA 3.5	Representações do espaço da cor CIE Lab - (a) sólido de cor (b) eixos ...	76
FIGURA 3.6	(a) Espectrofotômetro modelo CM-508, Minolta, instalado sobre base rígida para facilitar as leituras; (b) Amostra de CCA em pastilha prensada	77
FIGURA 3.7	Gráfico de ensaio de pozolanicidade do cimento – Método de Fratini	84
FIGURA 3.8	Moinho de bolas – (a) vista geral do moinho; (b) jarro e corpos moedores.....	85
FIGURA 3.9	Moinho Periquito - (a) Vista externa; (b) Vista interna, com jarro	85
FIGURA 3.10	Moinho Agitador - (a) Vista frontal; (b) Vista lateral	86
FIGURA 3.11	Vistas do moinho planetário - (a) fechado; (b) aberto.....	87

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1	Dados de moagem, a seco, em moinho de bolas, com corpos moedores G1, para as cinzas CCA0, CCA1 e CCA3.....	91
FIGURA 4.2	Dados de moagem, a seco, em moinho de bolas, com corpos moedores G2 e G3, para as cinzas CCA0, CCA7 e CCA9	91
FIGURA 4.3	Resultados de moagem obtidos pela CCA0, em moinho de bolas, a seco, por 120 min, em função de diferentes granulometrias dos corpos moedores	92
FIGURA 4.4	Resultados obtidos de moagem a úmido, em moinho de bolas - Pré-teste 1	94
FIGURA 4.5	Resultados obtidos das cinzas CCA0 (a) e CCA3 (b), em moinho de bolas em processos a seco e a úmido (pré-testes).....	95
FIGURA 4.6	Moagem em moinho planetário, a seco – (a) para a cinza CCA0; (b) para a cinza CCA 3	97
FIGURA 4.7	Variação do diâmetro 50% passante nos pré-testes realizados em função do tempo de moagem praticado.....	99
FIGURA 4.8	Comparação de resultados obtidos em moinho planetário, em 200 rpm, por via seca e úmida – (a) para a cinza CCA0; (b) para a cinza CCA3 ...	100

FIGURA 4.9	Resultados de moagem no moinho agitador, a seco, para as cinzas CCA0 e CCA9	102
FIGURA 4.10	Melhores resultados, em termos de diâmetro 50% passante, obtidos em diferentes processos de moagem	103
FIGURA 4.11	Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das cinzas em estado natural, com magnificação de 900 vezes – (a) CCA0; (b) CCA8	109
FIGURA 4.12	Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das cinzas micronizadas com magnificação de 900 e 3500 vezes – (a) CCA0; (b) CCA8	109
FIGURA 4.13	Diâmetros e resistência à compressão das cinza CCA0 e CCA8 de acordo com o tipo de moinho	111
FIGURA 4.14	Índice de atividade pozolânica das cinzas CCA0 e CCA8, micronizadas e moídas no moinho periquito	111
FIGURA 4.15	Influência média do tipo de moinho no IAP determinado pelos ensaios de NBR 7215 e “NBR 7215 Alterada”	119
FIGURA 4.16	Influência média do tipo de cinza no IAP determinado pelos ensaios de NBR 7215 e “NBR 7215 Alterada”	120
FIGURA 4.17	Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho de bolas	122
FIGURA 4.18	Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho agitador	123
FIGURA 4.19	Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho periquito	124
FIGURA 4.20	Porções de cinzas submetidas ao tratamento térmico TT0	127
FIGURA 4.21	Comportamento da luminância das amostras tratadas com TT0 – (a) luminância de cada cinza em função do tempo; (b) luminância de cada tempo de queima em função do tipo de cinza	128
FIGURA 4.22	Amostras de cinzas e misturas com e sem tratamento TT1	129
FIGURA 4.23	Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT1 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza	130
FIGURA 4.24	Amostras de cinzas e misturas com e sem tratamento TT2	131
FIGURA 4.25	Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT2 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza	131
FIGURA 4.26	Amostras de cinzas CCA0, CCA1 e CCA3 e da mistura M1 com e sem tratamento TT3	132
FIGURA 4.27	Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT3 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza	133

FIGURA 4.28	Gráficos qualitativos do resíduo de cloro após os tratamentos TQ1 e TQ2 – (a) uma etapa de lavagem; (b) duas etapas de lavagem	141
FIGURA 4.29	Gráficos qualitativos do resíduo de enxofre após os tratamentos TQ3 e TQ5 – (a) uma etapa de lavagem; (b) duas etapas de lavagem.....	142
FIGURA 4.30	Amostras em estado natural e submetidas aos tratamentos TQ1 e TQ2 (solução de HCl).....	144
FIGURA 4.31	Cinzas e misturas com e sem tratamento TQ3 (solução de H ₂ SO ₄)	145
FIGURA 4.32	Misturas de cinzas residuais, M1 e M2, tratadas com TQ4 (solução NaOH)	145
FIGURA 4.33	Mistura M1 tratada com TQ5 (HCl + H ₂ SO ₄).....	146
FIGURA 4.34	Localização dos parâmetros cromáticos no Espaço da cor L* a* b*	147
FIGURA 4.35	Comportamento da luminância – (a) das cinzas em relação ao tipo de tratamento; (b) tipo de tratamento em função das amostras).....	147
FIGURA 4.36	Conjunto de amostras em estado natural e submetidas aos tratamentos químicos TQ1, TQ2 e TQ3.....	148
FIGURA 4.37	Amostras de CCA0 submetidas a banhos químicos com diferentes concentrações de HCl.....	151

CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1	Esquema dos tratamentos e beneficiamentos aplicados nas cinzas CCA0, CCA7 e CCA9.....	155
FIGURA 5.2	Amostras de cinzas após beneficiamento	156
FIGURA 5.3	Comportamento da variável luminância em função do tipo de beneficiamento	158
FIGURA 5.4	Comportamento da variável luminância em função do tipo de CCA.....	159
FIGURA 5.5	Difratogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA0.....	161
FIGURA 5.6	Difratogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA7	162
FIGURA 5.7	Difratogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA9.....	162
FIGURA 5.8	Variação do diâmetro (50% passante) de cada cinza em função do tipo de beneficiamento – (a) moinho de bolas; (b) moinho periquito	164
FIGURA 5.9	Variação da área superficial de cada cinza em função do tipo de beneficiamento – (a) moinho de bolas; (b) moinho periquito	164
FIGURA 5.10	Resistência à compressão pela NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada” e água requerida	168
FIGURA 5.11	Variação da resistência à compressão das cinzas CCA0, CCA 7 e CCA9, em função do tipo de beneficiamento e tipo de moinho.....	169

FIGURA 5.12	Comportamento da resistência à compressão, aos 28 dias, confrontado com propriedades físicas das cinzas: (a) CCA0; (b) CCA7; (c) CCA9....	171
FIGURA 5.13	Influência isolada do tipo de cinza nos IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”.....	174
FIGURA 5.14	Influência isolada do tipo de tratamento nos IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”.....	175
FIGURA 5.15	Influência isolada do tipo de moinho no IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”.....	176
FIGURA 5.16	Interação do tipo de cinza com o tipo de beneficiamento	177
FIGURA 5.17	Interação entre o tipo de cinza e o tipo de moinho	178
FIGURA 5.18	Interação do tipo de beneficiamento com o tipo demoinho.....	179

CAPÍTULO 6

FIGURA 6.1	Fotografia de amostras dos cimentos produzidos, por substituição, por CCA beneficiada	184
FIGURA 6.2	Influência isolada da idade na resistência à compressão.....	192
FIGURA 6.3	Influência isolada do tipo de moinho na resistência à compressão	193
FIGURA 6.4	Influência isolada do percentual de substituição por CCA na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas..	195
FIGURA 6.5	Influência do tipo de beneficiamento na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas	196
FIGURA 6.6	Comportamento do tipo de beneficiamento em relação aos percentuais de substituição, para os dados da versão 91	197
FIGURA 6.7	Comportamento do tipo de beneficiamentos em relação ao tipo de cinza e tipo de moinho.....	198
FIGURA 6.8	Influência isolada do tipo de cinza na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas	199
FIGURA 6.9	Interação entre os fatores tipo de cinza, idade e tipo de moinho (a) Moinho de Bolas; (b) Moinho Periquito	200
FIGURA 6.10	Comportamento das cinzas em relação aos percentuais de substituição e ao tipo de moinho (a) Moinho de bolas; (b) Moinho periquito.....	201
FIGURA 6.11	Comportamento dos beneficiamentos em relação aos percentuais de substituição e ao tipo de moinho	202
FIGURA 6.12	Comportamento dos moinhos em relação aos percentuais de substituição	202
FIGURA 6.13	Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C1 a C30; C31 a C40 e C61 a C70, separados em função do beneficiamento I.....	211

FIGURA 6.14 Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C11 a C20; C41 a C50 e C71 a C80, separados em função do beneficiamento II.....	211
FIGURA 6.15 Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C1 a C30; C31 a C40 e C61 a C70, separados em função do beneficiamento III.....	212
FIGURA 6.16 Variação do IAP* em função do percentual de substituição, para cada cinza.....	213
FIGURA 6.17 Comportamento da relação a/c das pastas de cimento em função do tipo de cinza, tipo de beneficiamento e percentual de substituição para CCA moídas no moinho de bolas.....	216
FIGURA 6.18 Comportamento da relação a/c das pastas de cimento em função do tipo de cinza, tipo de beneficiamento e percentual de substituição para CCA moídas no moinho periquito.....	216
FIGURA 6.19 Início do tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao tipo de beneficiamento	219
FIGURA 6.20 Início de tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao tipo de moinho.....	219
FIGURA 6.21 Início de tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao percentual de substituição	220

INTRODUÇÃO

A cinza de casca de arroz é um resíduo agro-industrial decorrente do processo de queima da casca de arroz, sendo largamente encontrada em regiões onde este cereal é beneficiado. Após as primeiras operações de beneficiamento do grão de arroz, surge a casca, a qual, hoje, é considerada um subproduto do processo. Devido ao seu alto poder calorífico ($\approx 3000 \text{ kcal/kg}$), a casca é amplamente empregada no parque industrial como fonte de energia, tanto na própria indústria de beneficiamento para secagem e parboilização dos grãos, como em outras de diferentes ramos de atividade, tais como frigoríficos e fábricas de adubos. Outros empregos secundários para a casca de arroz também são identificados, tais como cama de aviário e de cocheiras.

Isto gera grande quantidade de cinza, pois, após a queima completa, cerca de 20% da casca de arroz é convertida em cinza, a qual ainda é considerada um resíduo agro-industrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartada ou lançada em aterros, o que gera problemas ambientais, tais como poluição de mananciais de água, do ar e do solo.

O Estado do Rio Grande do Sul é, historicamente, o maior produtor de arroz no Brasil, com cerca de 45% da produção nacional, variando este percentual conforme as condições climáticas de cada ano. O município de Pelotas, localizado na zona sul do Estado, é considerado o pólo beneficiador do Cone Sul, industrializando cerca de 700 mil t/ano, segundo levantamento realizado e de acordo com dados do Sindicato da Indústria do Arroz de Pelotas. Assim, somente na região de Pelotas, há uma produção anual de cinza de casca de arroz residual em torno de 34,5 mil toneladas, dando idéia da dimensão do problema ambiental, principalmente quando se leva em conta o volume a ser descartado, já que este é um material leve, apresentando, em estado natural, massa específica da ordem de 2000 kg/m^3 . A título de exemplo e para evidenciar o impacto ambiental, a FIG. I.1 apresenta fotos de um aterro sendo realizado com cinza de casca de arroz residual em zona próxima a um conjunto habitacional de um populoso bairro do município.

Devido ao elevado teor de sílica (90 a 95%) presente na composição química da cinza de casca de arroz – CCA – ela encontra várias aplicações tanto na construção civil, como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas ou ainda na fabricação de tijolos prensados e estabilização de solos, como na indústria cerâmica, no processo de obtenção de refratários, porcelanas e isolantes térmicos e também, na fabricação de vidros. A viabilidade técnica de aplicação da CCA em diversas áreas da indústria e da engenharia tem sido comprovada por inúmeros trabalhos experimentais como os apresentados por Sensale (2000), Dafico (2001); Rêgo (2004), entre outras.



FIG. I.1 Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual

Tradicionalmente utilizada como pozolana na Índia, a cinza de casca de arroz teve seu uso expandido pelo mundo, devido aos trabalhos de pesquisadores como P. C. Kapur (Instituto Tecnológico Kampur – Índia), P. K. Metha (Universidade de Berkeley – Califórnia) e J. Sallas Serrano (Instituto Eduardo Torroja – Madri), além de outros.

No Brasil, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos visando o aproveitamento da CCA tanto na construção civil como na área de materiais cerâmicos, principalmente nas regiões produtoras de arroz, tais como Rio Grande do Sul (Silveira, 1996; Ferreira, 1999; Fonseca, 1999; Isaia, 1995; Isaia, Gastaldini e Moraes, 2003, entre outros), Santa Catarina (Guedert, 1989; Santos, 1997; Weber, 2001; Della, 2001, entre outros) e Goiás (Rêgo, 2001 e 2004).

Apesar do elevado número de estudos visando a aplicação da cinza de casca de arroz, atualmente, a maior parte da CCA residual ainda é simplesmente descartada. O seu efetivo emprego na construção civil encontra restrições por motivos tais como sua cor escura, que confere aos cimentos, argamassas e concretos aos quais é adicionada, uma coloração também escura, e a falta de uniformidade apresentada em termos de características mineralógicas. A cor escura não é um problema de ordem técnica, mas estética e de aceitação no mercado. Já a composição mineralógica está associada à atividade pozolânica e a falta de uniformidade do material disponível implica na incerteza do grau de reatividade.

Neste trabalho são testados diferentes beneficiamentos da CCA residual visando minimizar os fatores negativos e adequar a granulometria e área superficial a um maior grau de reatividade. Desta forma, o estudo de beneficiamentos em termos de tratamentos físicos, químicos e/ou térmicos busca contribuir para a viabilidade técnica e para o emprego da CCA, retirando-a do meio ambiente e reduzindo o impacto ambiental, já que os grandes volumes trabalhados na construção civil seriam ideais para demandar o material residual disponível. Além disto, ao substituir o cimento, há redução do consumo de energia e de reservas naturais de materiais empregados na sua fabricação e, portanto, redução também na liberação de CO₂ na atmosfera e no impacto ambiental. Assim, este trabalho justifica-se na medida em que traz uma contribuição ao estudo técnico da aplicabilidade da CCA residual na construção civil, visando sua aplicação na manufatura de cimento Portland composto e/ou pozolânico, de acordo com as normas vigentes.

O objetivo geral do presente trabalho foi verificar a viabilidade técnica do emprego de cinzas de casca de arroz residuais na confecção de cimentos Portland composto e/ou pozolânico, a partir da associação de tratamentos físicos, químicos e térmicos das mesmas. O ineditismo do trabalho reside em avaliar a aplicação de tratamento químico associado a outras operações de beneficiamento em cinzas residuais e seu desempenho quando empregada na produção de cimentos.

Em função deste objetivo geral, surgiram vários objetivos específicos tais como: testar vários tratamentos físicos, químicos e/ou térmicos aplicados através de várias operações unitárias às CCA residuais de diferentes características mineralógicas e, em seguida, selecionar aqueles a serem aplicados. Para tanto, vários tipos de moinhos foram testados, além do sistema de micronização. Também foi empregado o sistema CIELAB para avaliação da alteração da cor nas cinzas após tratamento. Outro objetivo específico foi verificar a pozolanidade das cinzas beneficiadas com os tratamentos selecionados através do Índice de Atividade Pozolânica como cimento – IAP – comparando-os entre si e em relação ao índice mínimo. A partir das cinzas beneficiadas, foram produzidos cimentos com diferentes percentuais de substituição, os quais foram avaliados em relação a algumas propriedades físicas e mecânicas, como a resistência à compressão.

O trabalho traz contribuições para o estudo da cinza de casca de arroz, na medida que emprega um método preciso para avaliação da cor, propõe e avalia a associação de operações de tratamento de diferentes naturezas (físico, térmico e químico), testa diferentes maneiras de reduzir o tamanho das partículas e avalia tal redução em termos de pozolanidade, avalia o comportamento de cimentos produzidos com diferentes percentuais de substituição por CCA beneficiada, enfim abrange operações de produção e beneficiamento e desempenho do material.

O trabalho apresenta algumas restrições como, por exemplo, não realizar análise econômica das operações de beneficiamento associada ao impacto ambiental dos resíduos do tratamento químico. No entanto, entendeu-se que a pesquisa, neste momento, ficaria limitada a abordagem técnica dos tratamentos e beneficiamentos propostos, verificando sua eficácia e sua viabilidade técnica a fim de incrementar o emprego da CCA na produção de cimentos e/ou concretos.

Estrutura do Trabalho:

O trabalho está dividido em capítulos, conforme se segue:

Capítulo 1 – Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é apresentada neste capítulo, onde são abordados temas como casca de arroz, cinza de casca de arroz e cimento. Em relação à CCA, são revistos os métodos de obtenção, tratamentos, características e uso, além de sua aplicação como pozolana e, em relação ao cimento, são considerados os tipos, constituição e suas características.

Capítulo 2 – Levantamento da quantidade e características da cinza de casca de arroz residual produzida na região de Pelotas/RS

Neste capítulo são apresentados dados de um levantamento “*in loco*” na região do município de Pelotas –RS, que teve o objetivo de conhecer as quantidades de arroz beneficiado, de casca de arroz produzida e de CCA resultante e seus respectivos destinos. Além destas quantificações, foram identificados os métodos de queima e os sistemas de transporte das cinzas e seus respectivos percentuais. Neste capítulo, também são mostradas séries históricas de produção de arroz no Brasil e no Rio Grande do Sul.

Capítulo 3 – Trabalho Experimental

Constitui-se basicamente do Programa Experimental, se referindo ao planejamento experimental, aos materiais empregados, aos métodos e técnicas utilizados e aos beneficiamentos propostos.

Capítulo 4 – Tratamentos Propostos

Neste capítulo são apresentados os tratamentos propostos, suas aplicações e seus efeitos sobre várias características das cinzas. Está subdividido conforme o tipo de tratamento abordado, ou seja, físico, térmico e químico.

Também são apresentados dois experimentos preliminares, que tiveram o objetivo geral de avaliar o efeito dos equipamentos de moagem, tendo como critério o IAP

e, não somente a granulometria obtida, com a perspectiva de realizar uma seleção inicial entre eles. O experimento preliminar I avaliou comparativamente o processo de micronização com o moinho periquito, enquanto que o experimento II testou os moinhos periquito, agitador e de bolas.

Capítulo 5 – Cinzas beneficiadas: produção e avaliação

Neste capítulo são apresentados os tratamentos selecionados no capítulo 4 e os passos empregados na produção das cinzas beneficiadas. Posteriormente, foram avaliadas várias características das cinzas beneficiadas, entre elas a pozolanicidade e a cor.

Capítulo 6 – Cimentos com CCA beneficiada

Os cimentos produzidos a partir das cinzas beneficiadas, em diferentes percentuais de substituição, foram avaliados segundo algumas exigências físicas e mecânicas determinadas nas normas brasileiras de cimento, tais como resistência à compressão em diferentes idades, pozolanicidade e variação nos tempos de pega.

Capítulo 7 – Considerações Finais

São apresentadas as conclusões parciais e gerais da pesquisa, além de sugestões para próximos trabalhos a serem desenvolvidos no sentido de melhorar a qualidade da CCA residual, como forma de viabilizar seu emprego na produção de cimento e/ou concreto. O estudo da viabilidade técnica é o primeiro passo para encontrar uma solução para o destino do material, retirando-o do meio ambiente.

CAPÍTULO 1

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são revistos temas como a sílica e sua estrutura; a casca de arroz, suas características e usos; a cinza de casca de arroz, abordando métodos de obtenção, tratamentos, características e usos, além de sua aplicação como pozolana. Também é abordado um tema sobre cimentos produzidos a partir da cinza de casca de arroz: tipos, suas constituições e características.

1.1 SÍLICA – SiO_2

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

A sílica, pura ou como mineral, é o componente básico das cerâmicas, também sendo empregada como matéria-prima para a fabricação de vidros, refratários, isolantes térmicos e abrasivos. Na construção civil, em forma de areia, a sílica é usada como matéria-prima de vários materiais, tal como concretos e argamassas. A sílica ativa, geralmente obtida como subproduto do processo de fabricação de silício metálico e ligas de ferro-silício, é empregada com adição mineral na confecção de concretos convencionais e de alto desempenho.

A sílica apresenta as seguintes características: alta refratariedade, resistência a ataques químicos e choque térmico (variações bruscas de temperatura acima de 600°C), baixa condutividade térmica, resistência mecânica e, quando cristalina, polimorfismo acentuado (FONSECA, 1999).

Estruturalmente, a sílica pura pode ser amorfa ou cristalina. A FIG 1.1 mostra a diferença entre essas estruturas cristalina e amorfa, comparando um esquema de rede cristalina (a) com a de um retículo aleatório de sílica vítrea (b).

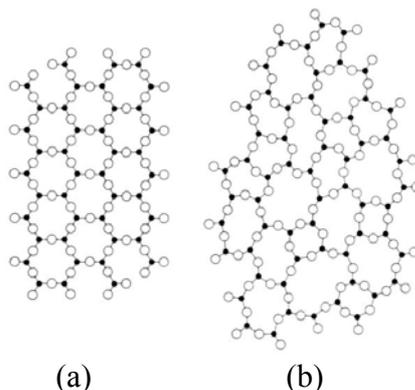


FIGURA 1.1 Representação esquemática das formas cristalina e amorfa da sílica – (a) cristalina; (b) amorfa

Fonte: KINGERY *et al.*, 1976, p.97.

Na natureza, a sílica ocorre em três diferentes formas cristalinas: quartzo, tridimita e cristobalita. Quartzo é a forma mais freqüente, enquanto a tridimita e a cristobalita são mais raras (KINGERY *et al.*, 1976).

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

A estrutura da sílica vítrea é metaestável e, portanto, tem a tendência de mudar-se lentamente para a forma cristalina mais estável, de menor energia livre. No entanto, a temperatura ambiente, esta mudança ocorre de forma infinitamente lenta. Se for mantida em temperatura acima de 870°C, por longo período, recristaliza-se em cristobalita e eventualmente em tridimita, se as condições forem favoráveis, ou seja, se houver a presença de agentes catalisadores principalmente íons alcalinos que promovem sua formação (GRIMSHAW, 1971 *apud* DELLA, 2001).

1.2 CASCA DE ARROZ – CA

A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. É um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972).

Esta variação do percentual de sílica na casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (AMICK, 1982; GOVINDARAO, 1980; HOUSTON, 1972). Patel *et al.* (1987), estudando o efeito de tratamentos químicos e térmicos em material proveniente da Índia, encontraram percentuais de 22,12% de SiO₂, 73,8% de material orgânico e água e, em torno de 4% de outros elementos constituintes como Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO e MnO₂. A lignina e a celulose são removidas durante a queima da casca.

A casca de arroz equivale a cerca de 20% do peso do grão e é composta por quatro camadas estruturais, fibrosas, esponjosas ou celulares (HOUSTON, 1972):

- epiderme externa, coberta por uma espessa cutícula de células silificadas;
- esclerênquima ou fibra hipoderme, com parede lignificada;
- célula parênquima esponjosa;
- epiderme interna.

As epidermes externa e interna podem ser observadas na FIG. 1.2. Sharma *et al.* (1984) e Nakata *et al.* (1989) apud Della (2001) concluíram em seus estudos que a sílica está mais concentrada na epiderme externa. Uma pequena, mas significativa, quantidade de sílica reside na camada interna adjacente ao grão de arroz (JAMES e RAO, 1986; KRISHNARAO, 1992). A sílica presente na casca de arroz é descrita como hidratada na forma amorfa como sílica gel e localiza-se na epiderme da casca e nos espaços do tecido epidérmico (LANNING, 1963 apud PATEL *et al.*, 1987).

Segundo Houston (1972), a sílica é transportada pela planta a partir do solo como ácido monossílico, concentrando-se na casca e no caule por evaporação da água, formando, posteriormente, a membrana sílico-celulósica.

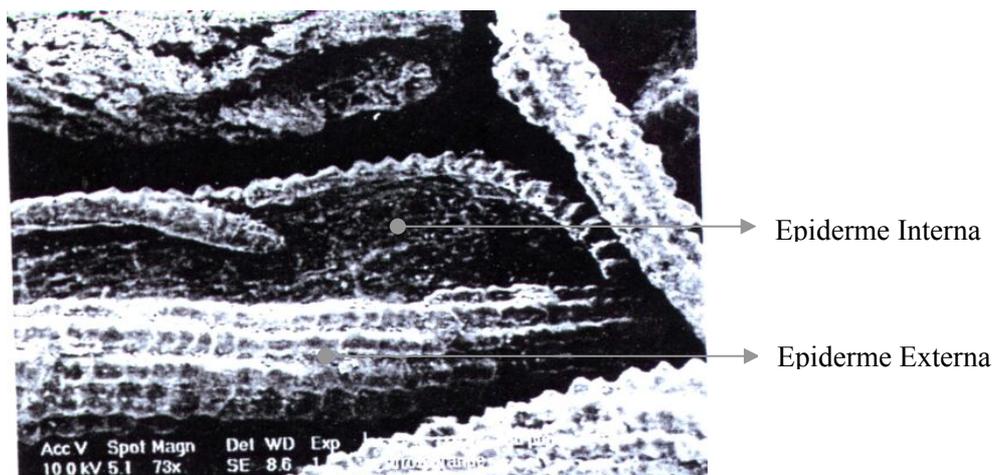


FIGURA 1.2 Micrografia da casca de arroz
 Fonte: REAL *et al.*, 1996, p.2012. Adaptado.

Considerando valores médios, a massa unitária da casca de arroz é 101 kg/m³, a massa específica aparente é de 900 kg/m³ e a massa específica de 1400 kg/m³ (AGOPYAN, 1991).

1.2.1 Usos da Casca de Arroz

A utilização da casca de arroz tem um vasto leque de abrangência e vem sendo estudada por vários autores. Em vários eventos internacionais, inúmeras utilizações da casca foram propostas e debatidas (Conference on Rice Processing, Madras-Índia, 1971; Rice by Products Utilization, Valencia-Espanha, 1974; Joint Symposium on the use of Vegetable Plants and their Fibres as Building Material, Bagdad-Índia, 1986; Vegetable Plants and their Fibres as Building Material, Salvador-Brasil, 1990). A Casca de arroz, no entanto, tem baixo valor comercial, pois o SiO₂ e as fibras contidas não possuem valor nutritivo e por isso não é usada na alimentação humana ou animal (AMICK, 1982; REAL *et al.*, 1996).

A seguir são citados alguns empregos da CA segundo Houston (1972) e Govindarao (1980), que relacionam, em seus trabalhos, um levantamento completo destas e de outras possibilidades.

a) Uso na agropecuária – é empregada no tratamento dos solos como fertilizante e corretivo. Seu valor fertilizante, embora baixo, foi analisado, em termos de K_2O , P_2O_5 , CaO e nitrogênio presente (LE HALLEM *apud* GOVINDARAO, 1980).

Na criação de animais confinados, a CA é empregada usualmente como cama, de forma corrente na avicultura e na pecuária, e, recentemente, também na suinocultura, embora ainda em caráter experimental no Brasil (CORRÊA, 1998; MORÉS, 2000). Posteriormente, o material da cama é misturado ao solo, agora, com alto valor fertilizante devido a incorporação de nutrientes provenientes dos dejetos dos animais.

b) Uso na construção civil – associada à argila, pode ser empregada na fabricação de tijolos, painéis e telhas com bom isolamento de calor e ainda concretos de baixa densidade (GOVINDARAO, 1980), que encontram aplicação, por exemplo, em produtos pré-moldados (ISAIA, 1987).

c) Uso na obtenção de sílica com alto grau de pureza – vários autores obtiveram sílica com alto grau de pureza a partir da combustão da CA tratada com banhos ácidos em atmosferas inertes ou não (AMICK, 1982; KRISHNARAO e GODKHINDI, 1992; MISHRA *et al.*, 1985; PATEL *et al.*, 1987; REAL *et al.*, 1996; SOUZA *et al.*, 2000; YALÇIN e SERVİNÇ, 2001), visando sua aplicação na indústria cerâmica, fabricação de fotocélulas e fibras de carvão de silício, entre outros.

d) Uso na geração de energia – devido ao seu alto poder calorífico, a CA surgiu, naturalmente, como combustível alternativo dentro das próprias indústrias de beneficiamento do arroz, substituindo a lenha com custo praticamente nulo, além de eliminar volumosas quantidades do material. O poder calorífico da CA é variável, dependendo de sua umidade e das condições de plantação, segundo Salas *et al.* (1986), vai de 13810 a 15070 kJ/kg. Chatterjee *apud* Krishnarao *et al.* (2001) indica um valor inferior, da ordem de 12560 kJ/kg, já Agopyan (1991) trabalhou com casca de arroz originária de São Paulo, com poder calorífico de 13045 kJ/kg.

A casca inicialmente empregada para geração de calor necessário para a secagem e parboilização dos grãos de arroz, passou também a ser utilizada em outras agroindústrias, como por exemplo, em sistema energético de refrigeração em frigoríficos. Os dados do levantamento realizado em Pelotas/RS e apresentado no Cap. 2 constataam esta expansão do emprego da casca de arroz como fonte de energia em outras indústrias que não somente os engenhos.

Desde 1989, com a realização do 1º Seminário sobre o Aproveitamento da Casca do Arroz, em Uruguaiana-RS, existem estudos e experimentos pilotos para viabilizar o uso racional da CA no Estado, na geração de energia através da construção de termoelétricas.

Com o objetivo de gerar energia a partir de fontes renováveis, foram construídas duas usinas termoelétricas no Estado: UTE Dom Pedrito, com capacidade de 6MW e UTE Capão do Leão, na região de Pelotas, com capacidade de 8 MW, ambas empregando a CA como combustível.

Decorrente da combustão da CA, empregada para a geração de energia, resulta a cinza de casca de arroz – CCA - residual.

1.3 A CINZA DE CASCA DE ARROZ - CCA

A cinza de casca de arroz é o resíduo da cadeia produtiva do arroz. A presença da sílica na casca de arroz já é conhecida desde 1938 (MARTIN *apud* KRISHNARAO *et al.*, 2001). A cinza de casca de arroz, segundo James e Rao (1986-1 e 2), é uma importante fonte renovável de sílica, pois contém aproximadamente 95% de sílica, com percentuais menores de álcalis e outros elementos.

A CCA é um material leve, volumoso e altamente poroso. Equivale a cerca de 20% da casca queimada. Segundo Silveira e Dal Molin (1995), pode ser reduzido a pó fino com um consumo de energia relativamente baixo.

1.3.1 Métodos de Obtenção

Dependendo do método empregado para liberação, pode ser obtida da casca de arroz, uma sílica altamente reativa. Além do processo de simples combustão, a sílica pode ser obtida através de tratamentos físico-químicos da casca, seguido de queima e através de processo microbiológico.

1.3.1.1 Processo de combustão

A cinza da casca de arroz é o resultado do processo de combustão. O processo de combustão empregado depende da combinação de três variáveis: tipo de equipamento utilizado (a céu aberto, fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado); temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo.

A combustão controlada pode ser um método eficiente para liberar a sílica da casca de arroz. Porém, as propriedades de SiO₂ e a quantidade de C resultantes na cinza (resíduo) dependem significativamente das condições que prevalecem durante a combustão (James e Rao, 1986- 2 e 3). A CCA tende a ter a cor preta devido à presença de carbono residual. No entanto, ela também pode ser cinza, púrpura ou branca dependendo das impurezas presentes e das condições de queima (HUSTON, 1972).

James e Rao (1986-1) estudaram o comportamento da decomposição térmica da casca de arroz, queimando amostras a temperaturas que variaram de 300 a 900°C, por tempos de 1 a 30 horas. Neste estudo, sob atmosfera de ar estático, identificaram três estágios, onde a primeira perda de massa é atribuída à perda da água adsorvida e ocorre entre 50 e 100°C. A segunda e maior perda de massa, em torno de 45 a 65%, é atribuída ao desdobramento da celulose constituinte em combustíveis voláteis, água e dióxido de carbono. A isoterma registrada aos 460°C corresponde à decomposição da lignina e da celulose.

Ainda, segundo os autores, James e Rao (1986-2) o tratamento térmico mínimo para obter cinzas brancas é queimar a casca de arroz a 400°C, por 12 horas. Com combinações de temperaturas mais elevadas e tempos menores, as cinzas serão coloridas, por conterem matriz orgânica decomposta parcialmente ou carbono não oxidado.

A queima da CA até 500°C gera como resíduo uma cinza preta, rica em carbonos fixos e constituída basicamente de sílica amorfa, segundo Bartha (1995). A partir de 750°C, a cinza torna-se mais clara, devido à oxidação dos carbonos fixos, e a sílica mais cristalina. A remoção dos carbonos fixos se dá pela presença do oxigênio no ar.

As cinzas obtidas durante a combustão da CA apresentam formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina), dependendo do tipo de queima (grelha, leito fluidizado), tempo e temperatura de oxidação. A TAB. 1.1 apresenta de forma reduzida, o efeito de condições de queima nas propriedades de algumas CCA, segundo Metha (1977).

TABELA 1.1 Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA

Condições de queima (°C/ tempo)	Ambiente de combustão	Propriedades da CCA	
		Estrutura da sílica	Área superficial (m ² /g)
500 – 600 / 1 min.	Moderada oxidação	amorfa	122
500 – 600 / 30 min.	Moderada oxidação	amorfa	97
500 - 600 / 2 horas	Moderada oxidação	amorfa	76
700 – 800 / 15 min.	Moderada oxidação	amorfa	42
700 – 800 / 15 min	Alta oxidação	Cristalina parcial	10 – 6
> 800 / > 1h	Alta oxidação	Cristalina	< 5

Fonte: METHA, 1977.

Vários autores citados por Isaia (1995) estudaram a questão da influência das condições de temperatura e tempo de exposição no processo de combustão da CCA:

- Hwang e Wu (1989) apresentaram as propriedades físicas e mecânicas das pastas e argamassas de cimento com cinza de casca de arroz queimadas entre 400 e 1200 °C;
- Boateng e Skeete (1990) entendem que a temperatura de queima deve manter-se entre 800 e 900°C para a cinza se apresentar amorfa e reativa;
- Sugita *et al.* (1993) obtiveram maior atividade pozolânica para temperaturas inferiores a 600 °C e superiores a 500 °C e por tempo não superior a 60 minutos. Para estes autores a melhor temperatura de queima encontra-se na faixa de 400 a 660 °C. Sugita (1992) patenteou dois diferentes processos de queima de casca de arroz visando obter cinzas com cor branca e altamente reativas. Um dos processos emprega duas fornalhas

rotativas ligadas em série, onde a queima é realizada em duas etapas e o outro, um dispositivo onde a casca é disposta em uma pilha de forma cônica em torno de uma chaminé central e então, queimada. A função da chaminé é propiciar a circulação do ar na massa de casca em processo de queima, garantindo oxigênio necessário às reações de combustão.

Mehta e Pitt (1974) apresentaram e patentearam um processo de produção em larga escala, com baixo custo e temperatura controlada ($< 550\text{ }^{\circ}\text{C}$), obtendo CCA constituída essencialmente de sílica em estado amorfo.

Dafico e Prudêncio Jr. (2002) investigaram as condições de queima da casca de arroz adequadas para a produção de pozolana branca. Os autores acreditam que a CCA quando branca tem maior aceitação no mercado convencional como pozolana, além de um grande número de outras utilizações como o emprego na produção de blocos de concreto decorativos, telhas claras, ladrilhos e outros. Para tanto projetaram e construíram uma fornalha de leito fixo com diferentes possibilidades de injeção de ar e medição da temperatura. Empregando método de pirólise com fluxo de ar invertido, seguida de combustão do carbono residual na fornalha de leito fixo, obtiveram cinza branca, com baixo teor de carbono e amorfa. Estas cinzas apresentaram elevada reatividade química e necessitaram ser suficientemente moídas para ter um bom desempenho como pozolana.

1.3.1.2 Tratamentos químico-térmicos da CA

Segundo Fonseca (1999), estes tratamentos baseiam-se no processo proposto por Real (1960), que empregou um ataque químico na CA com ácido clorídrico, seguido de várias lavagens com água e posterior queima a 500°C . O ataque químico libera os álcalis, que durante a lavagem são removidos, propiciando a obtenção de percentual mais elevado de sílica na calcinação da casca, a temperaturas mais baixas.

Porém, segundo Souza *et al.* (2000) foi Amick (1982) o primeiro a estudar de maneira sistemática a aplicação de tratamento ácido seguido de decomposição térmica em casca de arroz com o objetivo de obter sílica pura e em estado amorfo.

Vários autores empregaram banhos químicos na casca, principalmente ácidos, seguidos de decomposição térmica com o objetivo de obter matéria-prima, como o silício, para a fabricação de produtos industriais como células fotovoltaicas para geração de energia e componentes para computadores, a partir da sílica extraída da casca de arroz. Com isto, buscaram reduzir o nível de impurezas, obtendo sílica pura, branca e em estado vítreo.

Amick (1982), em seu experimento, comparou os percentuais de impurezas em quatro amostras preparadas com diferentes tratamentos: em estado natural; simplesmente lavadas com água; em banho com solução aquosa com duas diferentes concentrações, 1:3 e 1:1 de HCl. O autor constatou que, empregando a solução de aquosa de 1:1 de HCl, foi possível reduzir o nível de impurezas de 5% para 0,15% do peso.

Hunt *et al.* (1984) analisaram amostras de CA de diversas partes do mundo, não identificando diferenças significativas nas concentrações de impurezas. Para redução do nível de impurezas empregaram banhos com solução de ácido clorídrico em água deionizada. Além das concentrações de 1:1 e 1:3, experimentadas por Amick (1982), foi testada a razão de 1:10 com fervura por 15 min. Esta concentração mais baixa, desde que fervida, se mostrou tão efetiva na purificação da sílica quanto as soluções mais concentradas. Quando aquecida a 50°C, seu desempenho foi inferior, mesmo que o tempo aumente até 5h.

Mishra *et al.* (1985) empregaram banho químico com solução de ácido clorídrico. Obtiveram cinza branca com 99% de sílica a partir da queima da casca de arroz tratada quimicamente, a temperatura inferior a 500°C. Com banho em solução de ácido clorídrico, a temperatura moderada entre 50 e 60°C, durante 2 horas, foi possível remover as impurezas solúveis. Após o banho, o material foi lavado em água destilada, e seco.

Chakraverty *et al.* (1985) estudaram a decomposição térmica da casca de arroz com e sem tratamento químico. Identificaram três estágios de perda de massa: remoção da umidade (40 a 150°C), liberação da matriz volátil (215 a 350°C) e queima do material combustível (350 a 690°C). A temperatura final decresce com o tratamento ácido. A FIG. 1.3 mostra os gráficos com as curvas TG e DTG e DTA da casca sem tratamento (a) e com tratamento (b). A decomposição térmica da casca de arroz é um processo exotérmico.

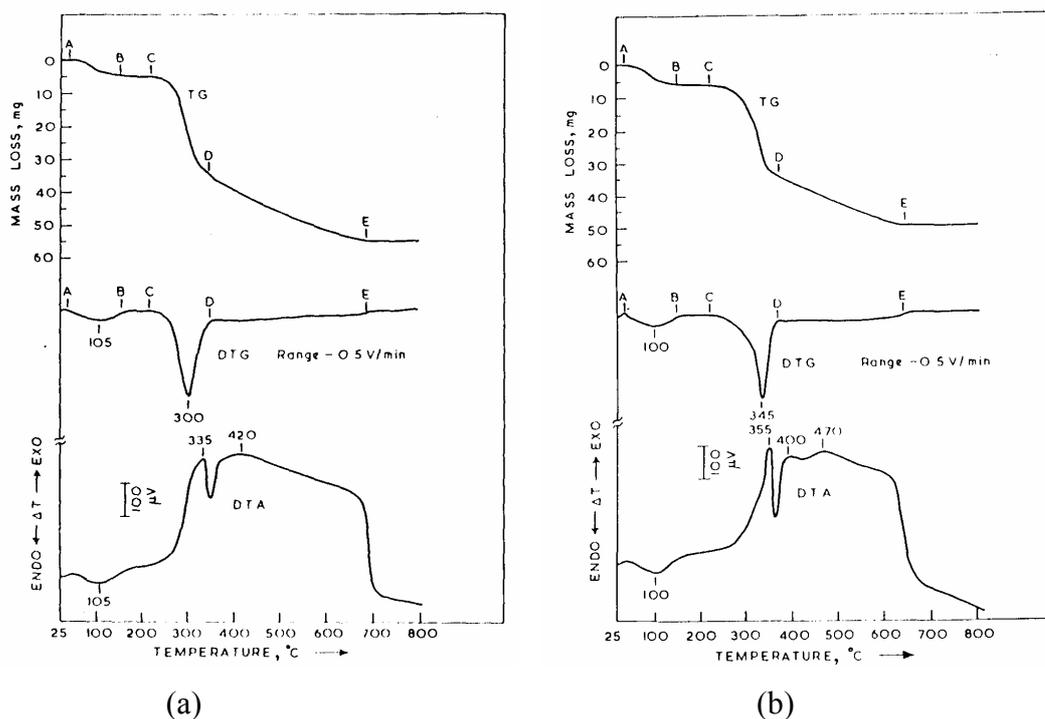


FIGURA 1.3 Curvas TG, DTG e DTA da casca de arroz, em atmosfera de ar estático - (a) sem tratamento; (b) com tratamento químico 3 N HCl
 Fonte: CHAKRAVERTY *et al.*, 1985, pp.268;270.

Patel *et al.* (1987), com o mesmo objetivo, fizeram uma avaliação sistemática do C e da sílica contidos na casca de arroz a partir de tratamentos térmicos e químicos. Os tratamentos químicos consistiram em banhos com HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH e NH₄OH., enquanto os térmicos foram conduzidos até 1000°C em diferentes atmosferas, tais como: ar, oxigênio e argônio. Como melhor resultado foi obtida uma sílica com 99% de grau de pureza, a partir do tratamento da casca de arroz com HCl. A pureza das sílicas obtidas foi variável com a concentração dos ácidos e com o tempo do banho. No experimento foram usadas concentrações variando de 4 a 12 N HCl e tempo de banho de 1 a 12 horas. Para temperaturas abaixo de 700°C não foi registrada qualquer transformação de forma amorfa em cristalina.

Chakraverty *et al.* (1988) estudaram o efeito do tratamento ácido na casca de arroz na remoção de ingredientes metálicos e a combustão em diferentes temperaturas. Banho com solução de 1 N HCl se mostrou eficiente na remoção substancial destes ingredientes e na produção de cinza completamente branca. A combustão completa variou de 500 °C, por 5 horas a 700°C por 1,5 horas, sendo que a temperatura mínima requerida

foi de 500°C. O tratamento ácido não afetou a amorficidade da sílica. As cinzas obtidas por completa combustão da casca tratada com ácido resultaram completamente brancas. Por outro lado, sob condições semelhantes, as cinzas obtidas com casca sem tratamento, resultaram marrom claro.

Real *et al.* (1996), com o objetivo de desenvolver um processo de obtenção de sílica pura com alta área superficial a partir da CA, realizaram um experimento com banhos de solução de ácido clorídrico antes e depois da combustão da casca. Obtiveram cinzas com elevado percentual de sílica em estado amorfo, conforme pode ser observado na TAB. 1.2. Entretanto, constataram que a casca queimada antes do banho ácido resultou em cinza com baixa área superficial (BET < 1,0 m²/g), enquanto a outra, 260 m²/g quando queimada a 600°C e 211 m²/g, a 800°C. Segundo os autores, este baixo valor pode ser devido à interação da sílica com algumas impurezas, durante o processo de combustão, principalmente, o íon K⁺.

Souza *et al.* (2000), a fim de obter sílica amorfa e branca, estudaram três tipos de tratamentos químicos da casca de arroz: solução de ácido clorídrico (20%vol) por 24 horas, seguida de solução de ácido sulfúrico, por mais 24 horas, a pressão atmosférica; solução de ácido sulfúrico (3,0%) a pressão de 7 atm, por uma hora; procedimentos idênticos ao tratamento anterior seguido de banho em ácido acético. Posteriormente, as cascas de arroz foram lavadas com água a temperatura ambiente e submetidas à combustão a 550°C, por duas horas. Segundo os autores, foram obtidas cinzas com elevado teor de sílica (até 99%), brancas e em estado amorfo, com área superficial variando de 260 m²/g a 480 m²/g.

Krishnarao *et al.* (2001) também propuseram tratamento ácido na casca de arroz com o objetivo de obter CCA branca e com elevado percentual de sílica. As amostras de CA após serem lavadas, foram tratadas com soluções de HCl em diferentes concentrações: 3 N HCl e 5,6 N HCl em água deionizada e fervidas por 1 hora; em seguida, foram lavadas com água deionizada, filtradas e secas a 110°C. Posteriormente, foram formados dois lotes iguais de amostras, ambos calcinados em forno de mufla a temperaturas de 400, 500, 600 e 700°C por 4 horas: o primeiro, sofreu um aquecimento lento, com taxa de 5°C/min, sendo introduzido no forno a temperatura ambiente; o segundo, com aquecimento rápido, foi introduzido no forno pré aquecido a temperatura estabelecida.

Os resultados mostraram que a cor da cinza resultou mais clara, quanto maior a temperatura. As cascas tratadas e queimadas a 700°C renderam cinzas brancas brilhantes. A alta taxa de aquecimento não foi considerável na formação das cinzas brancas. Nas cinzas tratadas com ácido, o nível de impurezas foi consideravelmente menor do que nas não tratadas.

As cascas de arroz tratadas e não tratadas se apresentam em estado amorfo e quando calcinadas, permanecem amorfas, sendo identificado somente um pico na amostra não tratada e calcinada a 700°C, quando submetida a aquecimento rápido.

Yalçın e Sevinç (2001) testaram diversos tratamentos químicos. Inicialmente todas as amostras de casca de arroz, provenientes da Turquia, foram lavadas e secas à 110°C, por 24 horas. Os tratamentos químicos propostos foram banhos ácidos com HCl e H₂SO₄ e alcalinos com solução de 3% (v/v) NaOH, por 24 horas, em temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram lavadas com água destilada e secas à 110°C. A incineração foi feita em diferentes atmosferas: ar estático, por 4 horas; fluxo de ar por 3 horas; fluxo de argônio por 3 horas mais 1 hora com fluxo de oxigênio; fluxo de oxigênio por 2 horas. Além disto, outras amostras não tratadas foram calcinadas, em forno de mufla, a temperaturas de 500, 600, 700 e 800°C.

A cinza incinerada com fluxo de oxigênio resultou com maior percentual de sílica (98,32%). Entre os diversos tratamentos, o que levou aos maiores percentuais de sílica foram os banhos ácidos (com solução de HCl, pré e pós incineração – 99,66%; com solução de 110°C, por 24 horas. Os tratamentos químicos propostos foram banhos ácidos com HCl e H₂SO₄ – 99,60%). Todas as amostras se apresentaram em estado amorfo, não sendo identificada nenhuma estrutura cristalina. Quanto à área superficial, o valor mais elevado (321 m²/g) foi o da cinza obtida da casca de arroz submetida a banho de solução de HCl, pré incineração.

A TAB 1.2 apresenta, de forma resumida, a composição química de CCA obtidas a partir de casca de arroz submetidas a diferentes tratamentos, segundo vários autores.

TABELA 1.2 Composição química das amostras CCA obtidas com diferentes tratamentos, por diversos autores

Autor / Tratamento	Composição típica em óxidos (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
James e Rao (1986-2)											
TT-400°C 12h	94,43	-	1,3	0,38	0,65	0,90	0,55	1,32	-	-	3,0
Real et al. (1996)											
TQ/HCl pós	98,92	0,39	-	0,06	-	-	-	0,52	0,04	-	
TQ/HCl pré	99,44	0,40	-	0,05	-	-	-	0,01	0,04	-	
Souza et al. (2000)											
TQ – HS*	98,94	0,08	0,06	0,001	0,05	0,75	0,01	0,10	0,01		
TQ – HCl	99,69	0,06	0,05	0,001	0,03	0,05	0,01	0,10	0,01		
TQ – HS*	99,22	0,08	0,05	0,001	0,03	0,50	0,01	0,10	0,01		
Krishnarao et al. (2001)											
TT / aq. lento	90,2	0,268	0,029	0,107	0,027	0,069	0,101	2,120		0,470	2,39
TT/aq. rápido	89,8	0,291	0,040	0,117	0,033	0,063	0,089	2,580		0,430	2,29
TQ HCl**	92,2	0,068	0,011	0,001	0,006	0,001	0,012	0,018		0,011	7,6
TQ – HCl**	92,3	0,060	0,083	0,003	0,002	0,001	0,015	0,013		0,005	6,8
TT – tratamento térmico			TQ – tratamento químico				PF – perda ao fogo				
* - diferentes pressões			** - diferentes concentrações								

Os dados da TAB. 1.2 mostram que, em geral, as cinzas oriundas de tratamento químico da casca apresentam maior percentual de sílica e menor teor de álcalis. Em uma das cinzas produzidas por Sousa *et al.* (2000) foi observado o mais elevado teor de sílica, 99,69% e, portanto, com baixíssimos percentuais de impurezas.

1.3.1.3 Tratamento da CA por Ataque Microbiológico

Este tratamento visa obter sílica da casca de arroz por desagregação da mesma por ataque microbiológico, empregando fungos, a temperatura ambiente e sem necessidade de queima posterior (SOUZA *et al.*, 2000).

1.3.2 Características da CCA

As cinzas são caracterizadas segundo vários parâmetros. A seguir é feita uma revisão das características de amostras de CCA, segundo alguns parâmetros como composição química, estrutura, cor e área superficial.

1.3.2.1 Composição química

Independentemente dos parâmetros empregados no processo de combustão, a composição química das CCA sempre apresenta elevados teores de sílica, conforme pode ser observado na TAB. 1.3, divulgada por Silveira (1996) e complementada neste trabalho.

As características da cinza de casca de arroz também dependem da origem do arroz, conforme já comentado no item 1.2. Segundo Mehta (1994), cinzas obtidas a partir de casca de arroz de diferentes origens, embora queimadas com controle de combustão e pelo mesmo método, apresentaram características diferentes: uma cinza originária da Louisiana apresentou um percentual de 100% de sílica amorfa, enquanto outra, de Arkansas, 90 %.

Observa-se na TAB. 1.3 que a sílica é o elemento constituinte com maior percentual, variando de 72,1 a 94,7%. Os baixos teores de sílica, por exemplo, 72,1 e 78,6%, se refletem no elevado percentual de perda ao fogo, respectivamente 24,3 e 11,8% e não num acréscimo significativo nas impurezas. Isto indica que são cinzas mal queimadas com grande quantidade de carbono residual.

1.3.2.2 Características mineralógicas

A temperatura e o tempo de queima embora influenciem pouco na composição química, são fatores determinantes na estrutura mineralógica da cinza.

A análise da composição mineralógica de cinzas, obtidas em diferentes temperaturas de queima, mostra que a estrutura da sílica contida na CCA é afetada pela temperatura e pelo tempo de queima (COOK *et al.*, 1976; DASS, 1983; FERREIRA, 1996; HAMAD e KHATTAB, 1981; JAMES E RAO, 1986; MEHTA E PITT, 1977).

TABELA 1.3 Composição química de cinza da casca de arroz, segundo vários autores

Amostra / Tratamento	Composição típica em óxidos (% em peso)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
	91,97	nd	0,50	nd	1,05	0,85	1,75	0,60	nd	nd	nd
Cook (1977)	93,0	0,60	0,15	nd	0,42	0,43	0,04	1,05	nd	nd	2,77
Sallas (1986)	91,26	0,94	0,37	nd	0,88	2,15	nd	nd	nd	nd	nd
Cincotto(1988)	94,70	0,09	1,46	nd	0,95	0,99	0,04	1,75	nd	nd	7,29
Guedert (1989)	93,11	0,92	0,40	nd	0,85	0,52	0,12	1,12	nd	nd	nd
Farias (1990)	91,78	0,60	0,34	nd	0,52	0,50	0,11	1,30	nd	nd	nd
Sugita (1992)	90,0	0,1	0,40	nd	0,3	0,40	0,06	2,41	nd	nd	4,2
Isaia (1995)	78,6	2,3	2,3	nd	0,80	1,0	0,01	0,56	nd	nd	11,80
Fonseca (1999)	83,68	0,17	0,17	0,66	nd	1,03	nd	3,65	nd	1,34	8,54
Della (2001)	72,1	0,3	0,15	0,15	0,7	0,43	0,5	0,72	0,05	0,6	24,3
Qingge (2005)	92,4	0,3	0,40	0,11	0,30	0,70	0,07	2,54	nd	0,11	2,31

PF – perda ao fogo nd – não divulgado

Fonte: SILVEIRA, 1996, p.40. – adaptado e complementado

Hamad e Khattab (1981) estudaram o efeito do processo de combustão na estrutura da sílica proveniente da CCA. Em sua pesquisa empregaram casca de arroz proveniente do Egito e temperatura de combustão variando entre 500°C e 1150°C. A FIG. 1.4 apresenta difratogramas de raios X de CCA obtidas nas temperaturas estudadas, onde se percebe que as cinzas produzidas com temperaturas relativamente baixas (500°C a 600°C) apresentaram sílica em estado amorfo. A 800°C foi detectada cristobalita e, a 1150°C, cristobalita e tridimita.

Outro fator que também influencia a estrutura da sílica foi estudado por Hamad e Khattab (1981): a taxa de fluxo de ar no processo de combustão. A FIG. 1.5 mostra difratogramas de raios X de CCA obtidas com diferentes taxas de fluxo de ar. Em função destes resultados, os autores concluíram que com baixas taxas ocorre sílica amorfa, com moderadas taxas foi detectado a presença de quartzo e com altas taxas de fluxo de ar, a cristobalita foi observada.

Quanto à técnica empregada para caracterizar mineralógicamente a CCA, a difração de raios X é bastante utilizada, embora sua avaliação seja qualitativa. O método químico é outra técnica que pode ser utilizada, possuindo a vantagem de ser um ensaio de menor custo (VIEIRA *et al.*, 2005).

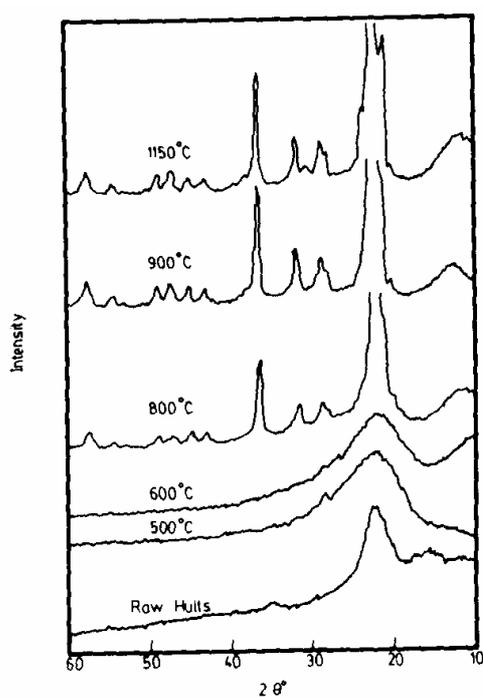


FIGURA 1.4 Difratoogramas de raios X de CCA produzidas a diferentes temperaturas
Fonte: HAMAD e KHATTAB, 1981, p.345.

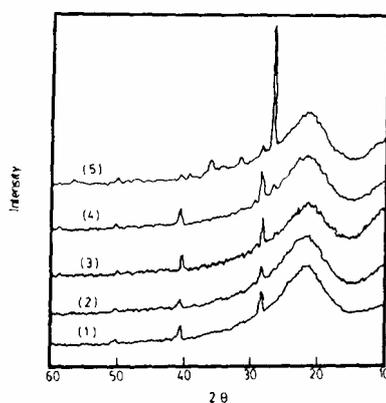


FIGURA 1.5 Difratoogramas de raios X de CCA produzidas a diferentes taxas de fluxo de ar— (1) -0,55; (2) 0,55; (3) 0,666; (4) 0,8; (5) 1,98 $\text{m}^3 (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$
Fonte: HAMAD e KHATTAB, 1981, p.347.

Payá *et al.* (2001) prepuseram um método analítico rápido a partir de método químico especificado na literatura - Kreshkov *et al.*, 1965. O estudo foi comparativo com método especificado na norma espanhola UNE 80225/93 – *Métodos de ensayo de cementos – Análisis químico. Determinación del dióxido de silício (SiO₂) reactivo em los cementos, em las puzolanas y em las cenizas volantes.*

Vieira *et al.* (2005) determinaram comparativamente o teor de amorfismo da CCA através das técnicas de difração de raios X e do método químico especificado na norma espanhola UNE 80225/93. Os autores identificaram diferenças na quantidade de sílica amorfa encontrada pelos métodos utilizados, concluindo que é necessário um estudo mais aprofundado das técnicas, para confirmar a eficácia e precisão dos ensaios.

1.3.2.3 Cor da cinza

A cinza de casca de arroz, em geral, resulta em cor que varia do cinza ao preto, devido à presença de impurezas inorgânicas junto ao carbono não queimado, ou ainda branco-rosada. A cor da CCA depende também das condições de queima. Temperaturas elevadas e longo tempo de exposição geram cinzas branco-rosadas, o que indica a presença de sílica na forma cristalina (BOATENG e SKEETE, 1990).

A remoção do carbono não queimado por uma nova queima a elevadas temperaturas (>700°C) leva à cristalização da sílica amorfa em cristobalita e tridimita (JONES, J. D. *apud* KRISHNARAO *et al.*, 2001). O carbono não queimado não pode ser removido por oxidação por que está fixado com a sílica.

A maior impureza nas CA é o potássio. O potássio acelera a fixação do carbono na CCA. Óxido de potássio dissocia-se quando aquecido a 350°C formando potássio metálico, cujo ponto de fusão é 64°C. O Potássio na CA atua como fundente e acelera a cristalização da sílica amorfa na forma de cristobalita.

A sílica é hábil em incorporar cátions como Na⁺, K⁺ e Ca₂⁺ na rede formada por tetraedros de SiO₂. A tridimita é a sílica polimorfa com baixa densidade e é a única fase da sílica que é apta a acomodar interticialmente cations K⁺ na rede. (WITHERS *et al.*, 1994 e ROY e ROY, 1964 *apud* REAL *et al.*, 1996). Assim, a adição de cations K⁺ na sílica, estabiliza a estrutura tridimita. Cristobalita é o produto cristalizado obtido da sílica sem adições, enquanto tridimita é a forma cristalizada da sílica carregada com cations K⁺.

A presença de partículas escuras (pretas) na CCA é devida ao carbono fixo (KRISHNARAO *et al*, 2001). Isto acontece devido à superfície fundente da sílica em presença de impureza K_2O . No tratamento ácido, a impureza é removida e daí, não aparece carbono na cinza. Em amostras não tratadas, aquecidas rapidamente, não há oxidação do carbono, mas a superfície fundente ocorre, resultando grande quantidade de partículas pretas. O aquecimento lento permite a oxidação do carbono antes de ocorrer uma fusão incipiente, que levaria a uma cinza com partículas pretas. Contudo, segundo os autores, em temperatura baixa ($400^\circ C$) a oxidação do carbono na CA tratada é vagarosa. Por exemplo: CA tratada com HCl e, depois, queimada por 16 horas a $400^\circ C$, resultou numa cinza razoavelmente clara, pois a oxidação do carbono foi lenta.

Segundo, James e Rao (1986-2), as cores das cinzas obtidas em seu experimento, variaram: preto, marrom, marrom claro, aproximadamente branco a branco. Tais colorações verificaram-se em cinzas obtidas a partir da queima da casca de arroz a temperaturas que variaram de $300^\circ C$ a $900^\circ C$, por tempo que variou de 1 a 30 horas. Cinzas brancas foram obtidas a partir de temperatura de $400^\circ C$, por 12 horas.

1.3.2.4 Características físicas

As características físicas usualmente determinadas para a CCA são: massa específica; área superficial, tamanho das partículas, distribuição granulométrica, umidade e perda ao fogo.

Como exemplo, na TAB. 1.4 são apresentadas medidas de área superficial e massa específica, obtidas por Agopyan (1991) para uma CCA proveniente de São Paulo, e por Hoppe *et al.* (2005) para CCA proveniente de usina termelétrica, com queima controlada, do Rio Grande do Sul.

TABELA 1.4 Exemplos de características físicas da CCA

Autor	Tipo de forno	Área Superficial		Massa Específica (kg/m^3)
		Blaine (m^2/kg)	Adsorção N -Bet (m^2/g)	
AGOPYAN (1991)	Comum Leito fluidizado	145	18,5	1880
		419	6,0	2110
HOPPE <i>et al.</i> (2005)	Usina termelétrica	-	4,0	2100

1.3.2.5 Características Microestruturais

Segundo Agopyan (1991), a microestrutura da CCA é diferente conforme o tipo de queima. Como exemplo, são apresentadas na FIG. 1.6 micrografias de uma mesma cinza produzida em leito fluidizado e forno comum. De acordo com o autor, a cinza do leito fluidizado tem uma estrutura porosa, como a da própria casca, enquanto a cinza comum tem uma fração de estrutura compacta e granulada, provavelmente devido ao longo período de residência no forno.

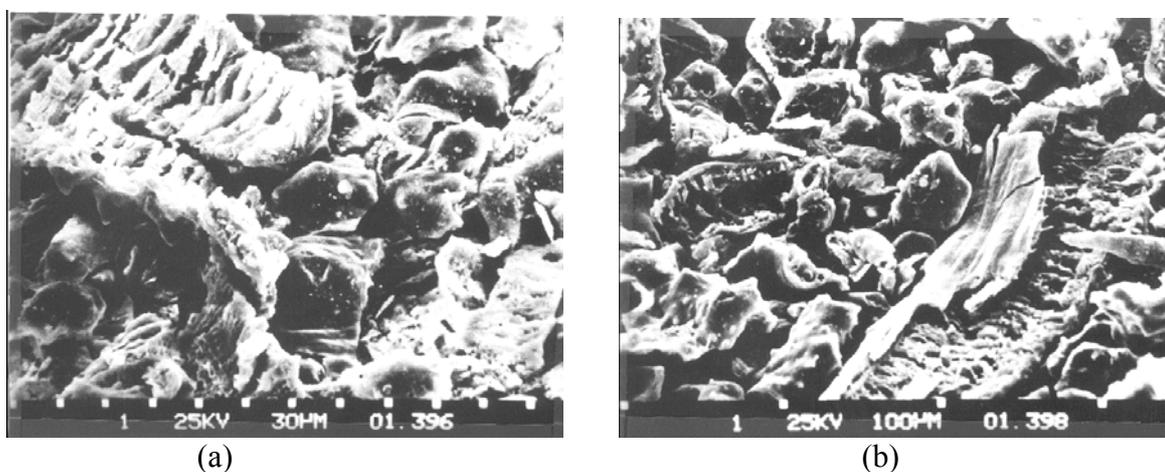


FIGURA 1.6 Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado

Fonte: AGOPYAN, 1991, pp.53;54.

1.3.3 **Tratamentos da cinza de casca de arroz**

Neste item, é feita uma revisão sobre os tratamentos térmicos e físicos aplicados na cinza de casca de arroz. Tais tratamentos tiveram os objetivos de obter sílica ativa, de clarear a CCA, de incrementar a atividade pozolânica do material, ou ainda de estudar a combinação de mais de um deles.

1.3.3.1 Tratamento Térmico da CCA

Segundo James e Rao (1986-2), cinzas produzidas a partir da queima da casca de arroz a baixas temperaturas e posteriormente aquecidas a altas temperaturas, assemelham-se a cinzas produzidas diretamente a altas temperaturas. Da mesma forma, uma cinza obtida a uma dada temperatura em t horas ou obtida em vários intervalos que totalizem o mesmo tempo t, na mesma temperatura, terão características mineralógicas semelhantes.

Della (2001) aplicou tratamento térmico em CCA residual proveniente do Estado de Santa Catarina com o objetivo de obter sílica ativa a partir deste processamento. Amostras de cinza foram queimadas a temperaturas de 400, 500, 600 e 700°C, por períodos de 1, 3 e 6 horas. A redução do teor de carbono ficou evidenciada pela constatação de mudança da coloração das amostras tratadas. As modificações na cor foram influenciadas pelas diferentes temperaturas e tempos de queima: quanto maiores o tempo e a temperatura, mais claras ficaram as cinzas. As amostras sem tratamento apresentavam-se amorfas e, após os tratamentos térmicos aplicados, permaneceram amorfas, inclusive aquelas submetidas a 700°C.

Dafico (2001) projetou uma minifornalha de leito fixo, em escala de laboratório, para requeimar a CCA juntamente com uma porção de casca de arroz, a temperaturas baixas, inferiores a 550°C. Weber (2001) aplicou o mesmo tratamento térmico, porém em um forno em escala semi-industrial. Ambos obtiveram como resultante uma cinza de cor branca, porém, em termos mineralógicos, os resultados não foram semelhantes, pois no experimento de Dafico (2001) não foi constatada a ocorrência de mudanças de mineralogia das cinzas, enquanto no de Weber (2001), as CCA requeimadas passaram a apresentar picos mais definidos de cristais de cristobalita. Quanto ao tempo de queima, 275 minutos, registrado no experimento de Dafico foi considerado longo, mas necessário para queimar todo o carbono.

1.3.3.2 Tratamento físico da CCA

O tratamento físico empregado tem sido a moagem. Muitos autores realizaram moagem em moinho de bolas, via seca (DAFICO, 2001; FERREIRA, 1999; FONSECA, 1999, RÊGO, 2001; SENSALÉ, 2000; SILVEIRA, 1996 e outros), obtendo diâmetros médios na faixa de 7 a 8 μm . Alguns autores (DELLA, 2001 e SOUZA *et al.*, 2000), no entanto, empregaram moagem via úmida, obtendo diâmetros menores.

Santos (1997), utilizando diferentes CCA residuais, verificou que diferentes tempos de moagem levaram a diferentes áreas superficiais do material, concluindo que cada CCA produzida por um determinado processo de queima possui seu tempo de moagem ótimo para atingir maior pozolanicidade.

As cinzas obtidas por Souza *et al.* (2000), após queima da casca de arroz tratadas quimicamente de três formas diferentes, foram moídas em moinho de bolas, com jarro de polietileno de alta densidade, com água e bolas de zirconia com 0,5 cm de diâmetro. O diâmetro médio das partículas das três amostras de CCA variou de 0,6 a 2,0 μm e a área superficial, de 480 a 260 m^2/g , respectivamente.

Della (2001) também trabalhou com moagem a úmido e com três tempos distintos, 10, 40 e 80 minutos e obteve diâmetros médios de 2,05, 0,77 e 0,68 μm , respectivamente.

Rêgo (2001) empregou moinho de bolas carregado com 4,5 kg de bolas de aço para cada 2,5 kg de CCA para moer duas cinzas residuais diferentes. Moendo a seco, por 3 horas, obteve diâmetros médios de 19,8 e 33,9 μm . Esta diferença foi atribuída às características de cada cinza, sendo uma mais friável que a outra. A cinza que resultou no menor diâmetro médio apresenta um padrão de difração de raios X como amorfa, enquanto a outra, um padrão cristalino.

Weber (2001) empregou tempos de moagem de 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas e moinho de bolas, para moer CCA “*in natura*” e tratadas termicamente. A TAB. 1.5 apresenta os resultados obtidos pela a autora, onde se observa que com o aumento do tempo de moagem, a tendência é de redução do tamanho médio da partícula e com ele, o aumento da área superficial e da massa específica. No entanto, após 12 horas de moagem estas variações são muito pequenas. Quando se compara o comportamento entre as cinzas, constata-se que a CCA tratada termicamente apresentou maior massa específica e menor

área superficial, além de ter sofrido maior redução do tamanho da partícula com até 6 horas de moagem.

TABELA 1.5 Propriedades físicas de CCA “*in natura*” e tratada termicamente (TT), quando submetidas à moagem por 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas

Tempo de moagem (h)	Massa específica (g/cm ³)		Área superficial (m ² /kg) - Blaine		Tamanho médio da partícula – (µm)	
	CCA “ <i>in natura</i> ”	CCA c/ TT	CCA “ <i>in natura</i> ”	CCA c/ TT	CCA “ <i>in natura</i> ”	CCA c/ TT
2	1,98	2,17	960	1035	36,05	30,09
4	2,06	2,17	1759	1559	23,43	10,55
6	2,06	2,19	1739	1501	23,41	11,95
12	2,06	2,20	2461	1976	7,40	8,00
18	2,06	2,19	2415	1936	6,66	7,47
24	2,02	2,18	2488	1705	6,52	8,90

Fonte: WEBER, 2001, pp.51;52. Adaptado.

Rêgo (2004) empregou moinho de bolas especificado para o ensaio de Abrasão Los Angeles em agregados graúdos, por um período de 5 horas. A carga empregada foi de 6 kg de corpos moedores para 2,5 kg de CCA. Segundo o autor este tempo de moagem é suficiente para que a cinza residual alcance índice de atividade pozolânica com cimento satisfatório. Os diâmetros médios dos dez diferentes tipos de CCA avaliados variaram entre 9,4 e 17 µm, enquanto a área superficial BET oscilou entre 4 e 21 m²/g. A diferença entre as áreas superficiais encontradas foi atribuída aos diferentes processos de queima utilizados.

Vieira *et al.* (2005) moendo CCA com diferentes teores de amorfismo, necessitaram de diferentes tempos de moagem para obter mesmo diâmetro médio, isto é, em torno de 4,5 µm. Para tanto, empregaram moinho de bolas com carga de 10,5 kg para 500 gramas de cinza e o tempo de moagem necessário variou entre 3 e 5 horas. Os autores creditam que a exigência de diferentes tempos de moagem para cada tratamento térmico utilizado no processo de combustão da casca, é resultante das transformações estruturais que ocorreram durante a queima e que influenciam na facilidade de moagem e em outras características das CCA, como a atividade pozolânica.

Ribeiro *et al.* (2005) testaram o emprego do moinho de bolas do ensaio de Abrasão Los Angeles para moagem de CCA. Segundo os autores, o rendimento deste processo se mostrou muito pequeno e, então, foi testado um moinho de rodas, empregado na moagem de resíduos de entulho da construção civil. Segundo os autores, o moinho de rodas aumentou o rendimento em 500% em relação ao anterior. Os diâmetros e tempos de moagem obtidos não foram especificados.

1.3.4 CCA como pozolana

“Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes” (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Estes autores, ao classificarem as adições minerais para concreto, enquadram a cinza de casca de arroz em duas categorias de pozolanas:

- pozolana altamente reativa - quando queimada em processo controlado e constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e em estrutura celular;
- pozolana pouco reativa - quando queimada em campo e constituída essencialmente de silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina, indicando que este material deve ser moído e reduzido a um pó muito fino, para desenvolver uma certa atividade pozolânica.

Um dos pontos críticos apontados por alguns pesquisadores para obtenção de uma boa reatividade da cinza da casca de arroz, seja com a cal ou com o cimento, é o controle da temperatura de queima que determina o teor de sílica amorfa e, por conseqüência, a atividade pozolânica.

Segundo Neville (1997), como pozolana, a sílica deve estar em estado amorfo, pois a forma cristalina possui pouca reatividade. Além disto, deve estar finamente subdividida para poder se combinar com hidróxido de cálcio na presença da água e formar silicatos estáveis (reação pozolânica). Ainda segundo o autor, o fenômeno da

pozolanicidade é complexo, pois além da composição química, estão envolvidas a área superficial e a relação entre elas.

O termo reação pozolânica é empregado para designar a reação sílica-cal nos sistemas cimentícios (SILVEIRA e DAL MOLIN, 1995). Já o termo atividade pozolânica, segundo Wolf (1991), deve ter um sentido mais amplo, além da reatividade química da pozolana, deve considerar a morfologia das partículas, finura e resistência mecânica dos produtos da reação da pozolana com a cal e o cimento.

Segundo Silveira e Dal Molin (1991), ao serem adicionadas ao cimento ou substituindo parte deste, a CCA, tal como outras pozolanas, modificam a microestrutura da pasta do cimento, pois ao se combinarem com o hidróxido de cálcio livre, geram um pasta menos heterogênea, mais compacta, mais resistente e com menor calor de hidratação. Além da reação química, provocam efeito microfíler, devido ao tamanho das partículas, que se introduzem entre os grãos do cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação, dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio.

1.3.4.1 Métodos para determinação da pozolanicidade

Em geral, a pozolanicidade é medida através do chamado Índice de Atividade Pozolânica que é determinado experimentalmente através de diferentes tipos de ensaios.

Segundo Weber (2001), qualquer tipo de ensaio em que a quantidade de água da mistura é determinada através de testes de consistência, ou seja, em que a relação água/aglomerante não é mantida constante, pode levar a conclusões distorcidas a respeito da pozolanicidade do material, pois a resistência da pasta de cimento endurecida depende basicamente da porosidade, isto é, da relação água/aglomerante.

Dafico (2001) entende que os ensaios de Índice de Atividade Pozolânica servem como medida de quanto se pode substituir o cimento por pozolana para a fabricação de cimentos com adição. O autor propõe o emprego do método de Lúxan para uma avaliação mais adequada da pozolanicidade, pois mede a atividade química.

Em suas dissertações de mestrado, Gava (1999) e Weber (2001) listaram e comentaram os principais métodos para determinação do Índice de Atividade Pozolânica.

NBR 5752/1992 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento

Esta norma descreve o método de determinação do índice de atividade pozolânica com cimento portland, no qual a quantidade de água a ser usada é determinada por teste de consistência da argamassa, que deve ficar compreendida entre (225 ± 5) mm. É um método físico de determinação da pozolanicidade. Segundo Weber (2001) este tipo de ensaio tem limitações, pois os resultados podem ser influenciados pela composição do cimento usado e pela variação da relação água/aglomerante. Gava (1999) ressalta que neste ensaio, um fator importante como a relação água/aglomerante não é controlado. Rego (2004) apresenta algumas críticas ao método, tal como o fato da substituição do cimento pela CCA ser feito em volume, pois como a CCA tem massa específica menor do que a do cimento, a massa de CCA que substitui o cimento é menor que a massa de cimento retirado. No entanto, o autor considera que este é o método que melhor representa a real complexidade das reações que ocorrem entre a CCA e o cimento e que seu resultado é consequência da sinergia entre a reação pozolânica, o efeito filer e dos pontos de nucleação das partículas de CCA na pasta de cimento.

NBR 5751/ 1992 - – **Materiais pozolânicos** – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal

Também é um método físico de determinação da pozolanicidade. Segundo Weber (2001), a maioria dos pesquisadores não utiliza este ensaio devido à variação na qualidade da cal e seu reflexo sobre os resultados obtidos neste ensaio.

Método de Fratini

É um método químico de determinação da pozolanicidade, adotado pela NBR 5753/ 1992 – *Cimento Portland pozolânico – Determinação da pozolanicidade*.

A NM 201/1999 (Norma Mercosur) *Cemento pórtland puzolánico – Determinación de la puzolanicidad* também é baseada neste método. O gráfico para plotagem dos resultados do teste desta norma apresenta as coordenadas em linhas

ortogonais entre si, diferenciando-se da norma brasileira, em que as linhas do eixo das ordenadas são inclinadas em relação ao eixo das abcissas.

A pozolanicidade é avaliada por comparação entre a quantidade de Ca(OH)_2 presente na solução em contato com a pasta de cimento e a quantidade de saturação de um meio com a mesma alcalinidade. Seu resultado é expresso por um par de valores: quantidade de CaO (mmol CaO/L) e alcalinidade total (mmol OH/L) da solução em contato com a pasta de cimento hidratado. A posição do ponto resultante da locação destas duas coordenadas indica se o cimento é ou não pozolânico.

Isaia (1995) propõe quantificar este ensaio através do índice de atividade pozolânica. Tal índice é calculado pelo inverso da distância entre o ponto plotado no gráfico e a origem das coordenadas, multiplicado por 100.

Método Chapelle modificado – IPT

É um método químico em que a pozolanicidade do material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana. É um ensaio acelerado, realizado em 16 horas. Segundo Agopyan (1991), consumo acima de 500 mg CaO/g indica material com atividade pozolânica de interesse para aplicação prática.

Método de Lúxan

Este método mede a pozolanicidade através da variação da condutividade de uma solução saturada de Ca(OH)_2 antes e depois de 2 minutos da pozolana ser adicionada e misturada de forma contínua na solução (5g de pozolana para 200 ml de solução) (LUXAN, 1989). O autor classifica os materiais pozolânicos quanto à condutividade conforme dados da TAB. 1.6. Segundo Dafico e Prudêncio Jr. (2002), este método apresenta a vantagem de focar a reatividade química da CCA e, portanto, depender muito menos do grau de moagem do material do que, por exemplo, o ensaio de índice de atividade pozolânica com o cimento.

TABELA 1.6 Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade

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

Fonte: LÚXAN, 1989.

1.3.4.2 Pozolanidade da CCA

Jammes e Rao (1986-1) concluíram que a reatividade da CCA com a cal depende significativamente da temperatura em que a cinza foi produzida, já o tempo de queima registrou pequeno efeito na reatividade. Cinzas com elevada área superficial e pequenos cristais e tamanhos pequenos de partículas são altamente reativos com a cal. Em contraste, as de baixa área superficial contendo sílica cristalina mostraram reação inicial baixa.

Agopyan (1991) empregando o método de Chappelle modificado encontrou para a cinza produzida em forno comum um consumo da cal de 606 mg CaO/g de cinza, e para cinza produzida em leito fluidizado, de 623 a 699 mg CaO/g de cinza. Quando as cinzas foram moídas ($\phi < 0,045$ mm), estes resultados passaram, respectivamente, para 700 e 730 mg CaO/g.

Souza *et al.* (2000) empregaram o ensaio de Chappelle modificado para medir o grau da reação pozolânica das CCA produzidas a partir de tratamento químico da casca de arroz com posterior queima e moagem. Os resultados indicaram que as cinzas são altamente reativas, atingindo percentuais de reação com CaO que variou de 85 a 94%.

Ao avaliar CCA tratadas termicamente e moídas por diferentes tempos, Weber (2001) empregou os métodos de Lúxan e índice da atividade pozolânica com o cimento – IAP (NBR 5752/92). Os resultados são apresentados na TAB. 1.7, cujos valores de IAP são quase todos menores que 100%, mas superiores ao limite mínimo estabelecido pela norma brasileira para pozolanas destinadas à fabricação de cimentos pozolânicos, que é de 75%. Observa-se também que os valores de IAP referentes às cinzas modificadas foram ligeiramente mais elevados do que os obtidos com as cinzas “*in natura*”. Segundo a autora, isto se explica devido às características do próprio ensaio, onde a quantidade de água empregada é variável e foi sempre maior para as argamassas com cinza do que a de

referência, assim como foi maior para as argamassas com cinza “*in natura*” do que com a cinza com tratamento térmico.

TABELA 1.7 Pozolanidade da CCA pelos métodos de Luxan e IAP

Tempo de moagem (h)	Luxan		IAP (NBR 5752/92)	
	Diferença de condutividade (mSi)		(%)	
	CCA “ <i>in natura</i> ”	CCA c/ TT	CCA “ <i>in natura</i> ”	CCA c/ TT
2	2,77	1,11	82,16	82,25
4	2,77	1,12	82,68	82,62
6	2,73	1,15	79,75	94,13
12	2,34	1,02	84,48	91,76
18	2,49	1,19	81,69	101,50
24	2,47	0,72	92,91	98,78

Fonte: WEBER, 2001, pp.67;73. Adaptado.

Quanto os resultados do ensaio de Lúxan, estes contradizem os resultados de IAP, pois são consistentemente superiores aos da cinza com tratamento térmico. A autora entende que as prováveis explicações possam ser: a influência da presença do carbono nas medidas de condutividade feitas no ensaio e/ou a estrutura mineralógica da cinza com tratamento térmico que sofreu alguma alteração em relação ao estado “*in natura*” com a presença de picos mais definidos de cristais de cristobalita.

Dafico e Prudêncio Jr. (2002) avaliando CCA tratadas termicamente, também empregaram os métodos de Lúxan e índice da atividade pozolânica com o cimento – IAP (NBR 5752/92). Também avaliaram a influência da granulometria nos resultados ao ensaiarem amostras sem moagem e moídas por duas horas, em moinho de bolas. Os resultados obtidos são mostrados na TAB. 1.8. Pelo método de Luxan, ambas as amostras têm a mesma classificação (pozolanicidade variável), já pelo método IAP, a cinza sem moagem não é considerada pozolânica (IAP < 75%).

TABELA 1.8 Resultados obtidos pelos ensaios de Lúxan e IAP (NBR 5752/92)

	Lúxan	IAP (NBR 5752/92)
	Diferença de condutividade (mSi)	%
CCA sem moagem	4,485 – pozolanidade variável	-
CCA moída por 2 horas	5,615 -- pozolanidade variável	77,8

Fonte: DAFICO e PRUDÊNCIO JR., 2002, p.1679. Adaptado.

Rêgo (2004) avaliou a pozolanicidade de duas cinzas residuais com diferentes mineralogias (amorfa e cristalina) através de quatro métodos de determinação de pozolanicidade: IAP com o cimento/NBR 5752/92; IAP com a cal/ NBR5751/92; Fratini e Chappelle Modificado. O autor concluiu que há aumento da atividade pozolânica com a redução do diâmetro médio e que, quanto mais finamente moídas, menores as diferenças de reatividade entre as cinzas amorfa e cristalina.

Qingge *et al.* (2004) estudaram a pozolanicidade da CCA proveniente da casca de arroz tratada com ácido clorídrico. Foram usados três métodos para estimar a pozolanicidade da CCA: método de Luxan, consumo de Ca(OH)_2 e resistência à compressão de argamassas feitas com e sem CCA. Além disso, foi determinado o calor de hidratação, empregando calorímetro Calvet e distribuição do tamanho dos poros, por porosimetria por intrusão de mercúrio.

O tratamento da casca de arroz consistiu em banho com solução de 1 N HCl, seguido de lavagem, filtragem e secagem a temperatura ambiente. Posteriormente, amostras foram queimadas a temperaturas que variaram de 350 a 1100°C, por 4 horas. A moagem foi em moinho de bolas, por 60 min. Amostras de referência não foram submetidas ao tratamento químico.

Entre os muitos resultados obtidos, o gráfico da FIG. 1.7 mostra a relação da condutividade da solução saturada com Ca(OH)_2 com adição de CCA com e sem tratamento, com a temperatura de queima. Nele constata-se que, para temperatura de queima em torno de 750°C, a CCA sem tratamento não tem boa atividade pozolânica, já a CCA com tratamento tem uma queda significativa de pozolanicidade em torno de 1000°C. Segundo os autores, o tratamento químico da casca do arroz com HCl incrementa a atividade pozolânica da cinza, além de mantê-la alta, mesmo com temperaturas de queima mais elevadas.

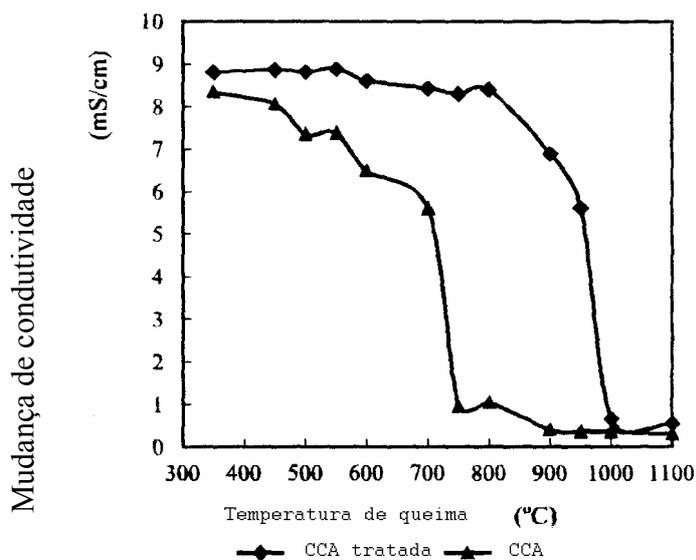


FIGURA 1.7 Relação entre a mudança de condutividade e a temperatura de queima
 Fonte: QINGGE *et al.*, 2004, p.522. Adaptado.

Em termos de resistência à compressão, foram ensaiados corpos-de-prova de argamassa, com 10% de substituição, em massa, por CCA e CCA tratada. Os resultados estão apresentados na TAB. 1.9. Os autores ressaltam o significativo acréscimo de resistência obtido pela argamassa com CCA tratada em relação à de referência, justificando tal comportamento devido ao elevado percentual de sílica amorfa, alta área superficial e alta atividade pozolânica. Em relação à CCA não tratada, o comportamento é o mesmo, no entanto, o acréscimo é inferior ao da CCA tratada, mas superior ao de referência.

TABELA 1.9 Resistência à compressão de argamassas com CCA tratada e não tratada

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		
	Referência	c/ 10% CCA	c/ 10% CCA tratada
3	21,9	26,6	28,7
7	32,4	44,3	48,4
28	39,3	52,3	56,3
91	44,0	55,7	62,4

Fonte: QINGGE *et al.*, 2004, p.525. Adaptado.

1.4 CIMENTOS PRODUZIDOS A PARTIR DA CCA

O estudo da incorporação da CCA na fabricação do cimento tem duas abordagens principais: produção de cimentos a partir da cinza de casca de arroz com adição de cal hidratada e um aditivo ou produção de cimentos através de misturas de CCA com clínquer Portland e gesso, em diferentes proporções, cujas propriedades físico-químicas devem atender a determinadas especificações. Além destas duas abordagens, alguns pesquisadores investigam o desempenho de misturas (concretos e/ou argamassas) em que a CCA substitui parte do cimento.

Dentro destas abordagens, são aqui citados alguns trabalhos:

Mohanty (1974) propôs o uso da CCA na manufatura do cimento, testando misturas de clínquer Portland, gesso e com duas amostras diferentes de CCA, cujos percentuais usados foram: 20, 25 e 30%. Suas análises físico-químicas foram comparadas com uma mistura de referência, sem adição de cinza. Os resultados encontrados foram satisfatórios; a mistura com percentual de 20% de cinza foi a que apresentou melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias, registrando valores em torno de 80% daqueles correspondentes ao cimento sem adição. Os ensaios de pozolanicidade, tanto das cinzas quanto dos cimentos, foram positivos.

Metha (1977) propôs a manufatura dos dois tipos de cimento: cimento com cal-CCA e cimento Portland-CCA. Para tanto, empregou uma CCA produzida no forno industrial descrito por Metha e Pitt (1974), cuja análise química é característica, ou seja, percentuais de SiO_2 varia entre 80-95% e de K_2O entre 1 e 2 %. Além disto, a cinza apresenta-se em estado amorfo com área superficial entre 50 e 60 m^2/g . Os percentuais de cinza no cimento cal-CCA variaram entre 70 e 80% em massa, enquanto, no cimento portland-CCA, entre 30 e 70%. Os dados de resistência à compressão mostraram que o cimento portland-CCA com percentual de 70% de cinza apresentou valores similares aos de controle, isto é, 100% cimento portland, os outros com percentuais menores apresentaram valores superiores.

O professor Kapur (1985) do Instituto Tecnológico de Kampur desenvolveu um processo fabricação de um cimento a partir de CCA, cal hidratada e um aditivo, sendo estes ingredientes moídos em conjunto em um moinho de bolas.

Cook, Pama e Paul (1977) investigaram o uso da CCA misturada com cal e cimento na produção de argamassa para assentamento de alvenaria de baixo custo. O aluminato de sódio foi testado como um aditivo. Em seus experimentos ficou constatado o efeito do aluminato de sódio na redução do tempo inicial e final de pega e no aumento da resistência à compressão. A avaliação dos elementos de alvenaria indicou que a CCA pode constituir até 60% do total de componentes cimentantes da mistura, com condições satisfatórias.

Farias (1990) estudou um cimento hidráulico para alvenaria a base de cinza de casca de arroz residual, concluindo, entre outras coisas, que resultados satisfatórios em termos de finura e resistência à compressão, podem ser obtidos a partir da simples mistura manual nas proporções adequadas de cal hidratada, cimento Portland comum e CCA moída previamente por 9 minutos (1521 m²/kg). Neste caso, o cimento Portland é usado como aditivo.

Boateng e Skeete (1990) estudaram o emprego de CCA como substituto do cimento nas razões de 1:1; 1:2 e 1:3 em corpos de prova de argamassas e de concreto. Com este propósito, as cinzas empregadas foram queimadas em temperaturas não superiores a 894°C. Assim, todas as amostras apresentaram conteúdo de carbono inferior a 8% e cores que variaram entre cinza e branco. Os resultados mostraram que a mistura com taxa de 1:1 apresentou rápido desenvolvimento da resistência à compressão, cujos valores excederam os de controle numa variação de 8 a 31% a mais. Para as outras misturas, com maiores taxas de cinza, a redução da resistência não corresponde linearmente à redução de cimento.

Com a mesma linha de trabalho, Ajiwe *et al.* (2000) apresentaram um estudo preliminar da manufatura de cimento a partir da CCA. Para tanto, empregaram uma cinza branca obtida em duas etapas: primeiramente, a casca de arroz foi pré-carbonizada numa planta piloto e, posteriormente, foi completada a descarbonização em um forno elétrico, a 650°C. O percentual de cinza empregado foi de 24,5%. Os resultados dos testes físico-químicos do cimento foram similares aos do cimento comercial. Desta forma, os autores, recomendam a sua produção em países em desenvolvimento a fim de reduzir os problemas com este resíduo agro-industrial.

A fim de estudar o efeito do álcool polivinil na hidratação do cimento com cinza de casca de arroz, Singh e Rai (2001) produziram-no misturando, com percentuais em massa, clínquer (86%) com gesso (4%) e CCA amorfa (10%). Os valores de resistência à compressão do cimento com CCA foram superiores aos de controle, exceto para a idade de 1 dia. Quanto à porosidade, há decréscimo com o tempo, sendo os valores do cimento com CCA, os mais baixos. Na presença de PVA, tanto o cimento com e sem CCA, tem seus resultados incrementados. Assim, os autores concluíram que PVA retarda a hidratação mas, ao mesmo tempo, incrementa a resistência à compressão e decresce a porosidade.

Singh *et al.* (2002), com o objetivo de investigar o efeito do lignosulfonato e do cloreto de cálcio (CaCl_2) e da mistura de ambos na hidratação do cimento com CCA, produziram cimentos compostos com percentuais de 5, 10, 15, 20 e 25% em massa de cinza substituindo cimento Portland comum. Inicialmente, estudando tempos inicial e final de pega, constataram valores máximos com a mistura com 10% de cinza, elegendo-a para dar seqüência à pesquisa. Os resultados mostraram que o cimento composto com 10% de cinza atingiu maiores valores de resistência à compressão com a presença da mistura de 2% CaCl_2 + 1% LS quando comparados com os valores obtidos com e sem misturas individuais destes elementos. No entanto, o estudo da resistência em ambientes corrosivos mostrou que o cimento é mais resistente sem misturas (CaCl_2 , LS ou ambos).

Asavapisit e Ruengrit (2005) estudaram o papel do cimento com CCA na estabilização de resíduos contaminados com metal. Para tanto, empregaram uma CCA obtida com queima da casca a 650°C, escolhida por atingir o mais elevado IAP (97,7%) entre outras resultantes de temperaturas de queima que oscilou entre 400 a 800°C. Seu percentual de sílica é de 90,2%.

Os metais testados foram cromo, ferro e zinco. No experimento, foi montada uma matriz com percentuais de substituição do cimento por CCA, de 0, 10, 20 e 30%, e adições de 10% de CR, Fe e Zn. A relação água/sólido ótima foi obtida de acordo com os procedimentos da ASTM C 230/90.

A avaliação do cimento foi feita em termos de tempo de pega final e resistência à compressão. Além destas, outras avaliações químicas foram realizadas, como determinação de pH.

Os resultados de resistência à compressão dos cimentos com substituição por CCA, sem adição de metais, estão apresentados no gráfico da FIG.1.8. Os cimentos com adição de 10% zinco só apresentaram resistência a partir de 7 dias e os cimentos com 20 e 30% de adição, só aos 28 dias. Os cimentos com adição de ferro apresentaram resistência somente a partir da idade de 3 dias.

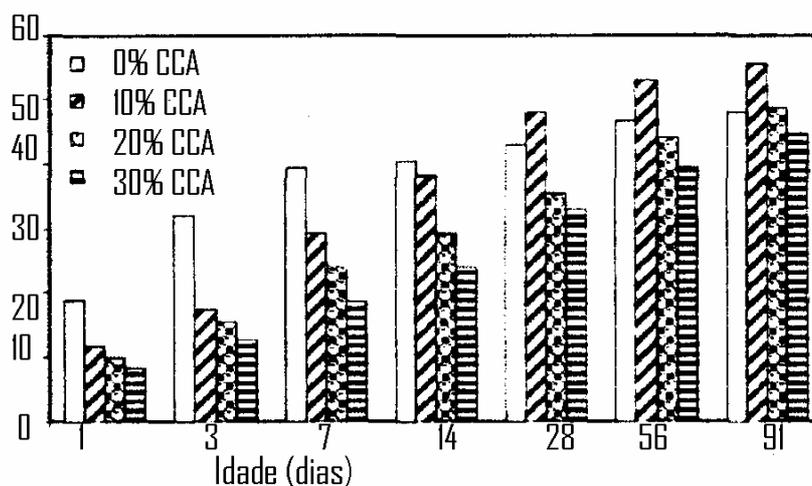


FIGURA 1.8 Resistência à compressão em cimentos com substituição de 0% (referência), 10, 20 e 30%, para diferentes idades.

Fonte: ASAVAPISIT e RUENGRIT, 2005, p.785.

Os dados da FIG. 1.8 mostram que o cimento com 10% de substituição por CCA obteve as maiores resistências a partir dos 28 dias, superando inclusive o cimento sem substituição (referência).

Quanto ao tempo de pega final, o cimento de referência apresentou 207 min. Com a presença da CCA, o tempo de pega final aumentou, chegando ao valor máximo de 249 min, com percentual de 20% de substituição. Quanto à presença dos metais, o cromo reduziu o tempo de pega final, enquanto o ferro e o zinco aumentaram, chegando ao valor máximo de 993 min para o cimento com 30% de substituição de CCA e adição de 10% de Zn.

1.4.1 Tipos de Cimento

As Normas Brasileiras especificam cimentos em que é prevista a adição de pozolanas: Cimento Portland Composto (NBR 11578/91), Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736/91) e Cimento Portland Resistente a Sulfatos (NBR 5737/92).

1.4.1.1 Cimento Portland Composto

O Cimento Portland Composto CP II, segundo a norma NBR 11578/91, “é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores especificados”.

O Cimento Portland Composto gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Seu uso, portanto, é indicado para obras com grande volume da concretagem e superfície relativamente pequena, que reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. É recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento (ABCP, 2005).

No Cimento Portland CP II-Z, os teores de pozolana podem variar entre 6 e 14 %, em massa. Suas classes são 25, 32 e 40. Empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais, na produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é menos permeável e por isso mais durável (ABCP, 2005).

1.4.1.2 Cimento Portland Pozolânico

O Cimento Portland Pozolânico CP IV, segundo a norma NBR 5736/91, “é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado”. Suas classes são 25 e 32. Os teores de material pozolânico podem variar de 15 a 50% em massa da constituição do cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), é indicado para uso quando se deseja um baixo calor de hidratação, pois a norma (NBR 5736/91) impõe limites máximos de 35 e 7 %, respectivamente para o C₃S e C₃A que produzem altos calores de hidratação. O C₂S produz muito menos calor, sendo 40% o seu limite mínimo neste cimento. O concreto feito com este produto se torna menos permeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, nas idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação, também é especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos (ABCP, 2005).

A TAB. 1.10 apresenta os valores limites das propriedades físicas e mecânicas abordadas neste trabalho, para os cimentos Portland Composto e Portland Pozolânico, determinados, respectivamente, pelas Normas Brasileiras NBR 11578/91 e NBR 5736/91.

TABELA 1.10 Algumas exigências físicas e mecânicas para os cimentos Portland composto e Portland pozolânico, de acordo com a NBR 11578/91 e NBR 5736/91

Características e propriedades		Unidade	Limites de Classe		
Cimento Portland Composto – NBR 11578 – CP II - Z					
Classe			25	32	40
Tempo de início de pega		h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
Tempo de fim de pega		h	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0
	7 dias		≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0
	28 dias		≥ 25,0 ≤ 42,0	≥ 32,0 ≤ 49,0	≥ 40,0 -
Cimento Portland Pozolânico – NBR 5736 – CP IV					
Classe			25	32	
Tempo de início de pega		h	≥ 1	≥ 1	
Tempo de fim de pega		h	≤ 12	≤ 12	
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5	≤ 5	
Resistência à compressão	3 dias	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	
	7 dias		≥ 15,0	≥ 20,0	
	28 dias		≥ 25,0 ≤ 42,0	≥ 32,0 ≤ 49,0	
	91 dias		≥ 32,0	≥ 40,0	

1.4.1.3 Cimentos resistentes a sulfatos

O Cimento Portland CP-RS - Resistente a sulfatos - NBR 5737/92 oferece resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. De acordo com a norma NBR 5737/92, cinco tipos básicos de cimento - CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI - podem ser resistentes aos sulfatos, desde que se enquadre em pelo menos uma das seguintes condições:

teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;

cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;

cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;

cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

O cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos – CP V ARI RS (NBR5733/91) - tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. Sua resistência a sulfatos é devida à adição de cinza pozolânica e é comprovada por ensaios laboratoriais, tornando-o indicado para a produção de estruturas em ambientes agressivos. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, concreto protendido, pré e pós-tensionado, pisos industriais, argamassa armada e concreto dosado em central.

CAPÍTULO 2

2 LEVANTAMENTO DA QUANTIDADE E CARACTERÍSTICAS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL PRODUZIDA NA REGIÃO DE PELOTAS/RS

O arroz é um dos mais importantes alimentos do mundo, seu consumo equivale à 1/5 do total de grãos demandados pela população. Isto se deve, principalmente, ao seu alto valor nutritivo e baixo custo por refeição.

O cultivo do arroz ocupa o 2º lugar em área plantada no mundo, só perdendo para o trigo. O maior produtor é a China, seguido da Índia, Indonésia, Bangladesh, Vietnã e outros. O Brasil, ocupando o 10º lugar, produz cerca de 2% da produção mundial (ABIAP, 2005).

No Brasil, os líderes em produção de arroz estão no Sul, onde predomina o seu cultivo em terras baixas (várzea), sendo irrigado por inundação. Seu rendimento médio, por hectare, supera 5 toneladas, em contraposição às baixas produtividades de campo no centro do País, onde predomina o arroz de terras altas (arroz de sequeiro). Na safra 2004/2005, a produção nacional foi de 12,8 milhões de toneladas, segundo dados do Ministério da Agricultura – MA (2005). A FIG. 2.1 apresenta gráfico com séries históricas de produção no Brasil e no Rio Grande do Sul.

A Região Sul é responsável por mais de 50% da produção nacional, conforme pode ser observado no gráfico da FIG. 2.2, que apresenta os percentuais de produção por região e por estados da Região Sul. Entre os estados, o Rio Grande do Sul é o maior produtor brasileiro, com percentuais entre 45 e 50% da produção nacional, variando de acordo com as condições climáticas de cada safra, como pode ser constatado nos gráficos das FIG. 2.1 e 2.2 que registram dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB – do Ministério da Agricultura – MA – e do Instituto Riograndense do Arroz – IRGA (2005).

Na safra 2002/03, a produção gaúcha registrou queda, devido às intensas chuvas no período do plantio, totalizando 4,8 milhões de toneladas. Já na safra 2003/04, com condições climáticas favoráveis, a produção atingida foi a maior dos últimos anos, chegando a 6,3 milhões de toneladas e, em 2004/05, devido à seca que assolou o Estado, houve uma redução na produção, passando para 5,8 milhões, enquanto a produção nacional permaneceu inalterada, conforme pode ser constatado no gráfico da FIG. 2.1.

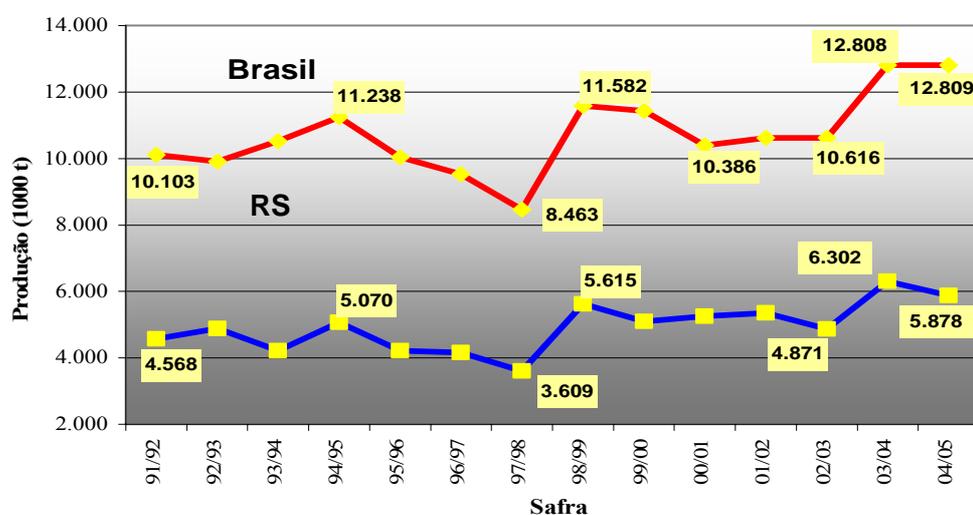


FIGURA 2.1 Séries históricas de produção de arroz no Brasil e no Rio Grande do Sul
Fonte: CONAB – MA, 2005; IRGA, 2005.

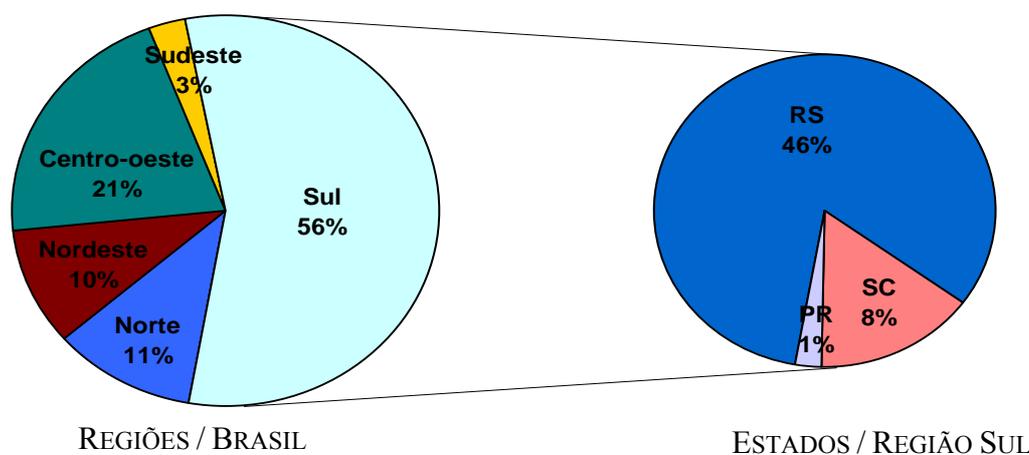


FIGURA 2.2 Percentuais de produção de arroz por região e por estado da Região Sul – Safra 2004/05
Fonte: CONAB – MA, 2005; IRGA, 2005.

O município de Pelotas - RS, localizado na zona sul, é o maior beneficiador do Estado, com cerca de 700 mil t/ano; seguido por Camaquã, Itaqui e São Borja, de acordo com dados do IRGA (2005). Esta quantidade representa um percentual que varia, de safra para safra, entre 13 e 20% do total beneficiado no Estado, sendo o restante beneficiado em outras 132 localidades. Quando considerada a produção nacional, este valor corresponde a cerca de 6% do total produzido. O gráfico da FIG. 2.3 apresenta séries históricas de beneficiamento no município e no RS, de acordo com dados do Sindicato da Indústria do Arroz de Pelotas e do IRGA (2005), enquanto o gráfico da FIG. 2.4 mostra as quantidades e percentuais beneficiados em Pelotas em relação aos demais municípios.

Devido ao grande volume trabalhado, Pelotas é também considerada Pólo Beneficiador do Cone Sul. No entanto, não se destaca entre os grandes municípios produtores do grão, pois beneficia, em média, por ano, quantidade aproximadamente igual a 1200% de sua produção. Por exemplo, em 2003, beneficiou 536 mil toneladas e produziu 45 mil toneladas, perfazendo um percentual do beneficiado sobre o produzido de 1191%.

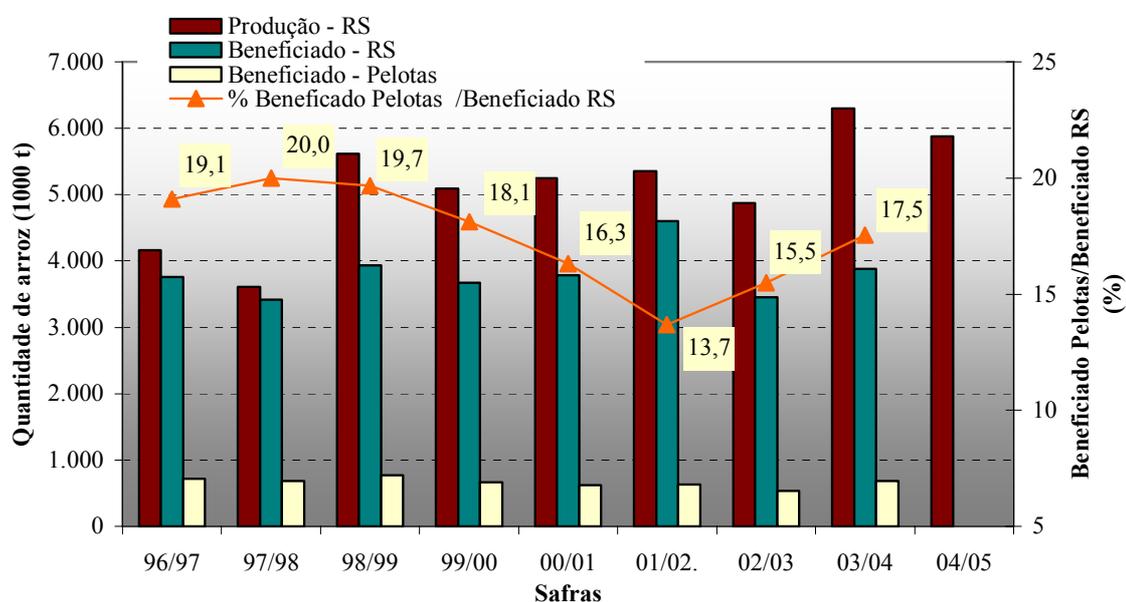


FIGURA 2.3 Séries históricas de quantidade de arroz beneficiado
Fonte: IRGA, 2005.

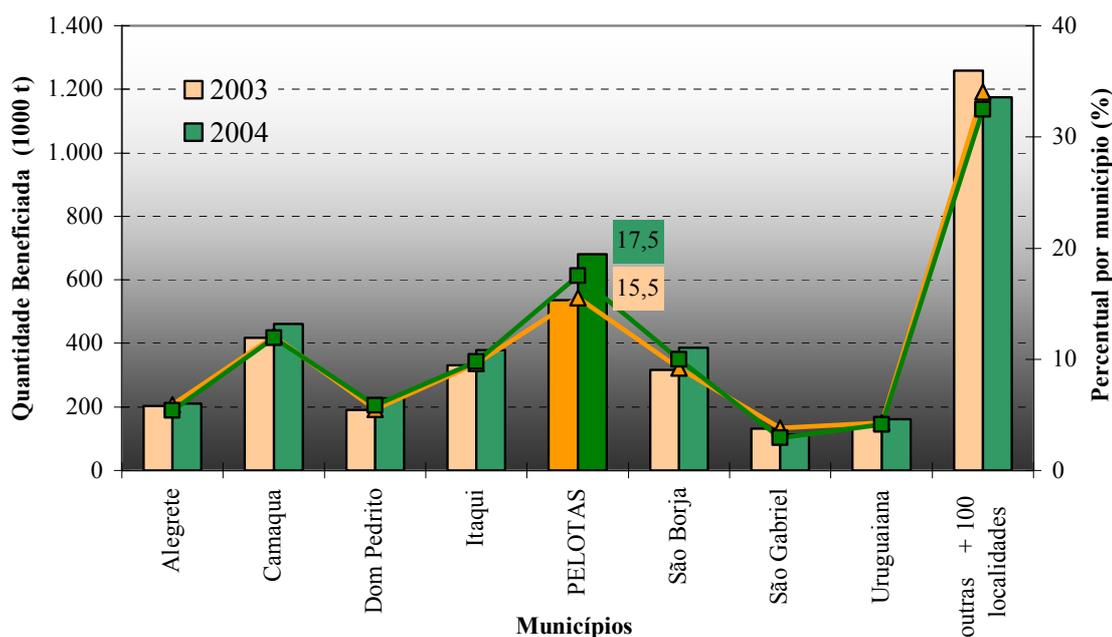


FIGURA 2.4 Quantidade e percentual de arroz beneficiado nos principais municípios beneficiadores do Rio Grande do Sul, nos dois últimos anos
Fonte: IRGA, 2005.

2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EM PELOTAS / RS

Considerando que Pelotas é um pólo beneficiador do grão e, portanto, onde são geradas grandes quantidades de casca e de cinza de casca de arroz, foi realizado, neste trabalho, um levantamento de dados nos engenhos locais e nas indústrias da região que empregam a casca como fonte de energia. Este levantamento teve como objetivo, além de conhecer as quantidades e percentuais trabalhados, obter outras informações sobre a queima da casca e sobre a cinza, tais como: qual o sistema mais empregado na queima da casca; qual o sistema mais usado no escoamento da cinza e quais os destinos dados a estes produtos.

O levantamento foi realizado no primeiro semestre de 2004 e refere-se, portanto, aos dados de 2003. Os dados levantados podem ser considerados atuais, pois a capacidade de produção dos engenhos e das indústrias que empregam a casca como fonte de energia se manteve aproximadamente constante em 2004 e 2005.

2.1.1 Materiais e métodos

O método empregado foi de entrevista orientada e para tanto, foram confeccionados dois questionários distintos. Um deles, destinado aos engenhos, refere-se aos dados de beneficiamento e o outro, destinado às indústrias que empregam a casca de arroz como fonte de energia, trata de informações sobre a queima da casca e a cinza produzida. Os dados levantados foram tratados e analisados e são apresentados a seguir. Os questionários utilizados são apresentados no Anexo I.

2.1.2 Resultados obtidos

A identificação e localização dos engenhos foram obtidas junto ao Sindicato da Indústria do Arroz de Pelotas. Após contato realizado com a totalidade dos engenhos listados, verificou-se que nem todos realizavam a operação de descascamento do grão, ou seja, não produziam casca de arroz. Alguns destes engenhos se limitavam em secar e armazenar o grão e os demais, em realizar outras operações de beneficiamento a partir do recebimento do grão já descascado.

Assim, o universo do levantamento ficou reduzido de 33 para 13 engenhos, alguns com mais de uma planta, aos quais foi aplicado o questionário específico. Dentre eles, três não empregavam a casca de arroz como fonte de energia, portanto não produzindo cinza, e três foram considerados de grande produção, isto é, beneficiam mais de 75mil toneladas de arroz por ano.

O gráfico da FIG. 2.5 registra as informações levantadas junto aos três engenhos considerados de grande porte e os totais referentes à soma dos demais juntos.

2.1.2.1 Sobre a casca de arroz

A quantidade de casca produzida corresponde aproximadamente a um percentual de 22% do arroz beneficiado em quaisquer dos engenhos 1, 2 e 3. Em relação aos engenhos de pequeno porte, este percentual sobe para 26%, indicando um acúmulo de pequenos erros nas quantidades informadas individualmente, já que a bibliografia aponta que o percentual de casca varia entre 20 e 24% da massa do grão.

Os engenhos 1 e 2 usam a casca como fonte de energia em suas atividades durante todo o ano, o que se pode verificar no gráfico da FIG. 2.5, tendo os mais elevados percentuais de casca queimada, respectivamente, 18,4 e 16,0%. O engenho 3 e os demais engenhos de pequeno porte só queimam a casca durante a safra, por um período de aproximadamente três meses para a secagem dos grãos que serão armazenados. Nos engenhos de pequeno porte estão incluídos aqui os três que não empregam a casca como combustível. Verifica-se no gráfico da FIG. 2.6 que apenas 30% da casca é queimada no período da safra e o restante, durante os demais meses do ano.

Notam-se também que os percentuais de casca descartada são elevados, mesmo para os engenhos 1 e 2 que têm consumo constante. Isto se comprova pelos percentuais mostrados no gráfico (b) da FIG. 2.6, onde 73% da casca produzida em todos os engenhos é descartada e, somente, 27% é queimada nos próprios engenhos.

As informações levantadas juntos aos engenhos indicam que o destino dado à casca que é descartada, em sua quase totalidade, é a queima em outras empresas. Porém, outros empregos também foram identificados, tais como: cama para aviário e para cocheiras, incorporação ao solo e na produção de ração. O gráfico da FIG. 2.7 mostra estes percentuais.

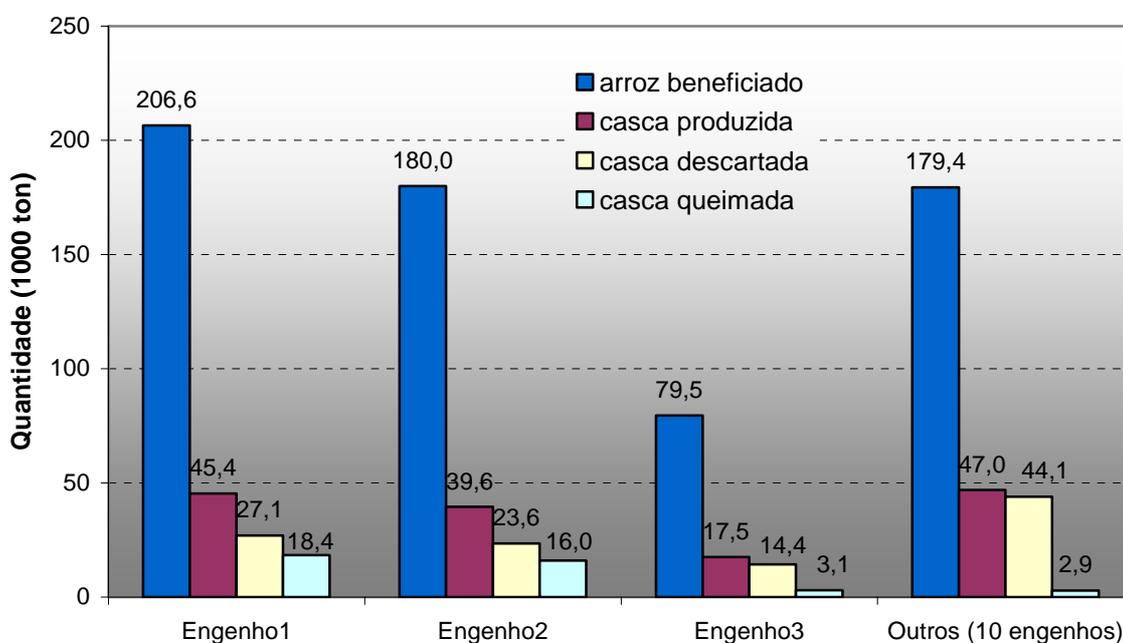


FIGURA 2.5 Quantidades de arroz e casca levantadas em Pelotas, por engenho de grande porte e pelo somatório dos pequenos

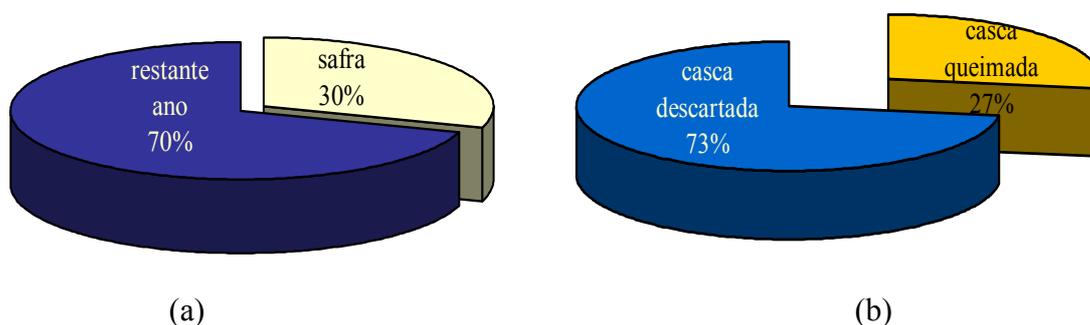


FIGURA 2.6 Dados sobre a casca de arroz, levantados junto aos engenhos

- (a) Quantidade de casca queimada na safra e no restante do ano, nos engenhos consultados;
 (b) Destino da casca produzida nos engenhos: queimada no próprio engenho ou descartada

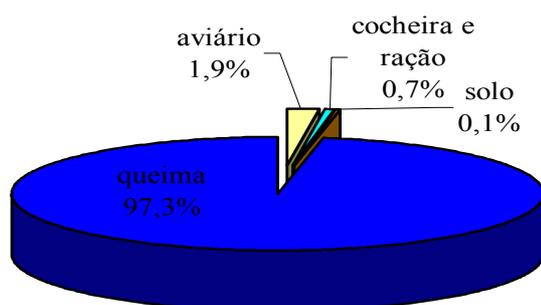


FIGURA 2.7 Destino da casca descartada

2.1.2.2 Sobre a cinza de casca de arroz

A partir das informações também fornecidas pelos engenhos locais, o destino da casca foi rastreado e, então, identificadas e listadas as empresas que empregam a casca como fonte de energia. Seis indústrias foram encontradas, além dos próprios engenhos, o que estendeu a área de abrangência desta pesquisa para a zona sul do Estado. Com a aplicação do questionário específico, foram levantados os dados apresentados a seguir.

No gráfico da FIG. 2.8 são mostradas as quantidades de casca queimada e cinza produzida nestas seis indústrias, nos dois engenhos de grande porte que queimam casca durante todo o ano e nos engenhos que queimam somente no período de safra (onde estão incluídos os dados referentes ao engenho 3).

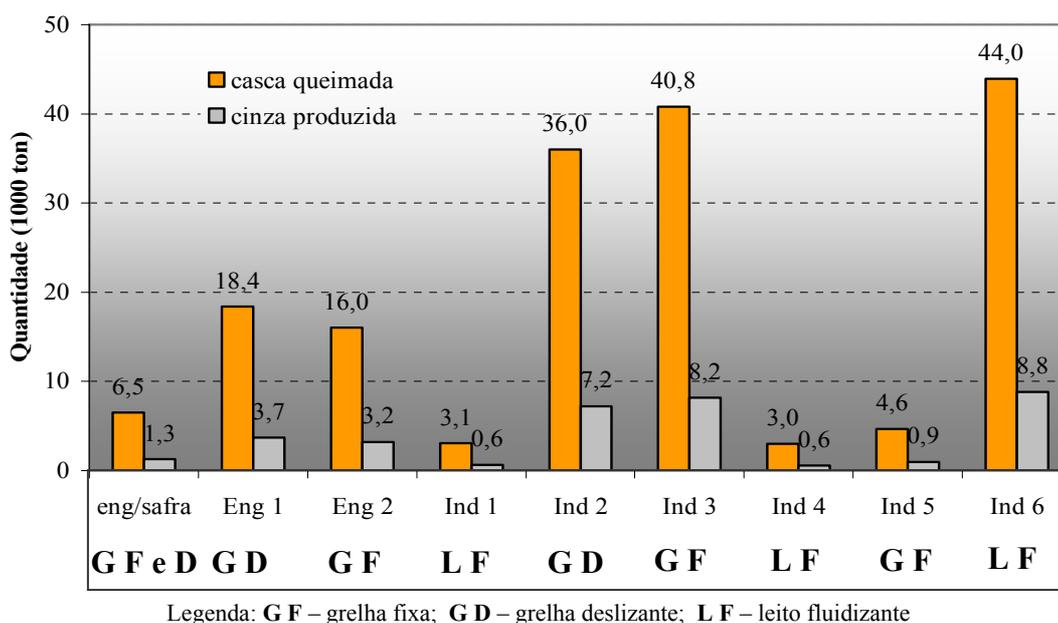


FIGURA 2.8 Quantidades de casca de arroz queimada e de cinza produzida e sistema de queima: dados levantados na região de Pelotas, por empresa

Além dos engenhos, o ramo de atividade das empresas que produzem cinza é variado, tais como: fábrica de adubo, fábrica de cimento, frigoríficos, olarias e empresas do ramo da alimentação.

Quanto ao tipo de sistema de queima, o levantamento mostrou que o mais empregado é o de grelha, sendo utilizadas tanto a grelha fixa quanto a deslizante. Outro sistema também identificado, o de leito fluidizado, aparece com 29% de ocorrência, em termos de quantidade de casca queimada. Os percentuais são apresentados no gráfico (b) da FIG. 2.9. Constatou-se que a totalidade dos engenhos de pequeno porte usa grelha fixa.

Em relação ao sistema de escoamento da cinza, o gráfico (a) da FIG. 2.9 mostra que a maior quantidade de cinza (53%) é escoada pelo sistema úmido. E, segundo informações obtidas junto às empresas, este percentual tende a aumentar, já que muitas vêm aderindo a este sistema para minimizar a enorme sujeira verificada no escoamento a seco.

Quanto ao destino dado à cinza, os dados revelam que a maior parte (75%) da cinza produzida é descartada em forma de aterros e entulhos, enquanto os outros 25% são incorporados ao produto. Estes percentuais de ocorrência são apresentados no gráfico da FIG. 2.10.

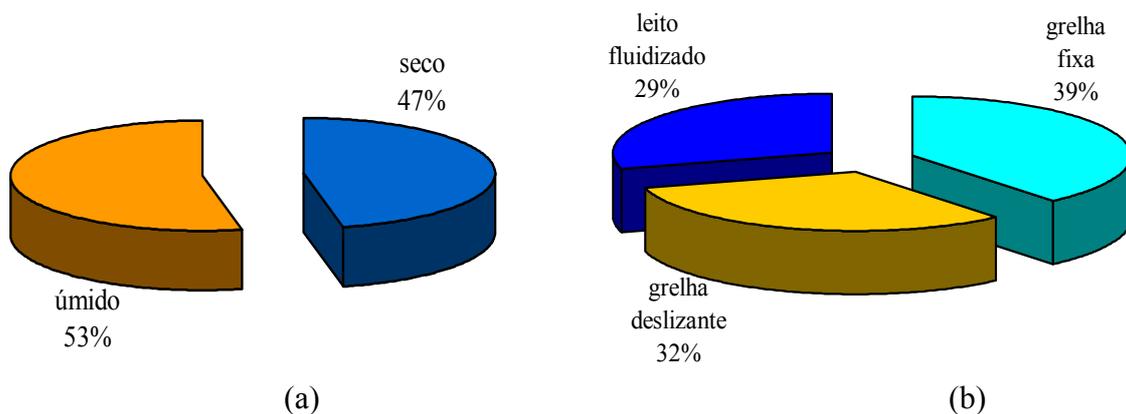


FIGURA 2.9 Dados sobre sistemas de escoamento e queima – (a) Sistemas de escoamento das cinzas; (b) Sistemas de queima empregados

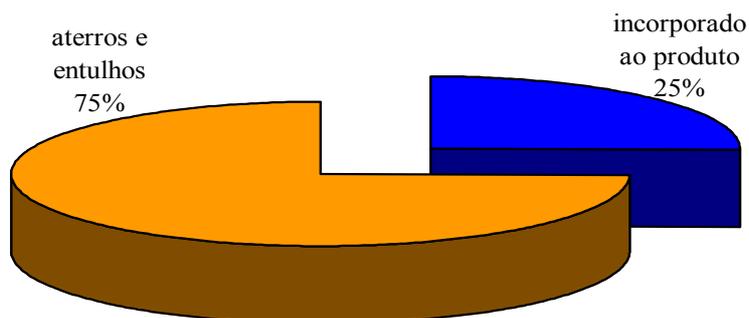


FIGURA 2.10 Destino dado à cinza de casca de arroz na região de Pelotas

2.1.2.3 Dados totais e gerais do levantamento em Pelotas

A totalização dos dados levantados na região de Pelotas é apresentada, de forma resumida, no gráfico da FIG. 2.11. São beneficiados, por ano, aproximadamente, 645 mil toneladas de arroz e deste total resultam quase 150 mil toneladas de casca de arroz, cuja maior parte (98%) é empregada como fonte de calor, gerando anualmente em torno de 35 mil toneladas de cinza. Nota-se que a quantidade total de casca queimada é superior à produzida, indicando que as empresas que queimam casca buscam material em outras localidades, além daquele produzido em Pelotas.

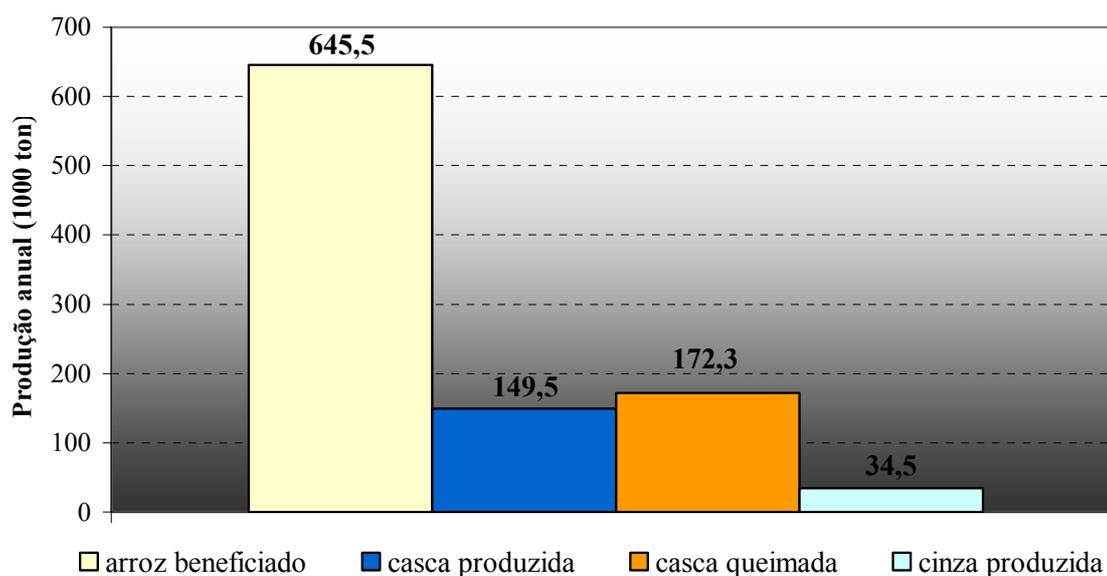


FIGURA 2.11 Quantidades totais de arroz beneficiado, casca produzida e queimada e cinza produzida, levantadas na região de Pelotas

Os dados levantados indicam que a maioria dos engenhos que beneficiam o arroz usa a casca como fonte de energia, sendo o excedente comercializado. Este uso ocorre apenas nos meses de colheita da safra, com exceção de dois engenhos que queimam a casca durante todo o ano, pois suas plantas industriais contemplam outras atividades no ramo da alimentação.

As empresas que queimam os maiores volumes de casca não são os engenhos, e sim indústrias do ramo da alimentação, conforme pode ser observado no gráfico da FIG. 2.8.

Dois sistemas de queima foram identificados: grelha e leito fluidizado. O sistema de grelha é o mais empregado e o que queima maior volume de casca, totalizando 71% do total incinerado. Neste sistema, dois tipos de grelhas são usados: fixa e deslizante, predominando a fixa.

A maior parte da cinza (53%) é escoada por via úmida, conforme mostra o gráfico (a) da FIG. 2.9. Isto minimiza a contaminação do ar, pois elimina grande parte da poeira e torna os ambientes de trabalho mais limpos e salutaros aos operários.

Quanto ao destino dado à cinza, fora a quantidade que é incorporada ao produto (25%), a maior parte, ou seja, aproximadamente 26 mil toneladas/ano, são encaminhadas para aterros, comprovando o grande volume de material jogado no meio ambiente.

2.2 CONCLUSÕES

O sistema de queima da casca de arroz mais freqüente e com maior volume de casca queimada na região de Pelotas é a grelha, abrangendo o uso tanto da fixa como da deslizante. O leito fluidizado é o outro sistema de queima identificada neste levantamento.

As empresas que empregam a casca de arroz como fonte de energia não têm preocupação em registrar a temperatura de queima. Em nenhuma delas, esta informação foi obtida com precisão, sendo informado somente que a temperatura não é constante, variando conforme a demanda das atividades em termos de pressão de vapor.

A diferença de aproximadamente 34 mil toneladas a mais entre os dados obtidos junto ao IRGA e aqueles levantados neste trabalho, se explica, pois o valor divulgado pelo Instituto considera também as quantidades trabalhadas em empresas que realizam outras atividades de beneficiamento que não o descascamento, as quais foram desconsideradas no levantamento realizado “*in loco*” por não produzirem casca.

Os dados gerais sobre a quantidade de cinza de casca de arroz e a comprovação de que a maior parte não tem outra destinação, senão o descarte no meio ambiente, indicam a dimensão do problema ambiental e a necessidade de se encontrar soluções técnica e economicamente viáveis para uso deste material.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados, além do Programa Experimental, os equipamentos, os materiais e os métodos empregados no trabalho.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O Programa Experimental deste trabalho é dividido em duas etapas, cujo esquema geral é apresentado na FIG. 3.1. A primeira é um estudo que aborda a aplicação de diferentes tipos de tratamentos e respectivos resultados nas características da CCA e em sua pozolanicidade. A segunda etapa constitui-se na aplicação dos tratamentos selecionados nas CCA e a posterior produção e avaliação dos cimentos confeccionados com as cinzas tratadas, por substituição em diferentes percentuais.

Neste capítulo, juntamente com a descrição de cada uma das etapas, são apresentados os respectivos objetivos.

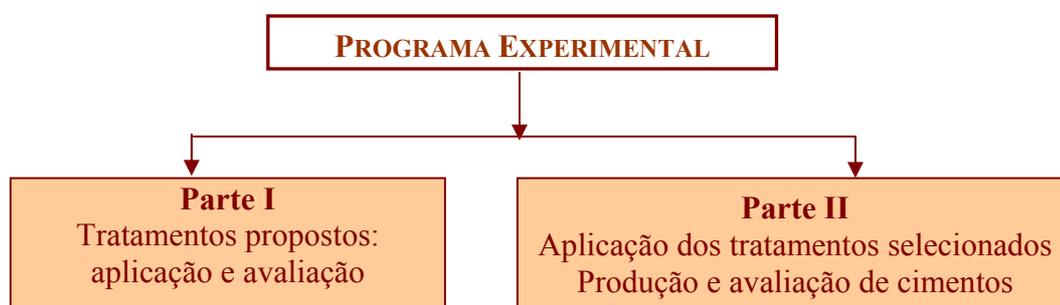


FIGURA 3.1 Esquema geral do Programa Experimental

3.1.1 Parte I – Tratamentos Propostos: Aplicação e Avaliação

Nesta parte do Programa Experimental, foram testados diferentes tipos de tratamentos em diversas amostras de cinzas de casca de arroz:

- Tratamento Físico: moagem em diferentes moinhos e processos;
- Tratamento Térmico: queima a diferentes temperaturas e choques térmicos;
- Tratamento Químico: banho em solução ácida e/ou básica, seguido de tratamento térmico.

No Capítulo 4 são descritos os tratamentos testados e especificadas as cinzas usadas em cada tipo de tratamento, assim como as características de cada processo empregado e os resultados obtidos. Além disto, dois experimentos preliminares são relatados, os quais tiveram o objetivo geral de selecionar equipamentos ou método de moagem (tratamento físico) através da avaliação pelo Índice de Atividade Pozolânica com o cimento – IAP. Estes experimentos estão identificados como Experimento I e II.

A seguir, são definidos os objetivos de cada um dos tratamentos utilizados.

3.1.1.1 Tratamento Físico

Tem o objetivo de reduzir o tamanho das partículas das cinzas, pois sabe-se que a granulometria é um fator importante na reatividade da pozolana e também no efeito *filler* quando adicionada aos cimentos, argamassas e concretos, conforme discutido no Capítulo 1. A área superficial é outra característica fundamental na reatividade da CCA e que também pode ser otimizada com o processo de moagem adequado.

Para tal, foram testados vários tipos de moinhos, a saber: moinho de bolas; moinho periquito, moinho agitador; moinho planetário e micronizador. Os tempos de moagem testados foram aqueles compatíveis com o tipo de equipamento, com a granulometria obtida e com o resultado desejado, isto é, diâmetro (50% passante) igual ou menor que o do cimento.

3.1.1.2 Tratamento Térmico

As diferentes temperaturas e choques térmicos propostos e testados objetivaram atingir todos ou algum dos seguintes objetivos: clarear as cinzas; reduzir o teor de carbono e outras impurezas, aumentando o percentual de sílica; manter as características mineralógicas das cinzas amorfas e alterá-las nas cinzas cristalinas, tornando-as amorfas e claras.

3.1.1.3 Tratamento Químico

Neste caso, os objetivos se confundem com os do tratamento térmico. No entanto, a presença do banho químico tem a intenção de incrementar os resultados obtidos em relação à cor e ao percentual de sílica, principalmente eliminando as impurezas residuais presentes em forma de óxidos através de sua reação com os ácidos e a matéria orgânica pela calcinação. Para tanto, foi proposta uma combinação de operações unitárias, ou seja, banho em solução química seguido de tratamento térmico. Foram testados banhos de solução ácida, empregando dois tipos de ácidos e também uma combinação deles, além de banho de solução básica.

3.1.2 Parte II - Produção e avaliação dos cimentos produzidos com CCA beneficiada

Esta é a principal parte do programa experimental, abrangendo várias operações e ensaios, cuja apresentação é feita nos Capítulos 5 e 6.

Os beneficiamentos propostos são três e foram identificados como I, II e III, os quais vão associando e sobrepondo diferentes tratamentos, apresentados e selecionados na etapa anterior.

Beneficiamento I - compreende somente tratamento físico, ou seja, as cinzas em estado natural são moídas, visando à redução da suas granulometrias e aumento de área superficial.

Beneficiamento II - primeiramente as cinzas, em estado natural, são tratadas termicamente para depois serem submetidas ao tratamento físico, ou seja, moagem.

Beneficiamento III - as cinzas em estado natural são tratadas quimicamente e após, submetidas às mesmas operações de tratamento do beneficiamento II, ou seja, queimadas e depois moídas.

Definidos os beneficiamentos e selecionadas e caracterizadas as cinzas, procedeu-se a operação de beneficiamento das amostras. Para tanto, cada uma das cinzas foi dividida em três lotes, os quais foram submetidos aos beneficiamentos I, II e III, conforme indicado no esquema da FIG. 3.2.

Concluídos os beneficiamentos, as cinzas foram avaliadas quanto ao Índice de Atividade Pozolânica com o cimento – IAP. Aquelas que lograram resultado positivo, ou seja, $IAP \geq 75\%$, foram usadas na produção de cimentos e as demais foram descartadas.

Os percentuais de substituição, em massa, empregados na produção dos cimentos foram de 6%, 10%, 15%, 33% e 50%. O critério para definição destes valores foi adotar os limites inferiores e superiores do teor admissível de pozolana estabelecidos nas Normas Brasileiras para os cimentos Portland composto com pozolana CP II Z (NBR 11578- 6% e 14%) e Portland pozolânico – CP IV (NBR 5736/91 – 15% e 50%), além de um valor intermediário entre eles.

A avaliação dos cimentos foi feita de acordo com algumas das exigências físicas e mecânicas das referidas normas, conforme indicado no esquema da FIG. 3.2. A partir dos resultados destes ensaios e considerando-os como critério, foi verificado se os cimentos produzidos atendiam os limites das exigências normativas, os quais estão apresentados na TAB. 1.10.

Por fim, através de uma avaliação global dos resultados, foi possível concluir a respeito de viabilidade de utilização das CCA residuais na produção de cimentos e da necessidade ou não da realização de tratamentos para uniformização e otimização de suas propriedades.

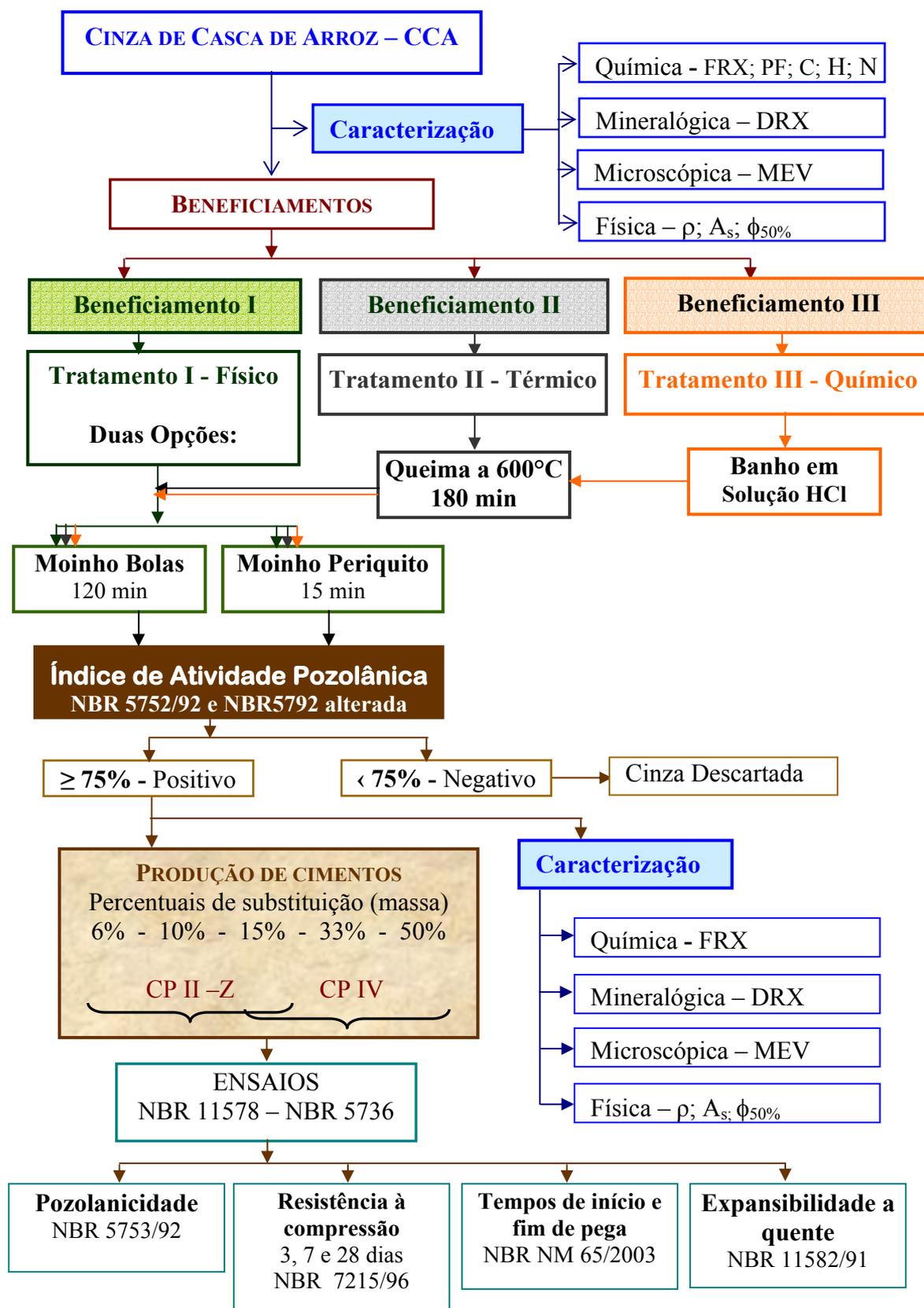


FIGURA 3.2 Programa Experimental – Parte II

3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

3.2.1 Cinza de Casca de Arroz

Dez amostras de diferentes cinzas de casca de arroz residuais foram coletadas em diversas empresas da região de Pelotas/RS e entre elas, seis foram selecionadas. Inicialmente, o critério de seleção adotado baseou-se na composição mineralógica de cada amostra, ou seja, foram selecionados dois lotes constituídos por três cinzas cada, um com as menos cristalinas e outro, com as mais cristalinas. As cinzas CCA1, CCA6 e CCA7 formam o grupo das menos cristalinas, enquanto as mais cristalinas foram identificadas como CCA3, CCA8 e CCA9. As demais cinzas foram descartadas por não representarem bem os grupos considerados.

Foram empregadas mais de uma cinza como representantes dos grupos com diferentes composições mineralógicas (mais e menos cristalina) ao longo de toda a pesquisa devido à cronologia das diferentes partes do programa experimental e à disponibilidade de material na época da realização de cada uma destas etapas.

Assim, na Parte I do Programa Experimental, ou seja, no estudo dos tratamentos propostos, foram empregadas duas cinzas menos cristalinas (CCA1 e CCA6) e duas mais cristalinas (CCA3 e CCA8).

Para a produção de cimentos (Parte II) foram selecionadas as cinzas CCA7 e CCA9, levando em conta o critério de ser menos e mais cristalina. Mas, além deste parâmetro, outro foi observado, qual seja, o sistema de queima. Estas cinzas selecionadas são provenientes uma de cada um dos dois sistemas de queima (grelha e leito fluidizado) identificados no levantamento realizado na região de Pelotas e apresentado no Capítulo 3. Assim, o trabalho tenta ser abrangente e representativo, na medida em que estuda cinzas residuais oriundas desta região, com diferentes composições mineralógicas e provenientes dos distintos sistemas de queima empregados.

Além das cinzas residuais, foi empregada uma cinza identificada como CCA0, considerada de referência, cujo difratograma de raios X indica um material predominantemente amorfo. Esta cinza, proveniente dos EUA, foi obtida em condições especiais de temperatura e tempo de queima, levando à esta característica.

3.2.1.1 Caracterização mineralógica e visual

a) Técnica empregada

A identificação das fases e do grau de cristalinidade das amostras de CCA foi feita pela técnica de difratometria de raios X (DRX), no Laboratório de Difratometria de Raio X do Instituto de Geociências e no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER, da Escola de Engenharia da UFRGS.

Para tanto, foram empregados difratômetros da marca Siemens, modelo D5000, radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 36 V, corrente 20mA e Philips X'PERT (LACER). Para determinar as fases presentes nas amostras, foram feitas varreduras com velocidade $0,02^\circ$ por segundo e intervalo de medida na faixa de 5° a 75° .

b) Caracterização das CCA

As TAB. 3.1 e 3.2 apresentam os difratogramas de raios X e fotos de amostras das cinzas residuais selecionadas, além de identificar o tipo de queima a que foram submetidas.

Conforme dados das TAB. 3.1 e 3.2, todas as cinzas mais cristalinas são provenientes de sistema de queima em leito fluidizado. Já as cinzas menos cristalinas são oriundas de diferentes sistemas de queima, inclusive, leito fluidizado.

As características visuais da cinza residual CCA1, cujas partículas têm forma semelhante à casca de arroz, constata o processo de queima em grelha, além de sugerir que esteja mal queimada, o que é confirmado pelo alto percentual de perda ao fogo (34,7%).

A cinza residual CCA8, além de apresentar vários picos no difratograma de raios X, indicando a presença de cristobalita, tridimita e quartzo, apresenta cor branca e baixíssimo percentual de perda ao fogo (0,8%). Estas características sugerem elevada temperatura de queima, provavelmente, superior à 1000°C e/ou longo tempo de exposição (BOATENG e SKEETE, 1990; METHA, 1977 *apud* FONSECA, 1999). Sua seleção deveu-se à sua coloração branca, que a distingue das demais, além de ser uma CCA residual das mais cristalinas.

TABELA 3.1 Características das CCA residuais menos cristalinas: CCA1; CCA6 e CCA7

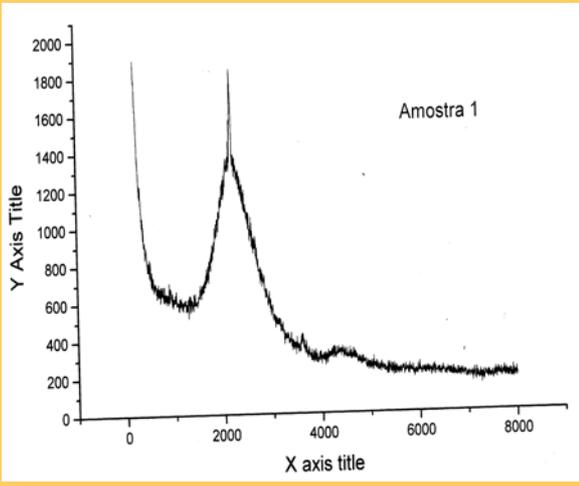
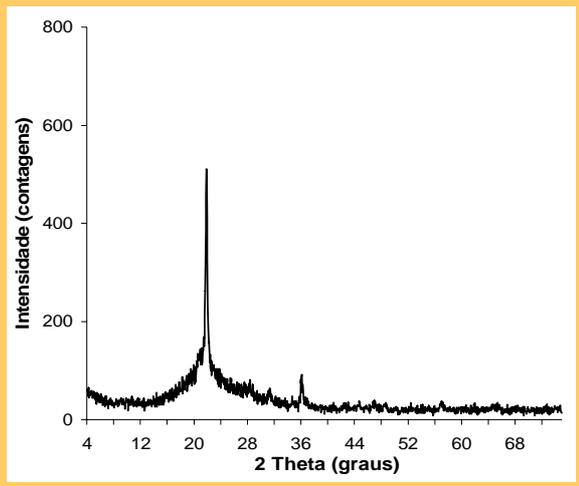
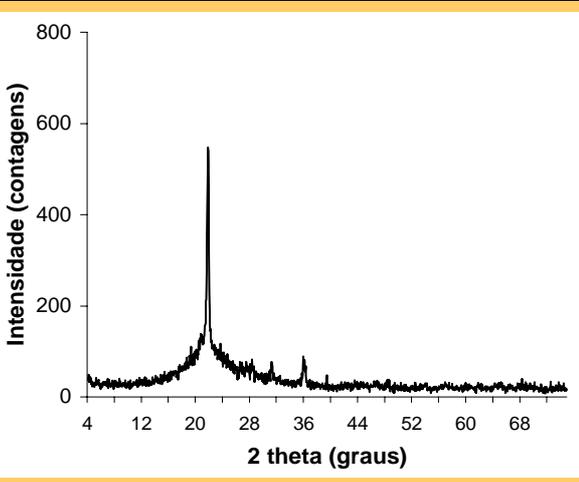
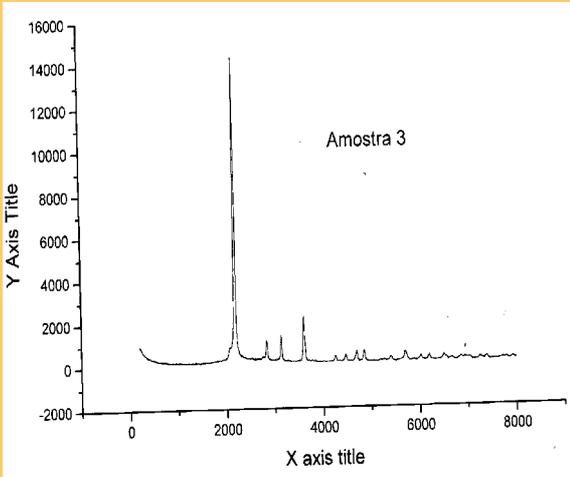
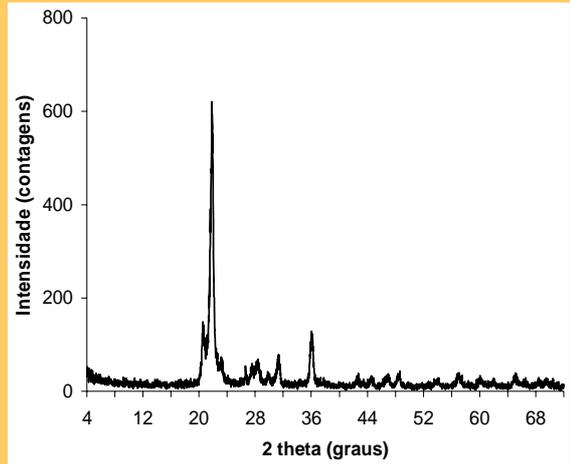
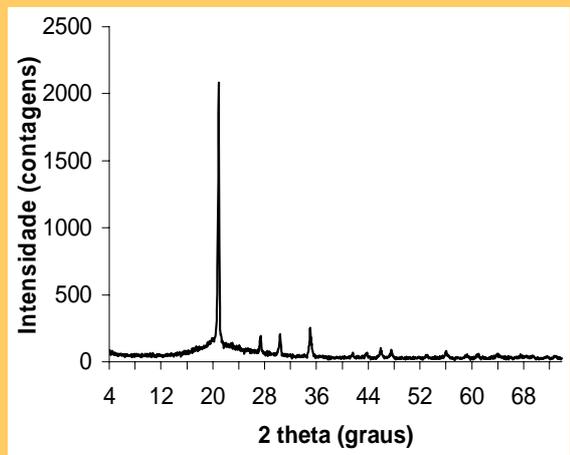
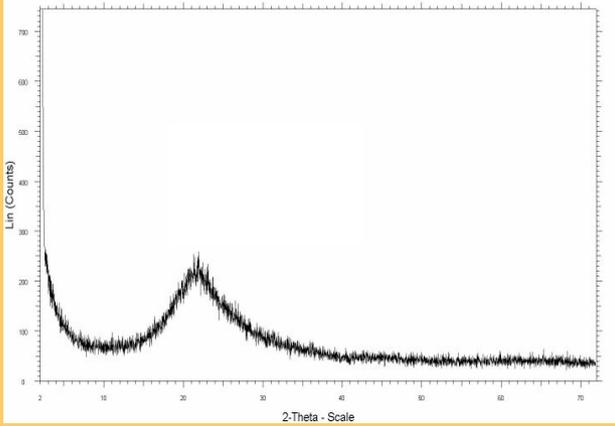
Cinza de casca de arroz	Sistema de queima e Difratograma de raios X
<p>CCA 1</p> 	<p>GRELHA FIXA</p> 
<p>CCA 6</p> 	<p>LEITO FLUIDIZADO</p> 
<p>CCA 7</p> 	<p>GRELHA DESLIZANTE</p> 

TABELA 3.2 Características das CCA residuais mais cristalinas – CCA3; CCA8 e CCA9

Cinza de casca de arroz	Sistema de queima e Difratoograma de raios X
<p data-bbox="220 327 331 360">CCA 3</p> 	<p data-bbox="948 327 1267 360">LEITO FLUIDIZADO</p> 
<p data-bbox="220 871 331 904">CCA 8</p> 	<p data-bbox="948 871 1267 904">LEITO FLUIDIZADO</p> 
<p data-bbox="220 1402 331 1435">CCA 9</p> 	<p data-bbox="948 1402 1267 1435">LEITO FLUIDIZADO</p> 

A TAB. 3.3 apresenta uma foto e o difratograma de raios X da cinza de referência – CCA0, mostrando sua estrutura predominantemente amorfa.

TABELA 3.3 Características da cinza de referência – CCA 0

CCA de Referência	Sistema de queima e difratograma de raios X
CCA 0	FORNO ESPECIAL com queima sob suspensão
	

3.2.1.2 Caracterização química e Perda ao fogo

a) Técnicas empregadas

A técnica empregada na caracterização química das amostras de cinza de casca de arroz foi a espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, a qual gera uma radiação característica chamada "fluorescência". Os raios emitidos têm comprimentos de onda característicos para cada um dos elementos que constituem o material em estudo. Através de comparação com amostras padrão e da correção do efeito matriz, é possível estabelecer quantitativamente o teor dos elementos presentes.

Na execução dos ensaios, as amostras inicialmente foram secas a 105°C em estufa, por 2 horas. Para análise dos elementos foi utilizado um espectrômetro da marca RIGAKU, modelo RIX2000, utilizando tubo de raios-X com alvo de ródio, aceleração máxima de 60kV e dispersão por comprimento de onda em cristais analisadores Rx35, PET, Ge e LiF.

Para determinação de elementos maiores, foi fundida uma pastilha vítrea com fundente $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ na razão 7:1 (fundente:amostra). O fechamento foi obtido a partir da calibração com padrões de rocha, pela calibração NOVA do laboratório. Os padrões de controle foram o riolito JR2 e o padrão composto JG1+qtz, que é o padrão certificado de mais alto teor de sílica disponível no laboratório (88,22%). A análise está em conformidade com a norma ASTM 4326-94.

As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica, Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica do Instituto de Geociências – UFRGS.

A perda ao fogo (PF) foi determinada por variação gravimétrica pela queima a 1000°C em forno de mufla, por 2h.

b) Composição química e Percentual de perda ao fogo das CCA

A TAB. 3.4 apresenta a composição química das cinzas, em estado natural.

TABELA 3.4 Composição química das cinzas selecionadas para o estudo dos beneficiamentos propostos

Amostras Selecionadas	Composição típica em óxidos										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	PF
CCA 1	62,62	0,06	0,05	0,118	0,26	0,48	0,07	1,19	0,0	0,449	34,7
CCA 6	85,06	0,339	-	0,062	0,331	0,57	-	2,09	0,0	0,557	11,0
CCA 7	85,81	0,06	0,05	0,169	0,46	0,51	0,11	1,7	0,02	0,624	10,5
CCA 3	91,92	0,09	0,33	0,156	0,6	0,72	0,15	2,41	0,02	0,815	2,8
CCA 8	90,56	0,58	0,63	0,24	1,00	1,09	0,19	2,88	0,03	2,012	0,8
CCA 9	90,93	-	-	0,09	0,28	0,728	-	1,79	0,0	0,61	5,5
CCA 0 - R	87,26	0,07	0,05	0,186	0,44	0,64	0,09	1,98	0,0	1,054	8,2

PF – Perda ao fogo

Constata-se, pela observação da TAB 3.4, que as cinzas do grupo mais cristalino (CCA3, CC8 e CCA9), além de apresentarem os mais elevados percentuais de sílica também apresentam os mais baixos percentuais de perda ao fogo. Isto, possivelmente, por terem sido queimadas em temperaturas mais altas e/ou por mais tempo, o que justificaria tais características. Como não há registro das temperaturas de queima, conforme foi constatado no levantamento realizado na região de Pelotas (Capítulo 2), não foi possível comprovar esta relação.

3.2.1.3 Distribuição granulométrica das CCA

a) Técnica empregada

A técnica empregada para determinar as distribuições granulométricas das amostras de CCA e do cimento foi a de difração a laser. Para tanto, foram utilizados granulômetros marca Cilas, modelos 1064, 1180 e 920, conforme o laboratório onde foi feito o ensaio. As amostras foram preparadas na forma de suspensão (CCA: amostra + água; Cimento: amostra + xilol) e submetidas à agitação para completa desaglomeração das partículas e, então, inserida no equipamento e realizada a leitura.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processamento de Carvão – LAPROM, ou no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER, ambos da UFRGS, ou ainda no laboratório da empresa Micro Service Indústria Química Ltda, conforme a etapa da pesquisa.

b) Granulometria das CCA

A TAB. 3.5 apresenta a composição granulométrica das cinzas selecionadas para as primeiras etapas da pesquisa, em estado natural.

TABELA 3.5 Composição granulométrica de cinzas selecionadas para as primeiras etapas

Amostras Selecionadas	Diâmetro (μm)		
	10%	50%	90%
CCA 1	13,02	53,59	94,15
CCA 6	15,54	53,95	90,84
CCA3	23,77	60,28	94,10
CCA 8	27,77	73,28	170,0
CCA0 – Ref.	10,74	39,18	67,18

3.2.2 Cinzas empregadas na produção de cimentos: CCA7; CCA9 e CCA0

As cinzas residuais CCA7 e CCA9, assim como a cinza de referência CCA0, foram as cinzas empregadas na produção de cimentos com substituição por CCA beneficiada. Por isto, passam a ser caracterizadas de maneira mais detalhada.

3.2.2.1 Caracterização química – Teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio

a) Técnica empregada

Estes teores foram determinados pelo Método ASTM D-5373 (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo CHN-600, conforme Relatório de Ensaio expedido pela CIENTEC (Anexo II), onde foram realizados os ensaios das amostras de CCA.

b) Teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio das CCA

Os percentuais de carbono, hidrogênio e nitrogênio nas amostras, em estado natural, estão apresentados na TAB. 3.6.

TABELA 3.6 Teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio das CCA0, CCA7 e CCA9

Cinza	Percentual do elemento químico (%)		
	C	H	N
CCA0	4,21	0,14	0,1
CCA7	4,63	0,10	0,08
CCA9	6,38	0,08	0,09

Dentre as cinzas, a de referência apresenta o mais baixo teor de carbono. O percentual de carbono residual nas cinzas é decorrente da temperatura e do tempo de exposição durante o processo de queima. Uma análise mais detalhada neste sentido fica prejudicada uma vez que não foi possível identificar a temperatura de queima das cinzas residuais.

A aparente incoerência entre os valores do teor de carbono e dos percentuais de perda ao fogo (TAB. 3.4) pode ser explicada das diferentes técnicas utilizadas nos ensaios.

3.2.2.2 Caracterização física – Massa específica, área superficial e distribuição granulométrica

a) Técnicas empregadas

A massa específica das cinzas foi determinada com emprego do frasco volumétrico de Le Chatelier, de acordo com o método especificado na NBR NM 23/2000 – *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*.

A área superficial (AS) foi determinado pelo método B.E.T. (Brunauer, Emmett, Teller) por adsorção de nitrogênio, em um equipamento Quantachrome, modelo Autosorb MP. Tal método é baseado na determinação da quantidade de nitrogênio gasoso necessário para cobrir a superfície de uma amostra. A quantidade de gás adsorvido é obtida através de uma curva denominada de *isoterma de adsorção*. Esta curva é obtida à temperatura constante, relacionando a quantidade de gás homogeneamente adsorvida em função da pressão. Antes do ensaio, já no próprio equipamento, a amostra é desgaseificada a 300° C, para retirar gases e vapores da sua superfície. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral - LTM-UFRGS.

A distribuição granulométrica foi determinada conforme descrito no item 3.2.1.3 (a).

b) Caracterização física das CCA

A caracterização física das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, em estado natural, em termos de massa específica, área superficial e granulometria, foram feitas de acordo com os métodos especificados no item 3.2.13. Os resultados são apresentados na TAB. 3.7.

TABELA 3.7 Caracterização física das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, em estado natural

Propriedade	Cinza		
	CCA0	CCA7	CCA9
Massa específica (g/cm ³)	1,880	1,764	1,875
Área superficial (m ² /g)	46,31	30,97	23,27
Diâmetro - 50% passante (µm)	39,18	68,34	64,95

Considerando que as cinzas CCA0, CCA7 e CCA9 estão colocadas em ordem crescente de cristalinidade das partículas, observa-se que o valor da área superficial decresce neste sentido, conforme os dados da TAB. 3.7.

Os valores de massa específica estão de acordo com dados apresentados na bibliografia. Para cinzas residuais, Agypan (1991) obteve valores de 1,88 e 2,11 g/cm³, enquanto Rêgo (2004) encontrou valores mais elevados, variando de 2,1 a 2,3 g/cm³.

Quanto à área superficial, Rêgo (2004), caracterizando dez CCA residuais, encontrou valores entre 4,01 e 21,33 m²/g, inferiores aos obtidos neste trabalho. Agypan (1991) também registrou valores dentro desta faixa – 6,0 e 18,5 m²/g. Ferreira (1999), trabalhando com CCA oriunda da mesma região, registrou área superficial de 21,1 m²/g.

Entre as residuais, a proveniente de processo de queima em grelha deslizante (CCA7) apresentou o valor mais elevado de 30,97 m²/g, porém inferior ao da cinza de referência (46,31 m²/g).

3.2.2.3 Caracterização microscópica

a) Técnica empregada

A análise da microestrutura da CCA foi feita através de microscopia eletrônica de varreduras por elétrons secundários (MEV), empregando um microscópio JEOL 5800, do Centro de Microscopia Eletrônica de UFRGS (CME).

As amostras foram dispostas sobre uma fina camada de esmalte e posteriormente metalizadas por uma fina camada de ouro, pois a cinza de casca de arroz não tem caráter condutor.

b) Caracterização das CCA

A FIG. 3.3 mostra fotos de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das três cinzas em estudo.

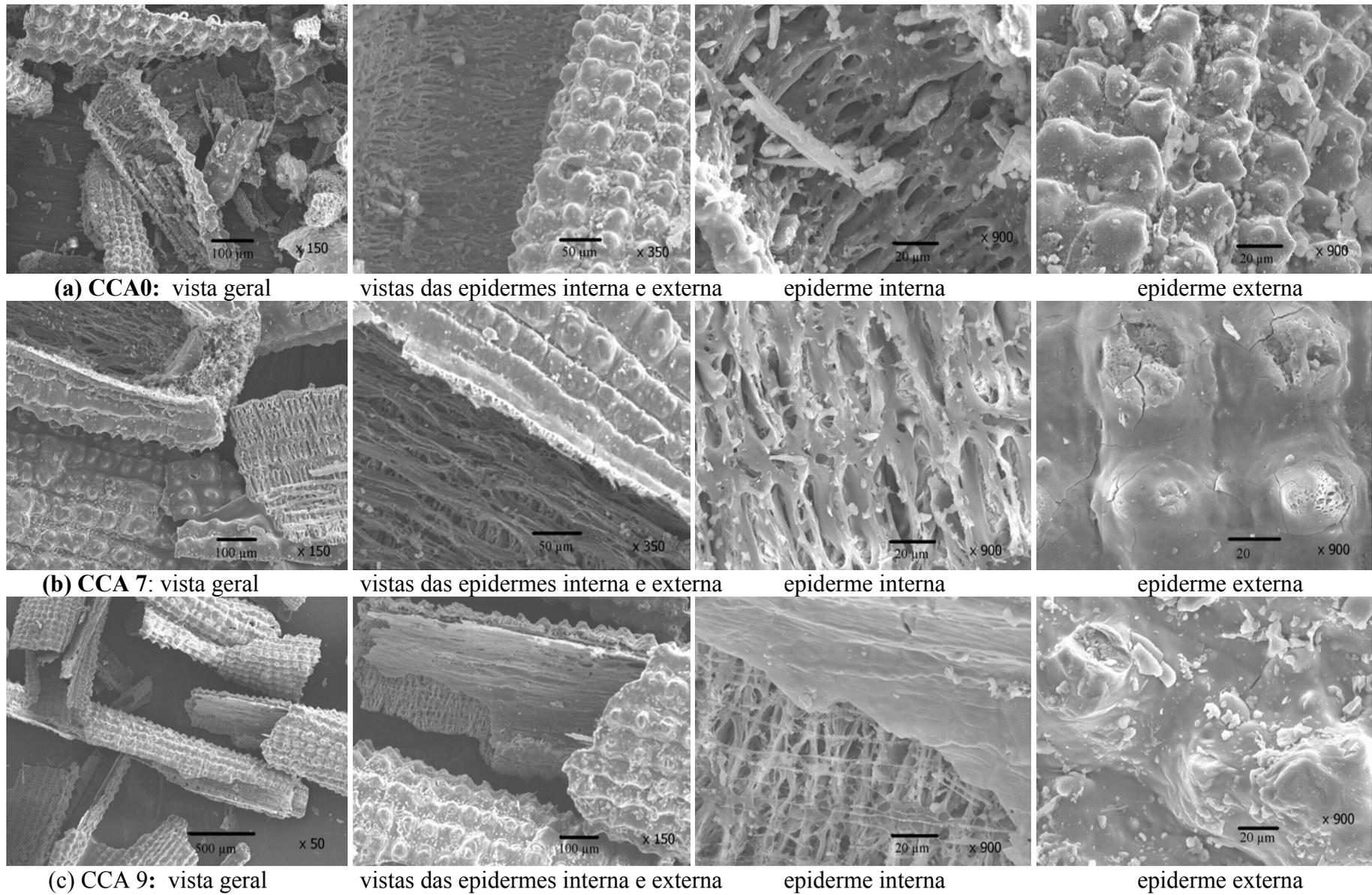


FIGURA 3.3 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários – MEV - das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, em estado natural

Pela observação das fotos da FIG. 3.3 constata-se que, de forma geral, as cinzas têm aspectos semelhantes entre si, mantendo similaridade com a casca. Das quatro camadas estruturais da casca identificadas por Huston (1972), duas são facilmente notadas: a epiderme externa, que lembra uma espiga de milho (4º coluna) e a célula parênquima esponjosa com aspecto rendilhado (3º coluna). No entanto, parece haver um refinamento da parte rendilhada da cinza CCA0 para a CCA9, no mesmo sentido que cresce a cristalinidade das partículas. Diferentemente das demais, na CCA9 constata-se a presença da epiderme interna (3º coluna).

3.2.2.4 Caracterização Térmica: Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

a) Técnica empregada

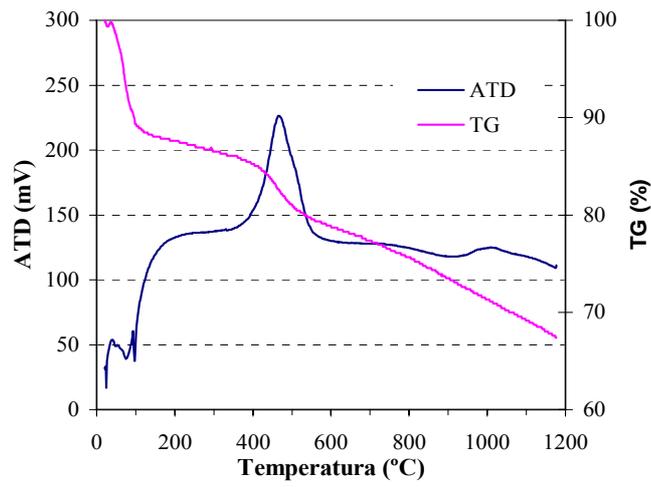
Estas análises têm o objetivo de avaliar fenômenos de transformação, tais como desidratações, decomposições, mudanças de fase e reações químicas acompanhadas de efeitos endotérmicos e exotérmicos.

Os ensaios foram realizados em um equipamento de análise térmica simultânea marca Harrop, modelo STA 736. A taxa de aquecimento foi de 10 K/min, até aproximadamente 1000°C. As análises foram realizadas no LACER – Laboratório de Cerâmica da UFRGS.

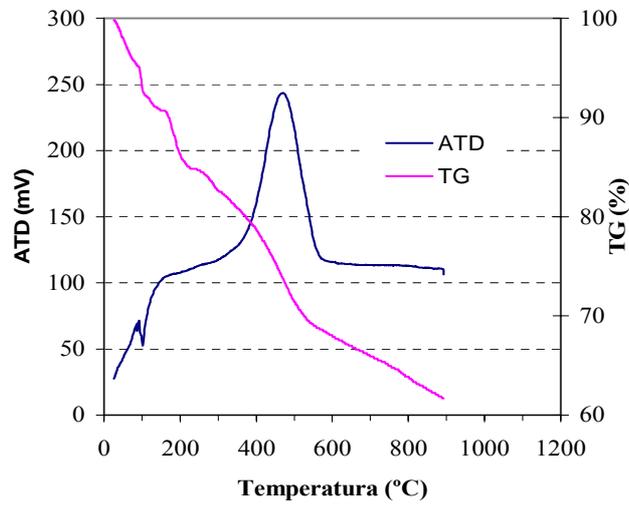
b) Caracterização das CCA

A FIG. 3.4 apresenta gráficos de análise térmica diferencial e termogravimétrica das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9.

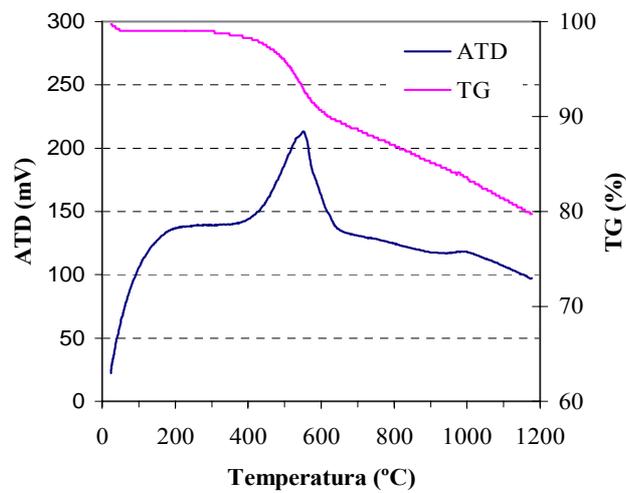
Estas curvas mostram que todas as cinzas sofrem uma transformação de fase em torno dos 500°C. Além disto, as cinzas CCA0 e CCA7 também apresentam outra alteração de fase em temperatura inferior, em torno de 100°C.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3.4 Análise térmica das cinzas - (a) CCA0; (b) CCA7 e (c) CCA9

Quanto à análise termogravimétrica, as cinzas apresentam comportamento diferenciado entre si. A cinza CCA0 tem uma acentuada perda de massa em temperatura inferior a 100°C, possivelmente associada à perda de água adsorvida superficialmente. Weber (2001) também identificou este primeiro estágio de perda de massa, cuja etapa se completou por volta dos 200°C. A partir daí, a CCA0 perdeu massa com o aumento da temperatura, de forma mais acentuada após 400°C, quando ocorre a transformação de fase. Esta etapa não se verificou nas outras duas cinzas. Na CCA 7, houve perda constante de massa até 800°C e na CCA9, praticamente, não houve perda de massa antes dos 400°C, quando, então, há perda acentuada durante transformação de fase.

Segundo Weber (2001), aos 480°C é registrado um pico exotérmico de ADT característico da combustão do carbono, que permaneceu na cinza após a queima da casca, além da eliminação de água de constituição e materiais voláteis, que coincide com acentuada perda de massa registrada na TG nesta faixa de temperatura. Aos 1100°C foi observado um pequeno pico exotérmico referente à máxima cristalização da fase cristobalita. Nakata *et al.* (1989) *apud* Weber (2001) também evidenciaram este pico, porém em torno de 990°C. Nas cinzas CCA0 e CCA9, este pico também foi observado, porém em torno de 1020°C.

Outras caracterizações das cinzas residuais e de referência que se façam necessárias, conforme o tipo de ensaio e/ou tratamento a que sejam submetidas, são apresentadas nos capítulos específicos.

3.2.3 Cimento

Foi empregado cimento CPV ARI, cujas características são apresentadas na TAB. 3.8. Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com os procedimentos das Normas Brasileiras indicadas na TAB 3.8. O emprego deste tipo de cimento se justifica por ser, comercialmente, o cimento disponível com menor teor de adições, neste caso, *filler* calcáreo, e sem adições pozolânicas. Assim, são evitados efeitos combinados de diferentes adições. Desta forma, neste trabalho, o CP V ARI funcionou como cimento-base para a produção dos cimentos com substituição por CCA beneficiada. Este procedimento se assemelha ao que acontece atualmente na indústria cimenteira, onde os diferentes tipos de cimento são fabricados a partir de um cimento-base (clínquer + gesso),

ao qual são feitas as diversas adições, em diferentes percentuais de substituição. Por exemplo, no caso do cimento ARI, o clínquer é o mesmo usado na fabricação do cimento convencional, porém permanecendo no moinho por tempo mais prolongado (ITAMBÉ, 2005).

TABELA 3.8 Características do cimento CP V – ARI utilizado

Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V ARI					
<i>Análise Química</i> (Fluorescência raios X)		<i>Análise Física</i>		<i>Resistência à compressão</i> (NBR 7215/1991)	
SiO ₂	19,82	Água de consistência normal NBR NM 42/2003	33,1%	Idade (dias)	MPa
Al ₂ O ₃	4,118	Massa específica (g/cm ³) NBR NM 23/2000	3,01	1	19,2
Fe ₂ O ₃	3,62	Início de pega (min) NBR NM 65/2003	131	3	39,4
CaO	62,86	Fim de pega (min) NBR NM 65/2003	276	7	42,0
MgO	1,09	Diâmetro 50% passante (µm) (laser)	9,19	28	48,3
SO ₃	3,00	Diâmetro médio (µm) (laser)	12,45	91	53,6
K ₂ O	1,512				
Na ₂ O	0,03				
CO ₂	3,96				

3.2.4 Areia

Para a confecção dos corpos-de-prova de argamassa, foi empregada areia normal conforme prescrições da NBR 7214/82 – *Areia Normal para ensaio de concreto*.

3.2.5 Aditivo

Foi adotado um aditivo superplastificante de 3^a geração, com base numa cadeia de éter carboxílico modificado. Sua base química é de policarboxilatos, com massa específica entre 1,067 e 1,107 g/cm³ e percentual de sólidos entre 38 e 42%, conforme dados do fabricante.

3.3 ENSAIOS APLICADOS ÀS CCA

3.3.1 Avaliação Colorimétrica

3.3.1.1 Sistema de Avaliação Colorimétrica

O sistema empregado foi o Espaço da Cor $L^*a^*b^*$, desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação – CIE, em 1976, e também conhecido por CIELAB. Atualmente, é utilizado em diversos campos da ciência, no qual L^* indica a luminosidade, enquanto a^* e b^* são coordenadas cromáticas que indicam a intensidade da cor num plano bidimensional. A coordenada a^* indica inclinação ao vermelho no sentido positivo (+) e, ao verde, no sentido negativo (-). Já a coordenada b^* , no sentido positivo (+), é dirigida ao amarelo, enquanto no sentido negativo (-), vai em direção ao azul (MINOLTA, 1998). Este espaço é representado graficamente por uma esfera sólida, que representa o espaço de cor tridimensional, conforme mostra a FIG. 3.5.

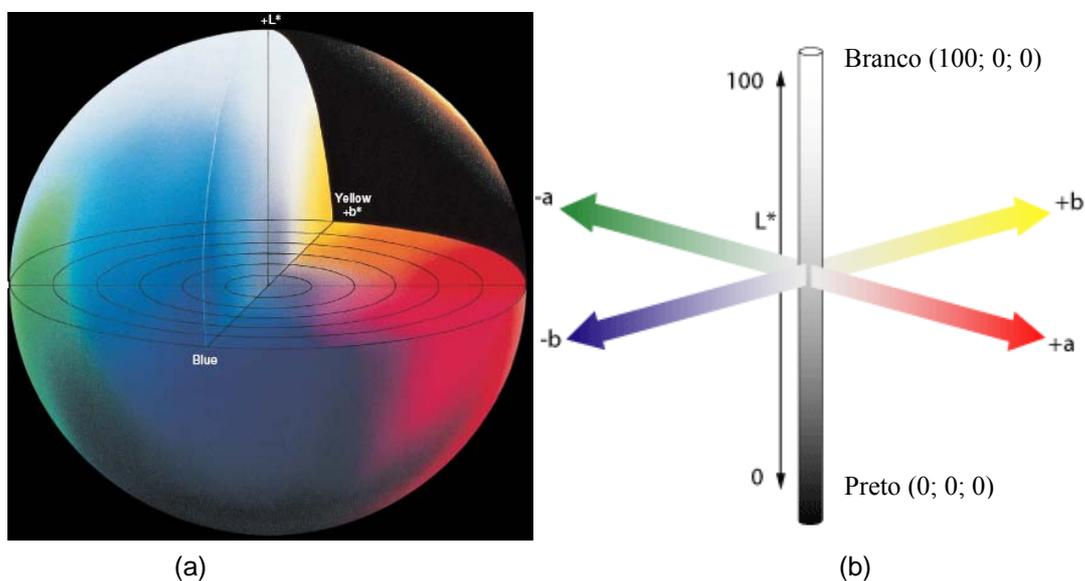


FIGURA 3.5 Representações do espaço da cor CIE Lab - (a) sólido de cor (b) eixos
Fonte: MINOLTA, 1998.

3.3.1.2 Equipamento de medição colorimétrica

O equipamento empregado para as medições das coordenadas foi um espectrofotômetro modelo CM-508, Minolta. A FIG. 3.6 mostra o espectrofotômetro utilizado e a amostra de CCA prensada.

3.3.1.3 Leituras colorimétricas

Foram realizadas 2 leituras por amostra. As leituras colorimétricas das amostras foram feitas com confecções de pastilhas prensadas. Isto foi possível devido à fina granulometria do material. Tais leituras foram realizadas no Laboratório de Processamento de Carvão – LAPROM – UFRGS.

3.3.1.4 Análise Estatística

Para a análise estatística foi empregada uma análise fatorial com duas repetições, sendo a variável de resposta o valor da luminosidade obtido nas leituras cromáticas. Os dois fatores considerados são: tipo de amostra e tipo de tratamento, e seus respectivos níveis determinados conforme o tipo de beneficiamento que estava sendo avaliado.



(a)



(b)

FIGURA 3.6 (a) Espectrofotômetro modelo CM-508, Minolta, instalado sobre base rígida para facilitar as leituras; (b) Amostra de CCA em pastilha prensada

3.3.2 Ensaio de pozolanicidade

Para a determinação da pozolanicidade das CCA, foram empregados os seguintes ensaios:

3.3.2.1 Ensaio descrito na NBR 5752/92 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica com cimento.

O IAP é definido como a relação entre a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova de argamassa com CCA e a resistência média obtida pela argamassa de referência, também aos 28 dias. O IAP é expresso em percentual.

A água requerida, também expressa em percentual, é a relação entre as quantidades de água necessárias para obtenção de índices de consistência normais de (225 ± 5) mm para as argamassas com CCA e de referência, respectivamente.

3.3.2.2 Ensaio descrito na NBR 5752/92 com alterações propostas neste trabalho e, aqui, identificado como “NBR 5752/92 Alterada”.

A determinação de atividade pozolânica com cimento Portland é feita com alteração do processo descrito na NBR 5752/92, no qual é adotada a mesma relação água/aglomerante da argamassa de referência e empregado uso de aditivo superplastificante para obtenção da consistência de (225 ± 5) mm.

O objetivo desta alteração no ensaio foi tornar mais justa a comparação entre os resultados obtidos pela argamassa de referência e pelas argamassas com pozolana (CCA), pois, no método original, a variação da relação água/aglomerante determinada em função da consistência pode distorcer as conclusões quanto à pozolanicidade do material, pois a resistência da pasta de cimento endurecida depende basicamente da porosidade, que é função da relação água/aglomerante (WEBER, 2001). A manutenção deste tipo de ensaio se justifica por ser considerado aquele que melhor representa a complexidade da interação pozolana/cimento e a respectiva sinergia entre a reação pozolânica, o efeito *filler* e dos pontos de nucleação das partículas de CCA na pasta de cimento, conforme comentado no

item 1.3.5. (RÊGO, 2004). Além do mais, os aditivos são usualmente empregados com as superpozolanas, contribuindo, através de sua ação dispersante, para o melhor desempenho da CCA.

Assim, a avaliação das cinzas beneficiadas quanto à pozolanicidade foi feita sempre através de dois Índices de Atividade Pozolânica com o cimento, um de acordo com a NBR5752/92 e outro, conforme “NBR 5752/92 Alterada”, conforme justificativa acima.

A NBR 12653/92 – *Materiais pozolânicos* - estabelece que um material, no caso a CCA, para ser classificado como pozolânico, entre outros critérios, deve atingir IAP $\geq 75\%$ e percentual de água requerida inferior a 110% (classe E).

3.3.2.3 Projeto estatístico

O projeto estatístico adotado é uma análise fatorial, sendo considerados os seguintes fatores: tipo de cinza, tipo de beneficiamento e tipo de moagem. A variável de resposta considerada foi resistência à compressão aos 28 dias. A TAB. 3.9 apresenta o projeto estatístico a ser utilizado no capítulo 6 para avaliar as cinzas beneficiadas. A mesma avaliação estatística foi usada para os percentuais de água requerida e de aditivo empregado.

TABELA 3.9 Projeto Estatístico: Resistência à compressão (NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 Alterada”): Análise Fatorial com repetição

Fator		Níveis	
A	Tipo de cinza	Fixo	3 níveis
B	Tipo de beneficiamento	Fixo	3 níveis
C	Tipo de moagem	Fixo	2 níveis
Nº de repetições: 3		Referência – CP’S sem substituição de cinza	
Total: 57 corpos de prova			

3.3.2.4 Execução dos ensaios

Os ensaios foram executados sempre com os mesmos materiais básicos, quais sejam, Cimento CP V – ARI, areia normal, água potável e superplastificante, todos apresentados e especificados no item 3.3.3. Além destes materiais, as cinzas empregadas são especificadas em cada experimento.

Para a determinação dos IAP para cada cinza beneficiada, foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 10cm de altura, de argamassa executada com substituição de 35%, em volume. A argamassa de referência foi executada somente com cimento Portland CP V -ARI.

A moldagem e cura dos corpos-de-prova foram realizadas de acordo com o prescrito na NBR 7215/96.

A fim de minimizar as variáveis que possam intervir nos resultados do ensaio de ruptura à compressão e, portanto, reduzir a variabilidade dos resultados, foi adotado procedimento para uniformizar a umidade dos corpos-de-prova. Para tanto, os corpos-de-prova foram capeados 24 h antes do ensaio, e imediatamente colocados em câmara úmida e lá permanecendo até minutos antes da ruptura.

A ruptura dos corpos-de-prova à compressão simples foi realizada aos 28 dias, na escala de até 200 kN e sempre na velocidade de carregamento de 0,3 kN/min, sendo empregada a Prensa Universal, marca Shimadzu, modelo UH2000 KNA, do Laboratório de Modelos Estruturais - LEME – da UFRGS.

3.4 ENSAIOS APLICADOS AOS CIMENTOS

Neste trabalho, os ensaios aplicados aos cimentos para verificar o atendimento às exigências físicas e mecânicas estabelecidas nas normas NBR11578/91 – Cimento Portland composto e NBR 5736/91 – Cimento Portland pozolânico são aqueles constantes do programa experimental e apresentados na FIG. 3.2.

3.4.1 Resistência à compressão

O método compreende a determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa, cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme descrito na NBR 7215/96. Os corpos-de-prova foram elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento, três de areia normalizada e relação água/aglomerante de 0,48.

Para cada cimento, foram moldados quatro corpos-de-prova (CP), para cada idade. Após o ensaio de ruptura, foi calculada a resistência à compressão individual de cada CP e, posteriormente, a média das resistências individuais dos quatro corpos-de-prova ensaiados na mesma idade. Também foi calculado o desvio relativo máximo da série de quatro resultados obtidos para cada idade. Quando o desvio relativo máximo foi superior a 6%, foi calculada uma nova média, desconsiderando o valor discrepante.

A resistência à compressão foi avaliada nas idades obrigatórias de 3, 7 e 28 dias conforme as normas NBR11578/91 e NBR 5736/91, para a totalidade dos cimentos. Para a idade facultativa de 91 dias foram testados 64% do total; para os demais, a resistência à compressão nesta idade foi estimada por uma curva ajustada aos valores obtidos aos 3, 7 e 28 dias. O cimento de referência foi avaliado nas quatro idades consideradas.

3.4.1.1 Uso de superplastificante

De acordo com a norma NBR 7215/96, a relação água/aglomerante adotada para a execução dos corpos-de-prova deve ser igual a 0,48. No entanto, para alguns cimentos, principalmente aqueles com elevado percentual de CCA, a quantidade de água calculada em função desta relação não garantiu trabalhabilidade necessária à argamassa para a moldagem dos corpos-de-prova. Em alguns casos, sequer a mistura poderia ser considerada uma argamassa.

Assim, a fim de garantir a trabalhabilidade das argamassas e não alterar a relação água/cimento determinada na Norma Técnica, foi adotado o uso de superplastificante na confecção das mesmas. Para determinar a quantidade a ser usada em cada argamassa, o critério adotado foi de que o espalhamento obtido deveria ser igual àquele registrado pelo cimento de referência, isto é, pelo cimento sem adição, com variação de $\pm 2\text{mm}$.

3.4.1.2 Análise Estatística

Foi empregada uma análise fatorial com três repetições, sendo a variável de resposta o valor da resistência à compressão obtido no ensaio de ruptura dos corpos-de-prova. Cinco fatores foram considerados, a saber: tipo de cinza, tipo de tratamento, tipo de moagem, percentual de substituição e idade. A TAB. 3.10 apresenta os fatores e os

respectivos níveis. Embora tenham sido confeccionados quatro corpos-de-prova para cada cimento, no projeto estatístico foram consideradas somente três repetições, pois alguns cp's apresentaram valor discrepante, tendo sido, então, rejeitados no cálculo da média e considerados como espúrios.

TABELA 3.10 Resistência à compressão: análise fatorial com repetições

Fator			Níveis
A	Cinza	Fixo	3 níveis
B	Tipo de tratamento	Fixo	3 níveis
C	Tipo de moagem	Fixo	2 níveis
D	Percentual de substituição	Fixo	5 níveis
C	Idade	Fixo	4 níveis
C/ 3 repetições – (+ cimento de referência: s/ adição de cinzas)			
 Total: 1092 corpos-de-prova			

3.4.1.3 Prensa empregada

Para a ruptura dos corpos-de-prova nos ensaios de resistência à compressão simples foi empregada a Prensa Universal, marca Shimadzu, modelo UH2000 KNA, com capacidade para 200 toneladas, do Laboratório de Modelos Estruturais - LEME – da UFRGS.

3.4.2 Tempos de início e fim de pega

O método empregado para a determinação dos tempos de pega da pasta de cimento, com utilização do aparelho de Vicat, é aquele descrito na NBR NM 65/2003 – *Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Foi realizado um ensaio para determinação dos tempos de início e fim de pega para cada cimento avaliado.

Para execução dos corpos-de-prova foi empregada pasta de consistência normal, determinada conforme método descrito na NBR NM 43/2003 – *Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal*. É considerada pasta de consistência normal aquela em que a sonda de Tetmajer penetra uma distância de (6 ± 1) mm da placa base, nas condições estabelecidas na referida norma.

Considerando o elevado número de amostras a serem ensaiadas, optou-se por determinar os tempos de pega para os cimentos com percentuais de substituição de 10%, 33% e 50%. Tais valores ficam bem distribuídos no universo estudado de até 50%, não havendo, portanto, prejuízo na avaliação do todo com a eliminação dos percentuais de 6% e 15%.

3.4.3 Expansibilidade a quente

O método de determinação da expansibilidade a quente da pasta de cimento, empregando as agulhas de Le Chatelier, é descrito na NBR 11582/91 – *Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier*.

Os corpos-de-prova foram executados com pasta de consistência normal. De acordo com a NBR 11582/91, foram moldados três corpos-de-prova para cada cimento avaliado.

3.4.4 Pozolanicidade (método químico)

O método químico de determinação da pozolanicidade do cimento foi realizado conforme prescrito na norma NBR5753/92 – *Cimento Portland pozolânico – Determinação da pozolanicidade*. Este método também é conhecido como ensaio de Fratini.

Também foi determinado o chamado índice de atividade pozolânica proposto por Isaia (1995). Este índice quantifica o resultado do ensaio de Fratini através do cálculo do inverso da distância entre o ponto plotado no gráfico e a origem das coordenadas, multiplicado por 100. A atividade pozolânica é diretamente proporcional a este índice. A título de exemplo, no gráfico da FIG. 3.7 são locados dois pontos e aplicado o índice proposto pelo autor, cujos os resultados são apresentados na TAB. 3.11 Os valores encontrados, 12,3 para o cimento não pozolânico e 19,6 para o cimento pozolânico mostram que quanto maior o índice, maior a atividade pozolânica.

Os ensaios foram realizados no laboratório de química do LEME- UFRGS, sob a supervisão de uma técnica em química.

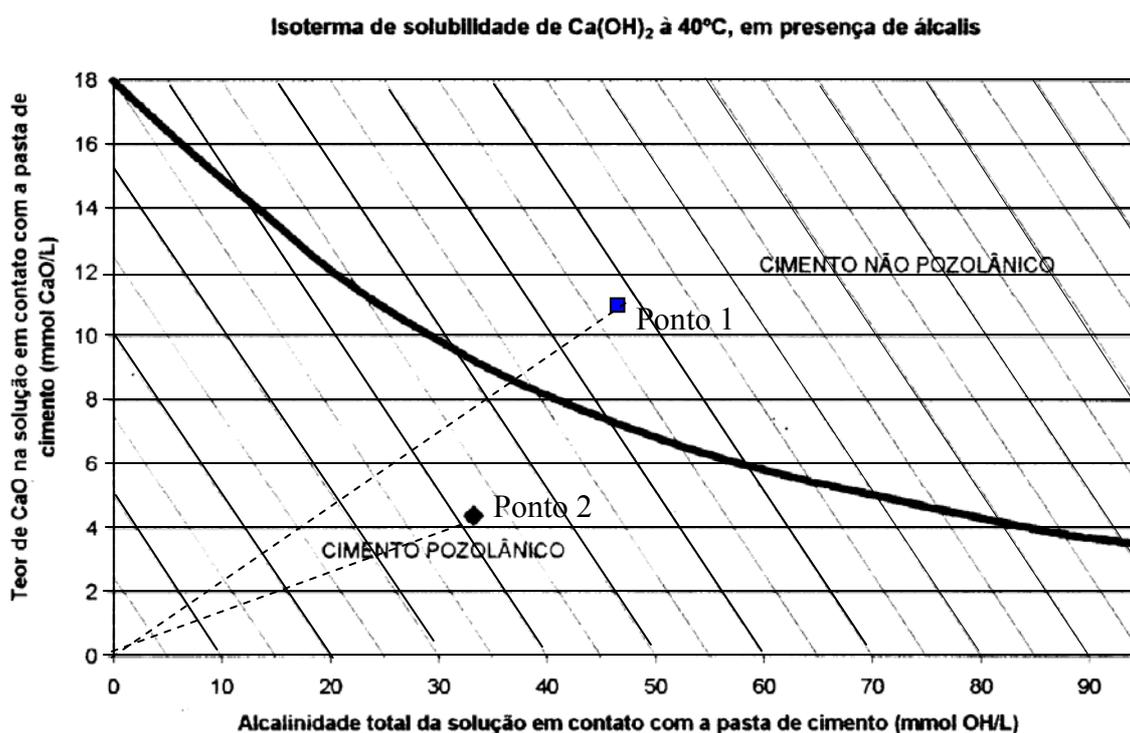


FIGURA 3.7 Gráfico de ensaio de pozolanicidade do cimento – Método de Fratini

TABELA 3.11 Exemplo do Índice de atividade pozolânica proposto Isaia (1995)

Ponto	Distância (cm)	Índice de atividade pozolânica
1	8,1	12,3
2	5,1	19,6

3.5 EQUIPAMENTOS

3.5.1 Moinhos

3.5.1.1 Moinho de Bolas

Foi empregado um moinho de bolas, com jarro de porcelana, com diâmetro de 35 cm, movido por um motor com rotação de 40 rpm. A carga empregada foi de 5kg de corpos moedores para 1 kg de cinza. Foram testadas três granulometrias de corpos moedores: bolas de alumina, com diâmetros variáveis entre 10 e 20 mm (G1), micro-esferas de alta-alumina, com 1 mm de diâmetro (G2) e mistura em partes iguais de G1 e G2 (G3). As moagens foram realizadas no Laboratório de Materiais do NORIE / UFRGS.

A FIG. 3.8 apresenta fotos do moinho de bolas e acessórios utilizados.



(a)



(b)

FIGURA 3.8 Moinho de bolas – (a) vista geral do moinho; (b) jarro e corpos moedores

3.5.1.2 Moinho Periquito

O moinho periquito empregado é da marca Servitech, modelo ST 242, composto por dois jarros com capacidade de 1000 ml cada um. Na moagem utilizou-se uma relação de 750 gramas de bolinhas para 150 gramas de cinza em cada jarro, mantendo, assim, a mesma relação 5:1 empregada no moinho de bolas. Foram empregados corpos moedores de alumina com diâmetros variáveis entre 10 e 20 mm. As moagens foram realizadas no Laboratório de Materiais do NORIE.

A FIG. 3.9 apresenta fotos com vistas externa e interna do moinho periquito.



(a)



(b)

FIGURA 3.9 Moinho Periquito - (a) Vista externa; (b) Vista interna, com jarro

3.5.1.3 Moinho Agitador

Foi empregado o moinho agitador marca Netzsch, modelo PE5, com as seguintes características: capacidade de 5 litros e rotação máxima de 1200 rpm. A carga empregada foi de 5 kg de bolas de aço com 5mm de diâmetro para 0,5 kg de cinza. As moagens foram realizadas no Centro de Tecnologia da UFRGS – CT.

A FIG. 3.10 apresenta fotos do moinho agitador utilizado.

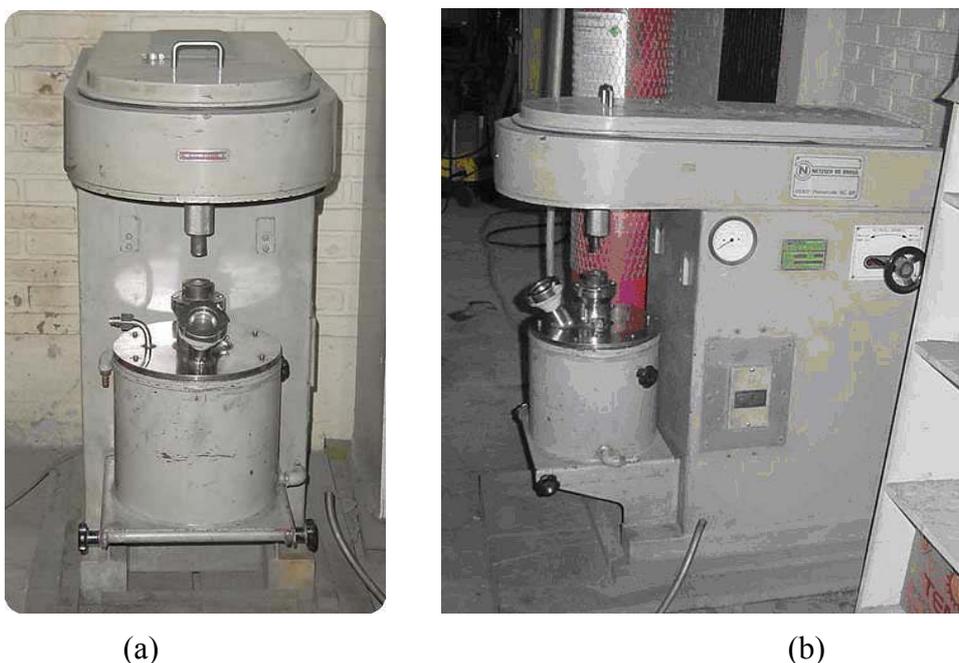


FIGURA 3.10 Moinho Agitador - (a) Vista frontal; (b) Vista lateral

3.5.1.4 Moinho Planetário

O moinho planetário empregado é marca Fritsch, modelo Pluverisett 5. Este equipamento permite selecionar a rotação e o tempo de moagem desejados; o limite máximo da rotação é 250 rpm. Foram testados dois tipos de corpos moedores: bolas de carboneto de tungstênio com diâmetros entre 7 e 15 mm e bolas de alumina com diâmetro variando entre 10 e 20 mm.

As moagens foram realizadas no Laboratório de Processamento Mineral – LAPROM, do Centro de Tecnologia – CT, da UFRGS. A FIG. 3.11 apresenta fotos do moinho planetário empregado.



(a)

(b)

FIGURA 3.11 Vistas do moinho planetário - (a) fechado; (b) aberto

3.5.1.5 Micronizador

A estrutura de um sistema de micronização é composta por rosca dosadora, micronizador, filtro de manga e válvula rotativa. O micronizador empregado, também conhecido como “*jet mill*”, é de marca MS, modelo MS200. Para as amostras de CCA, foi utilizado um equipamento piloto, com capacidade de micronizar até 50 kg do material por hora. O equipamento utilizado pertence à empresa Micro Service Indústria Química Ltda. (Diadema, SP.), onde o processo de micronização foi executado.

a) Processo de micronização

Micronização é um processo em que predomina a moagem autógena, ou seja, a redução das partículas se dá, principalmente, pelos sucessivos choques entre elas. Para isto é usado ar comprimido em alta pressão, que transfere energia para a colisão das partículas. O choque entre as partículas e as paredes do recipiente não é significativo no processo, uma vez que a direção da movimentação das partículas dentro do micronizador é calculada.

4 TRATAMENTOS PROPOSTOS

Os tratamentos têm a intenção de alterar as características da cinza, seja em termos de granulometria, composição química, transformação de fase e/ou de cor e, com isto, melhorar seu desempenho como pozolana, através de operações unitárias aplicadas em amostras de cinza de casca de arroz de forma isolada ou em conjunto.

Os estudos apresentados neste capítulo são exploratórios, tentando identificar o comportamento de diferentes cinzas submetidas a diferentes tipos de tratamentos, onde foram testados vários equipamentos, temperaturas e soluções químicas. Os tratamentos abordados neste capítulo são:

- Tratamento físico – moagem em diferentes moinhos e processos;
- Tratamento térmico – queima a diferentes temperaturas e choques térmicos;
- Tratamento químico – emprego de banhos químicos em soluções ácidas e/ou básica, seguidos de tratamento térmico.

4.1 CINZAS EMPREGADAS E AMOSTRAS TRATADAS

As cinzas empregadas, nesta etapa do trabalho, foram:

- CCA 1 e CCA 7, cinzas residuais menos cristalinas;
- CCA 3 e CCA 8, cinzas residuais mais cristalinas;
- CCA 0 - cinza de referência, predominantemente amorfa.

Para a seleção destas cinzas foi mantido o critério de trabalhar comparativamente com CCA menos e mais cristalinas. Estas CCA foram caracterizadas no item 3.2.1.

4.2 TRATAMENTO FÍSICO

O tamanho das partículas influi no desempenho da pozolana quando adicionada ao cimento e/ou concreto, conforme comentado no item 3.1.1.1. Assim, visando reduzir a granulometria inicial da CCA, como tratamento físico, foram testados os quatro moinhos caracterizados no item 3.3.1, além do processo de micronização. Também foram testados processos de moagem a seco e a úmido, além de diferentes corpos moedores.

a) Moagem a úmido

O emprego de via úmida no processo de moagem de CCA foi citado por Della (2001), no qual foi empregado um moinho de alta rotação, microesferas de alta alumina ($\phi \approx 2$ mm) e quantidade de água correspondente a 60 a 70% da massa de cinza.

4.2.1 Moagem em moinho de bolas

O processo de moagem em moinho de bolas é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, podendo, ainda, ser empregado com outros objetivos como: dispersar aglomerantes e agregados e modificar o formato das partículas. Este processo de moagem pode ser realizado a seco ou a úmido (REED, 1988 *apud* MORI, 1992).

4.2.1.1 Moagem a seco

A moagem a seco no moinho de bolas foi realizada com três diferentes granulometrias dos corpos moedores:

- G1 – bolas de alumina com diâmetro variando entre 10 e 20 mm;
- G2 – micro-esferas de alta alumina com diâmetro de 1mm;
- G3 – mistura de partes iguais, em massa, de bolas de alumina com diâmetro variando entre 10 e 20 mm com micro-esferas de alta alumina com diâmetro de 1mm.

Independente dos corpos moedores usados, a razão entre a sua carga e a quantidade de cinza foi constante, ou seja, 5kg de bolas para 1 kg de cinza.

a) Moagem com corpos moedores G1

Foram empregadas a cinza de referência, CCA0, e as cinzas residuais CCA1 e CCA3. Os tempos de moagem foram pré-estabelecidos em 2, 4 e 8 horas, buscando identificar o tempo suficiente para obter granulometrias próximas à do cimento e de acordo com resultados relatados na bibliografia (SILVEIRA, 1996; FERREIRA, 1999; SENSALÉ, 2000).

Os resultados estão apresentados, em termos de diâmetro 50% passante, no gráfico da FIG. 4.1. No Anexo III, consta tabela com as granulometrias obtidas neste processo.

Analisando os resultados obtidos por G1, a cinza mais cristalina, CCA3, embora tenha registrado os maiores diâmetros após os tempos previstos de moagem, relativamente à granulometria inicial, foi a que sofreu maior redução, passando de 52,9 μm para 7,4 μm , em 8 horas de moagem.

Para análise estatística foi empregada uma análise fatorial com dois fatores - tipo de cinza e tempo de moagem - e o diâmetro 50% passante como variável de resposta. Como resultado, os fatores e a interação entre eles se apresentaram significativos, ou seja, tanto o tipo de cinza quanto os tempos de moagem diferem entre si. Em termos de média, a ordem entre as cinzas foi mantida, ou seja, a CCA0 apresentou menores diâmetros, seguida pela CCA 1 e CCA3. E, em termos de tempo de moagem, a redução dos diâmetros foi maior com mais tempo de processamento, conforme pode ser observado no gráfico da FIG. 4.1. As planilhas da análise estatística estão apresentadas no Anexo IV.

b) Moagem com corpos moedores G2 e G3

Foram empregadas as cinzas CCA0, CCA 7 e CCA9 e os tempos de moagem de 1 e 2 horas. Os resultados estão apresentados no gráfico da FIG. 4.2, onde constata-se que a diferença de granulometria dos corpos moedores interfere nos diâmetros obtidos.

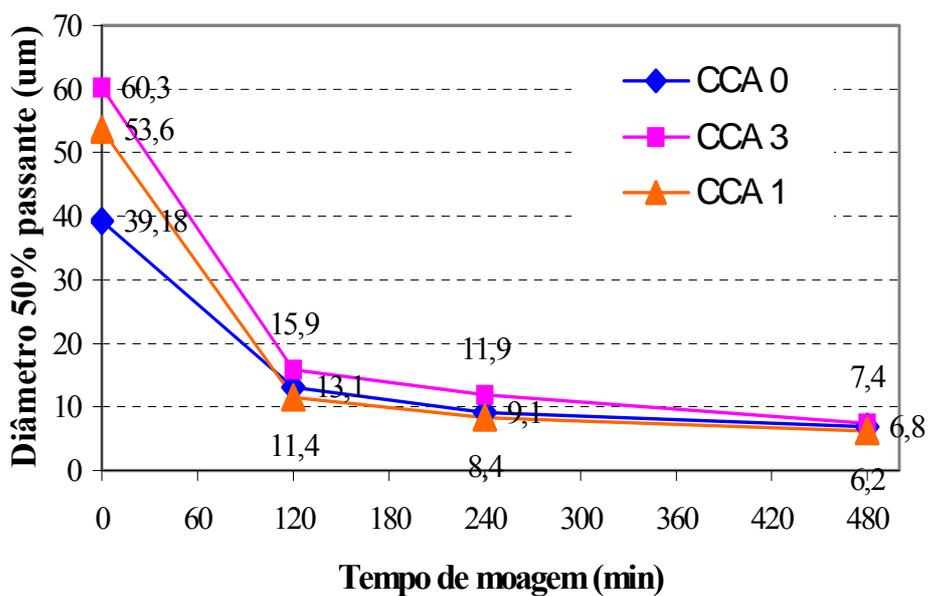


FIGURA 4.1 Dados de moagem, a seco, em moinho de bolas, com corpos moedores G1, para as cinzas CCA0, CCA1 e CCA3

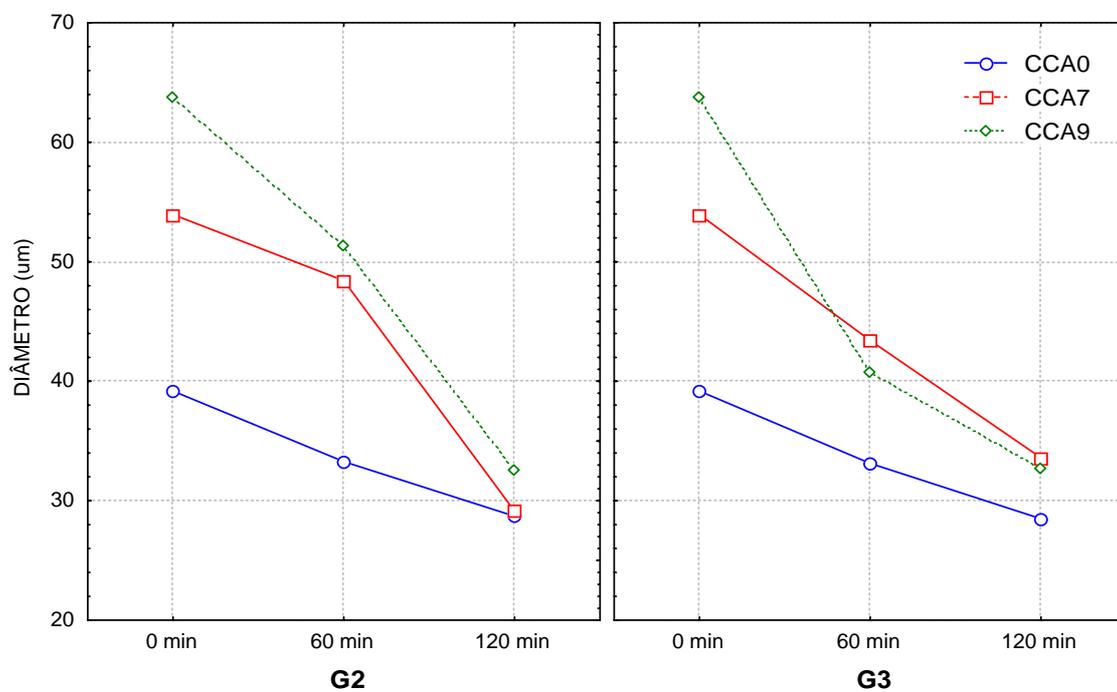


FIGURA 4.2 Dados de moagem, a seco, em moinho de bolas, com corpos moedores G2 e G3, para as cinzas CCA0, CCA7 e CCA9

Para analisar estatisticamente os dados, também foi empregada uma análise fatorial, cujos fatores são: tipo de cinza, granulometria dos corpos moedores e tempo de moagem. Os resultados indicam que todos os fatores são significativos, bem como a interação entre eles. Os resultados, em termos de tipo de cinza e tempo de moagem, são semelhantes aos obtidos com G1, ou seja, a CCA0 obteve os menores diâmetros e o maior tempo (120 min) registrou a menor média. Quanto à granulometria dos corpos moedores, G3 registrou a menor média de 41,02 μm , enquanto G2, 42,27 μm . As planilhas da análise estatística estão apresentadas no Anexo IV.

A partir dos resultados obtidos pela cinza CCA0, foi montado o gráfico da FIG. 4.3, onde se observa que o menor diâmetro foi obtido com G1, para o mesmo tempo de 120 min.

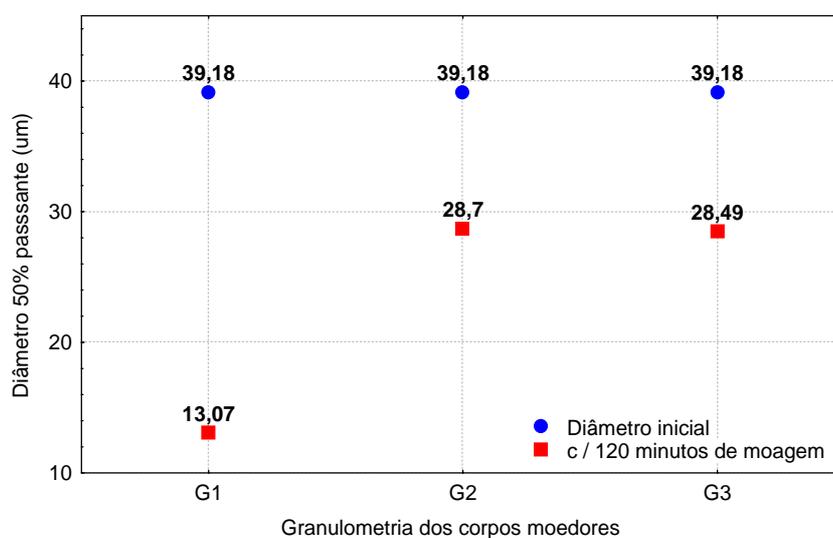


FIGURA 4.3 Resultados de moagem obtidos pela CCA0, em moinho de bolas, a seco, por 120 min, em função de diferentes granulometrias dos corpos moedores

4.2.1.2 Moagem a úmido

Como primeira alternativa, tentou-se realizar o processo de moagem a úmido empregando a quantidade de água recomendada por Della (2001), porém no moinho de bolas com corpos moedores G1, tal como havia sido usado no processo a seco. Nestas condições não foi possível realizar a moagem, pois as misturas feitas, tanto com a CCA0, quanto com a CCA1, ficaram muito pastosas, aderindo às paredes do moinho e não produzindo qualquer resultado.

A partir daí, foram desenvolvidos alguns pré-testes com o objetivo de definir a quantidade de água a ser usada a fim de viabilizar a realização do processo de moagem a úmido, neste moinho com estes corpos moedores, já que com a quantidade indicada (60 a 70% da massa de CCA) isto não foi possível.

Pré-teste 1: Foi adicionada água em quantidade necessária para fazer o moinho funcionar sem haver aderência da mistura às paredes, chegando-se a valor igual a 3 vezes a massa de pó. Este pré-teste foi realizado com as cinzas CCA0 e CCA3 por 2 horas, CCA1 e CCA3 por 1 hora e CCA6 por 10 horas.

Verificou-se que, à medida que tempo de moagem ia passando, a barbotina ia se tornando muito fluída. Tal fluidez implicou em muito desperdício de material, sujeira e dificuldade de manuseio do jarro cerâmico quando cheio e na sua descarga. O gráfico da FIG. 4.4 apresenta os resultados obtidos neste pré-teste 1. Os resultados tabelados estão no Anexo III.

Pré-teste 2: Com o objetivo de trabalhar com a quantidade de água indicada por Della (2001) e constatado que a barbotina ia se tornando mais fluída com a redução do diâmetro, foi testada a seguinte alternativa: fazer uma pré-moagem a seco e depois misturar água. Esta pré-moagem tinha o objetivo de reduzir o tamanho das partículas, a ponto de que formassem uma barbotina com boa consistência com a quantidade de água citada (60 a 70% da massa de cinza).

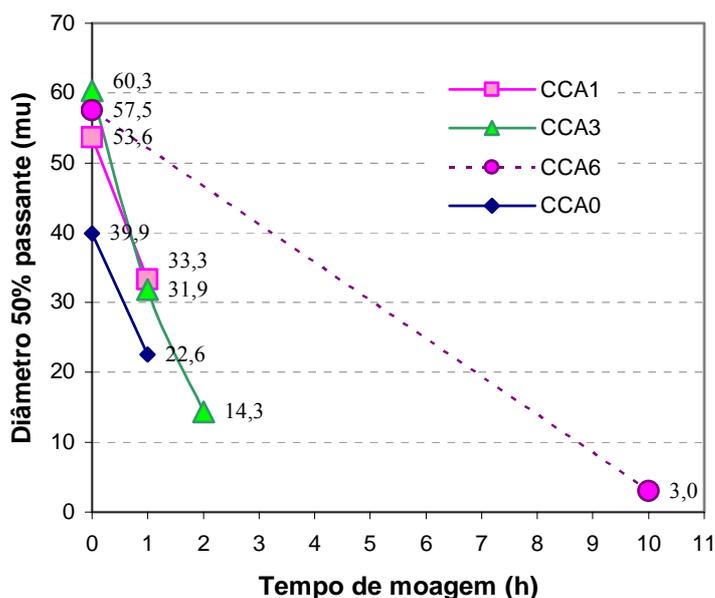


FIGURA 4.4 Resultados obtidos de moagem a úmido, em moinho de bolas - Pré-teste 1

Neste teste, foi empregado 1 kg de CCA 0, com tempo de pré-moagem, a seco, de 30 min, quando, então, foi adicionada 700 ml de água. A barbotina obtida ainda era muito pastosa, aderindo às paredes do moinho, não permitindo a realização do processo de moagem. Então, foi-se adicionando mais água, até atingir uma consistência que possibilitasse a execução da moagem, chegando a 1100 ml de água, passando, então, a ser moída por 2 horas.

Em termos de resultados do Pré-teste 2, o diâmetro 50% passante inicial de 39,9 µm, após 2,5 horas gastas nas duas etapas do processo, chegou a 11,4 µm.

Analisando os dados obtidos, constata-se que o tempo de pré-moagem a seco de 30 min não foi suficiente para reduzir o tamanho dos grãos a ponto de permitir a realização do processo a úmido com quantidade de água igual a 70% da massa de cinza, conforme indicado por Della (2001).

4.2.1.3 Comparação entre os processos por via seca e úmida no moinho de bolas

A FIG. 4.5 apresenta comparativamente os dados de moagem das cinzas CCA0 e CCA3, respectivamente nos gráficos (a) e (b), obtidos em moinho de bolas, considerando os processos a seco e a úmido (pré-testes 1 e 2).

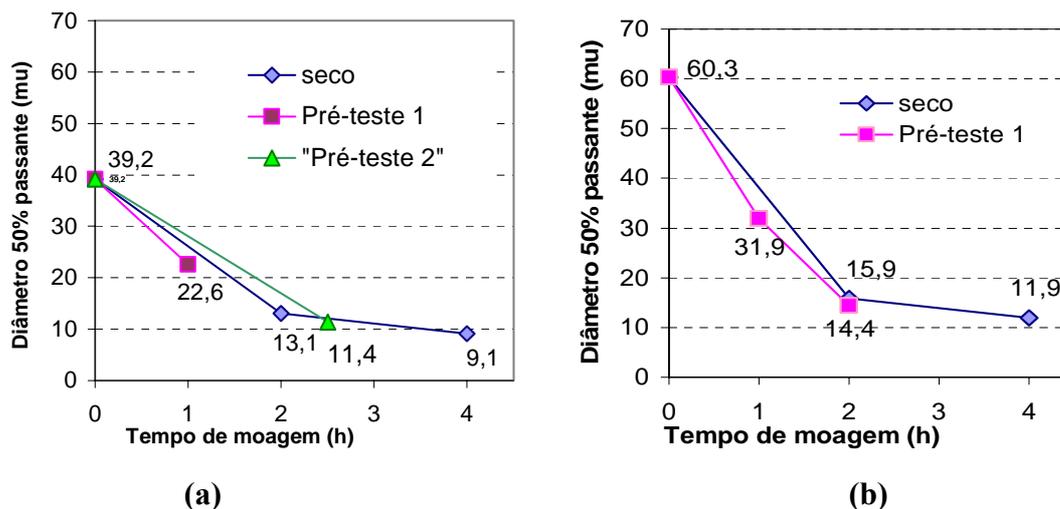


FIGURA 4.5 Resultados obtidos das cinzas CCA0 (a) e CCA3 (b), em moinho de bolas em processos a seco e a úmido (pré-testes)

Os dados obtidos com os pré-testes não permitem concluir se o processo de moagem via úmido no moinho de bolas é mais ou menos eficiente para a cinza de casca de arroz, quando comparado com o processo a seco, pois observando os gráficos da FIG. 4.5, nota-se que, para a CCA0 (a), o processo úmido é desvantajoso; no entanto, para a CCA3 (b) ocorre o contrário.

4.2.2 Moagem em moinho planetário

Com este moinho também foram experimentados processos de moagem via seco e via úmido da cinza de casca de arroz, tal como no moinho de bolas, sendo empregadas as cinzas de referência, CCA0, e a residual CCA3.

4.2.2.1 Moagem a seco

Como não havia relatos do uso deste equipamento na moagem de cinzas de casca de arroz, foram feitas várias tentativas com diferentes combinações de tempo de moagem e rotação do equipamento, na busca de otimizar o processo. A TAB. 4.1 apresenta os resultados destas combinações.

TABELA 4.1 Distribuição granulométrica das cinzas moídas em moinho planetário, via seca

Combinações Rotação x Tempo (min)		Cinzas	Diâmetro (μm)		
			10%	50%	90%
200 rpm x 20 min		CCA 0	4,87	28,81	64,09
		CCA 3	4,57	27,74	61,29
220 rpm x 80 min		CCA 3	10,28	51,72	90,72
200 x 20 +250 x 20		CCA 3	1,60	9,44	29,06
250 rpm	40	CCA 3	9,29	45,02	76,58
	60	CCA 3	9,12	42,74	73,73
		CCA 0	4,26	30,85	71,32
	80	CCA 3	4,50	28,76	64,96
CCA 0		3,05	23,51	69,55	
250 rpm (com parciais de 15 min)	45 (3 x 15)	CCA 3	10,62	47,25	78,35
		CCA 0	3,77	23,82	55,97
	75 (5 x 15)	CCA 3	3,22	18,98	51,07
		CCA 0	1,26	6,75	21,99
	90 (6 x 15)	CCA 3	1,78	9,75	31,72
		CCA 0	1,19	5,19	16,17
	70 (4x 15 +10)	CCA 3	3,46	20,17	50,90
		CCA 0	1,24	5,70	17,50
200 rpm (com parciais de 20 min)	20	CCA 0	3,58	22,61	54,22
		CCA 3	3,48	21,87	50,53
	40 (2 x 20)	CCA 0	1,91	10,65	34,90
		CCA 3	1,70	10,24	29,09
	60 (3 x 20)	CCA 0	1,73	8,94	27,81
		CCA 3	1,41	7,65	21,97
	80 (4 x 20)	CCA 0	1,53	7,50	23,23
		CCA 3	1,27	6,09	18,09
150 rpm x 40 min		CCA 0	4,25	26,09	61,46
		CCA 3	4,36	25,98	57,31

Como material moedor, foram empregadas bolas de carbeto de tungstênio, de dois tamanhos, 10 e 20 mm de diâmetro, com massa de 7,6 e 63,0 g, respectivamente. A carga utilizada foi de 6 vezes a massa da cinza, predominando as esferas de menor diâmetro.

As moagens realizadas a 250 rpm, nos tempos de 40, 60 e 80 min, apresentaram resultados aquém dos esperados, possivelmente porque a força centrífuga gerada pela elevada rotação manteve a cinza junto às paredes do recipiente. Desta forma, somente a camada mais interna ficou finamente moída, pois estava em contato e atrito com os corpos moedores. Assim, os resultados indicam que, com elevadas rotações, tende a haver um acúmulo da cinza junto às paredes do moinho.

Esta suposição explicaria o resultado obtido com a CCA3, de 9,44 μm , que foi obtido por moagem realizada em duas etapas de 20 min (4^o linha da TAB. 4.1). Após a 1^o etapa, a cinza foi removida e retirada do contato com as paredes e, então, o processo teve seqüência.

Considerando as suposições acima, foram testadas moagens com etapas de 15 e 20 minutos, conforme pode ser observado nos demais dados da TAB. 4.1. A FIG. 4.6 mostra graficamente alguns destes resultados em relação às cinzas CCA0 e CCA3.

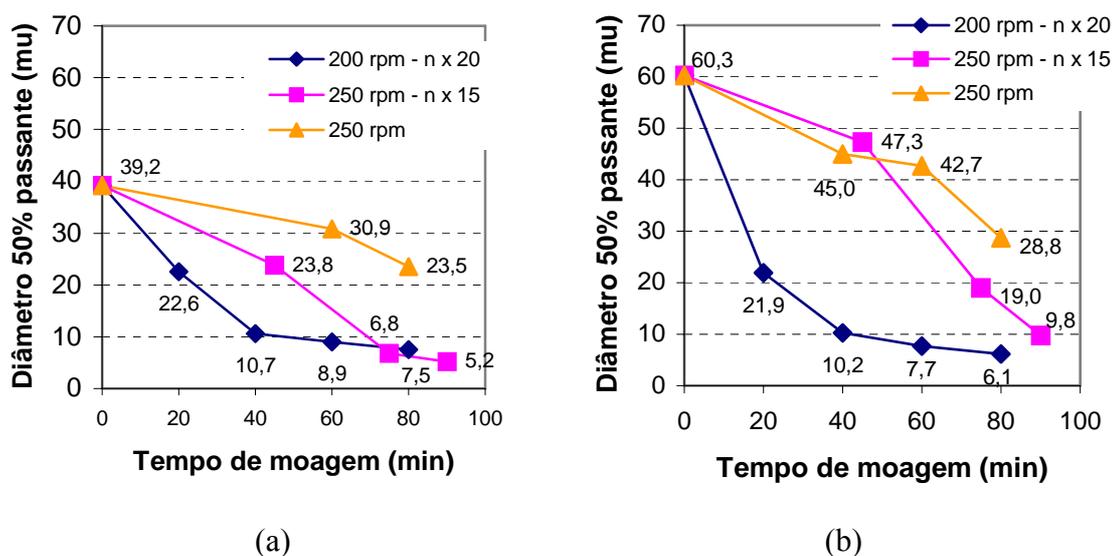


FIGURA 4.6 Moagem em moinho planetário, a seco – (a) para a cinza CCA0; (b) para a cinza CCA 3

As melhores reduções dos diâmetros das partículas ocorreram quando o processo de moagem foi realizado em etapas, ou seja, quando seria minimizado o efeito suposto anteriormente.

Os resultados indicam que maior número de esferas de menor diâmetro aumenta a redução do diâmetro das partículas, sendo que para a cinza CCA3, isto se verificou com mais evidência. Assim, este exemplo indica que a seleção do diâmetro das esferas influi no tempo de moagem e na granulometria final, que tende a ser menor quanto menor o diâmetro dos corpos moedores.

4.2.2.2 Moagem a úmido

Tal como aconteceu com a moagem no moinho de bolas, a quantidade de água indicada na bibliografia (DELLA, 2001) não foi suficiente para a realização do processo, sendo necessário testar vários percentuais em relação à massa de cinza. Assim, foram desenvolvidos alguns pré-testes com o objetivo de definir a quantidade de água a ser usada na moagem de cada cinza.

Pré-teste 1: foi empregada uma quantidade de água necessária para fazer o moinho funcionar sem haver aderência da mistura às paredes, chegando a 3 vezes a massa de pó. Foram utilizadas bolas de carbetto de tungstênio, com carga igual a 6 vezes a massa de cinza e rotação de 200 rpm. Os tempos testados foram de 15, 30, 45, 60 e 90 min. Tal como ocorreu com o moinho de bolas, a medida que tempo de moagem ia correndo, a barbotina ia se tornando muito fluída.

Pré-teste 2: o material moedor e a carga aplicada foram os mesmos do teste anterior, porém numa rotação de 100 rpm, por tempos de 10, 40 e 80 min. A quantidade de água também foi excessiva.

Pré-teste 3: foram empregadas bolas de alumina, com diâmetros entre 15 e 20 mm, com carga igual a 2,5 vezes à massa de cinza. Foi feita uma pré-moagem a seco durante os primeiros 10 minutos, quando, então, foi adicionada água em quantidade igual a 70% da massa de cinza, conforme indicado por Della (2001), e sem haver aderência da mistura às paredes do recipiente. O teste foi realizado com a CCA3, com rotação de 200 rpm, em tempos de 30 e 60 min.

Os principais resultados dos pré-testes 1, 2 e 3 são apresentados no gráfico da FIG. 4.7. A totalidade dos resultados estão tabelados no Anexo III.

Considerando a cinza residual CCA3, o pré-teste 3 mostrou-se mais eficiente que o 1, visto que para obter o diâmetro de 7 μm foi preciso 60 minutos, contra os 90 minutos necessários no pré-teste 1, conforme pode ser observado no gráfico da FIG. 4.7. Esta vantagem pode ser creditada à quantidade de água inserida no processo ou ao diâmetro e tipo das bolas e carga empregadas. A fim de constatar a influência da quantidade de água no resultado, é conveniente repetir a moagem com mesmos corpos moedores e respectiva carga.

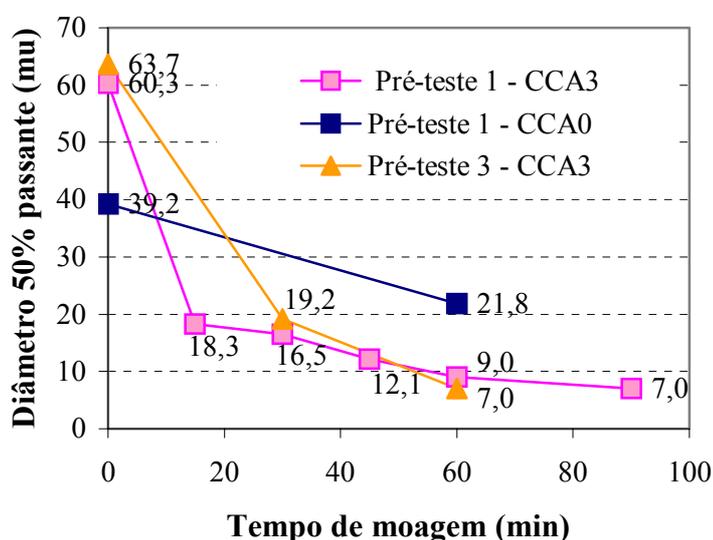


FIGURA 4.7 Variação do diâmetro 50% passante nos pré-testes realizados em função do tempo de moagem praticado

4.2.2.3 Comparação entre os processos por via seca e úmida no moinho planetário

A FIG. 4.8 apresenta gráficos comparativos de resultados, em função do tempo de moagem, obtidos no moinho planetário, em processos por via seca e úmida, na mesma velocidade de rotação (200 rpm), das cinzas CCA0 e CCA3.

Para a cinza CCA0, os melhores resultados foram obtidos por via seca, em tempos parciais de 20 minutos, quando comparado com as demais rotações usadas ou, quando comparado com o processo úmido executado na mesma velocidade de rotação,

porém com excesso de água. Isto pode observado no gráfico (a) da FIG. 4.8 que mostra os melhores resultados obtidos em ambos os processos.

Para a cinza CCA3, cujos melhores resultados estão mostrados no gráfico (b) da FIG. 4.8, constata-se que o processo a seco realizado em tempos parciais de 20 minutos apresenta resultados semelhantes ao processo a úmido com pré-moagem a seco, onde a quantidade de água empregada foi aquela citada por Della (2001), quando foi obtido o menor diâmetro (7 μm) para o tempo de moagem de 1 hora.

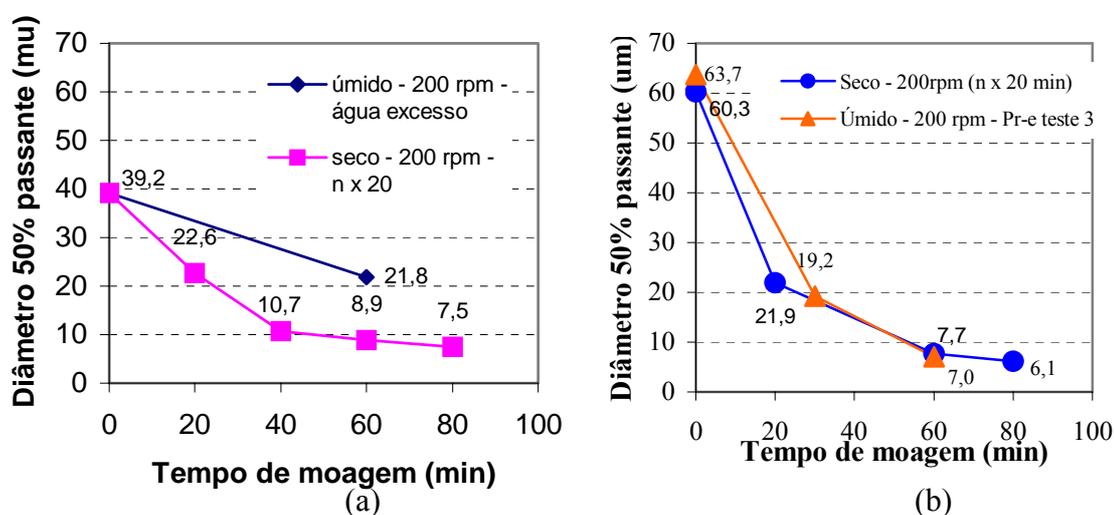


FIGURA 4.8 Comparação de resultados obtidos em moinho planetário, em 200 rpm, por via seca e úmida – (a) para a cinza CCA0; (b) para a cinza CCA3

4.2.3 Moagem em moinho periquito

Foram testadas várias alternativas de moagem no moinho periquito, porém todas com a cinza CCA0. Foram empregados vários tempos de moagem e duas granulometrias dos corpos moedores – G1 e G2. Os dados obtidos estão apresentados na TAB. 4.2. Em todas as tentativas, a carga de corpos moedores sempre foi de 5:1.

Para o moinho periquito, assim como para o moinho agitador, só foi testada somente moagem por via seca, devido às dificuldades verificadas com os moinhos anteriores, tanto durante o processo, como na determinação da quantidade de água a ser usada.

TABELA 4.2 Composição granulométrica da CCA0 obtida no moinho periquito

G	Tempo de moagem (min)	Diâmetro (μm)			
		10%	50%	90%	médio
G1	15	0,98	3,95	10,0	4,80
	30	0,86	2,94	6,85	3,48
	60	0,85	2,59	6,16	3,13
	120	0,92	2,80	6,45	3,33
G2	60	0,98	4,23	11,51	5,32

Os dados da TAB. 4.2 mostram que o moinho periquito é eficiente na redução do diâmetro das partículas. Observando-se os dados resultantes do processamento com G1, nota-se que a partir de 30 minutos de moagem, os ganhos na redução do tamanho das partículas são inexpressivos para o aumento do tempo.

Cabe registrar que após a moagem com emprego de micro esferas (G2), a cinza apresentou pequenos grumos, que exigiram certa pressão dos dedos para se desfazerem. Além disto, os resultados não foram melhores que aqueles obtidos com G1.

4.2.4 Moagem em moinho agitador

Neste moinho, tal como no moinho periquito, foi testado somente o processo de moagem por via seca. As cinzas empregadas foram a cinza de referência, CCA0 e a residual, CCA9. Foram dois os tempos de moagem testados: 15 e 60 minutos. Os resultados obtidos estão mostrados, graficamente, na FIG. 4.9.

Os dados da FIG. 4.9 mostram que a CCA9, mais cristalina, permitiu uma grande redução no diâmetro da partícula, passando de 64,95 μm para 7,9 μm , em somente 15 minutos. A cinza CCA0, neste mesmo intervalo, teve uma redução menor, passando de 39,18 μm para 9,83 μm . Ao final de uma hora de moagem, a CCA0 obteve diâmetro 50% passante de 3,59, enquanto a CCA9, 4,0 μm .

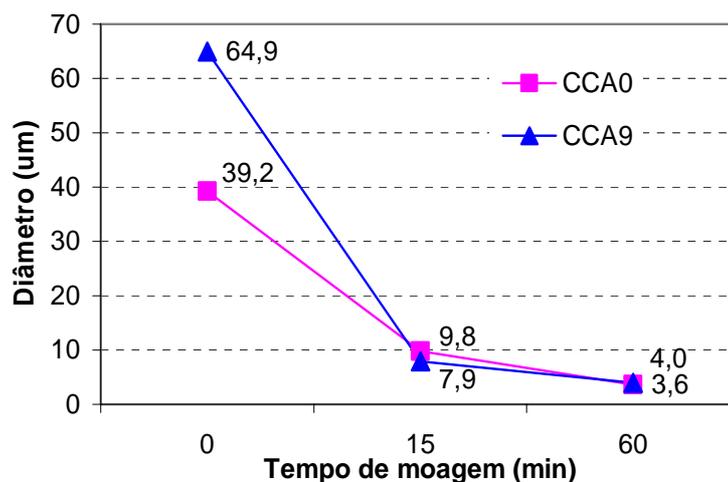


FIGURA 4.9 Resultados de moagem no moinho agitador, a seco, para as cinzas CCA0 e CCA9

Os valores obtidos se diferenciam entre si significativamente, tanto em termos de tipo de cinza, como em relação ao tempo de moagem. Os dados da análise estatística se encontram no Anexo IV.

Este equipamento se mostrou bastante eficiente, pois gerou grande redução no diâmetro das partículas, em curtos intervalos de tempo, com 15 min e 1 hora.

4.2.5 Micronização

Na micronização, foram empregadas a cinza residual CCA8 e a cinza de referência, CCA0, como representantes das cinzas mais e menos cristalinas. O processo foi realizado sempre com a vazão de 10 kg/h, por um período de uma hora. Para atingir os resultados registrados, a cinza CCA0 foi micronizada uma vez, enquanto que a cinza CCA8 exigiu ser processada por duas vezes.

As distribuições granulométricas das cinzas CCA0 e CCA8, após a micronização, são apresentadas na TAB. 4.3. As curvas destas distribuições estão apresentadas no Anexo III.

TABELA 4.3 Distribuição granulométrica das cinzas micronizadas

Amostras	Diâmetro (μm)		
	10%	50%	100%
CCA0	1,37	5,49	20,0
CCA8	1,64	5,77	20,0

Para obter resultados semelhantes, ou seja, diâmetro (50% passante) próximo a 5,5 μm , a cinza mais cristalina, CCA8, teve que ser processada por duas vezes, por períodos de 1 hora, enquanto a cinza mais amorfa, CCA0, somente uma vez. Segundo Silveira (1995), normalmente, as cinzas mais cristalinas, por serem queimadas em temperaturas mais elevadas, apresentam uma estrutura mais fechada, menos rendada, o que dificulta a moagem.

4.2.6 Análise geral dos dados e conclusões quanto aos tratamentos físicos

A fim de fazer uma avaliação dos melhores resultados e identificar os respectivos equipamento e método, foi elaborado o gráfico da FIG. 4.10, que apresenta os menores diâmetros (passante 50%) obtidos nos diferentes processos de moagem testados.

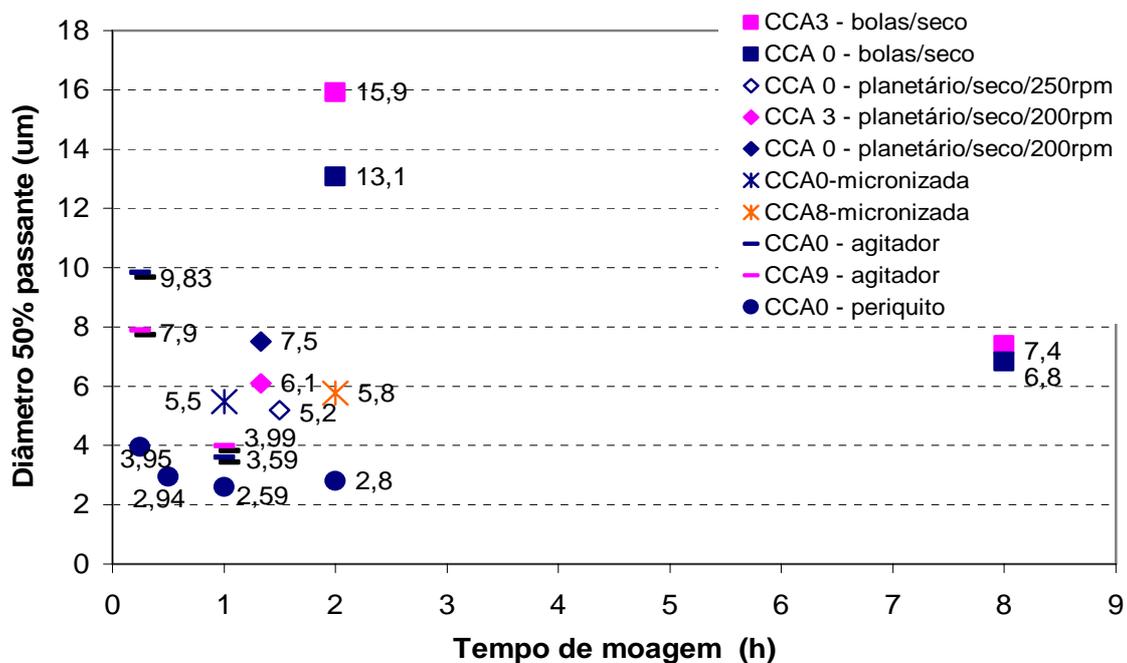


FIGURA 4.10 Melhores resultados, em termos de diâmetro 50% passante, obtidos em diferentes processos de moagem

A observação do gráfico da FIG. 4.10 indica algumas tendências, tais como:

- entre os cinco diferentes processos de moagem testados, quatro deles (micronização e os moinhos periquito, agitador e planetário) possibilitam a obtenção de diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm em tempo igual ou inferior a duas horas;
- o moinho de bolas teve um comportamento diferenciado dos demais. De maneira geral, exigiu 4 vezes mais tempo de moagem para obter diâmetros entre 5 e 8 μm , que o moinho planetário ou o micronizador. Para o tempo de moagem de 2 horas, os diâmetros obtidos variaram entre 11 e 16 μm ;
- o menor diâmetro 50% passante (2,59 μm) foi obtido com a cinza CCA 0, em moinho periquito, com tempo de 1 hora;
- o moinho periquito foi o que gerou os menores diâmetros em menores tempos. O moinho agitador também apresentou bons resultados.

Cabe ressaltar que os resultados indicam uma tendência de comportamento, uma vez que, eles não são estatisticamente comparáveis, devido à diferença de equipamentos, das cinzas empregadas e dos corpos moedores usados.

Quanto à moagem a úmido, esta se apresenta vantajosa, pois evita que a cinza fique aderida às paredes do moinho, além de evitar poeira. No entanto, como desvantagens, apresenta a dificuldade de se trabalhar com o material, além da exigência de um processo de secagem. Os resultados obtidos não foram considerados no gráfico da FIG. 4.10 por não serem conclusivos, devido à dificuldade em encontrar a quantidade ideal de água para executar o processo de moagem. Embora tenham sido feitas várias tentativas, não foi possível obter dados semelhantes aos da bibliografia (DELLA, 2001; SOUZA, 2000), que obtiveram diâmetros em torno de 1 μm .

Quanto à mineralogia das cinzas, no processo de micronização, para obter a mesma granulometria, a cinza mais cristalina exigiu o dobro de tempo de processamento que a cinza predominantemente amorfa. No entanto, quando usado outro processo, como o moinho agitador, num mesmo tempo de moagem (15 minutos), a cinza mais cristalina obteve uma grande redução de diâmetro, passando de 64,95 μm para 7,9 μm (diferença de 57,05 μm), enquanto a cinza predominantemente amorfa passou de 39,18 para 9,83 μm

(diferença de 29,35 μm). Assim, o comportamento da CCA, em termos de redução do tamanho das partículas, é fortemente influenciado pelas características do processo, além de sua mineralogia, como mostraram estes exemplos.

Os resultados obtidos mostraram que os equipamentos testados podem ser divididos em dois grupos, conforme o seu desempenho na moagem da CCA: um grupo representado pelo moinho de bolas e o outro grupo, pelos demais. As diferenças obtidas, em termos de diâmetro, foram constatadas e, posteriormente, foram avaliadas quanto à pozolanicidade. Esta avaliação foi feita em dois experimentos preliminares descritos a seguir, os quais tiveram a finalidade de fornecer dados quanto à pozolanicidade das CCA moídas, que serviram como mais um critério para a seleção dos processos que foram usados no beneficiamento das CCA para a produção dos cimentos (Cap. 5).

O Experimento preliminar I compara o processo de micronização com o moinho periquito, enquanto o experimento preliminar II avalia os moinhos de bolas, periquito e agitador.

4.2.7 Avaliação comparativa entre o processo de micronização e moagem no moinho periquito, quanto ao Índice de Atividade Pozolânica-IAP - EXPERIMENTO PRELIMINAR I

4.2.7.1 Objetivo

Este experimento tem o objetivo de avaliar dois diferentes processos de moagem - micronização e moinho periquito - através da determinação do índice de atividade pozolânica, IAP - de duas cinzas de casca de arroz com diferentes características mineralógicas. Também tem a perspectiva de realizar uma seleção inicial entre os diferentes equipamentos testados.

4.2.7.2 Materiais e Métodos

Considerando o objetivo do experimento e visando minimizar as variáveis, optou-se por selecionar as cinzas CCA0 e CCA8, respectivamente amorfa e cristalina, especificadas no item 3.3.3.4. Além disto, optou-se por adotar granulometrias semelhantes aos resultados obtidos com estas cinzas no processo de micronização relatado anteriormente, ou seja, diâmetro 50% passante entre 5 e 6 μm . Como decorrência, o tempo

de moagem de cada cinza, no moinho periquito, foi aquele necessário para obter diâmetro dentro de tal faixa. As características dos processos e dos equipamentos empregados foram descritos no item 3.4.5.

a) Projeto estatístico:

O projeto estatístico adotado foi uma análise fatorial, cujos fatores considerados foram o tipo de cinza e o tipo de equipamento e a variável de resposta foi a resistência à compressão de corpos-de-prova confeccionados com argamassa com substituição de 30% do volume de cimento por CCA. A TAB. 4.4 apresenta o projeto estatístico adotado.

TABELA 4.4 Projeto Estatístico: Índice de Atividade Pozolânica (NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 alterada”): análise fatorial com repetição

Fator			Níveis
A	Tipo de cinza	Fixo	2 níveis (i = cinzas CCA0 ; CCA8)
B	Equipamento de moagem	Fixo	2 níveis (j = micronizador; moinho periquito)
Nº de repetições: 3			Referência – CP’S sem adição de cinza
Total: 27 corpos de prova			

b) Ensaios empregados:

Para determinar o índice de atividade pozolânica com o cimento, foram empregados os métodos descritos na NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 Alterada”, cuja descrição e justificativa constam no item 3.2.4.

Além disto, foi determinada a massa específica, de acordo com a NBR NM 23/2001 e realizada microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (item 3.2.1.5).

c) Materiais empregados:

Além das cinzas, os materiais básicos empregados, cimento CP V – ARI, areia normal, água potável e superplastificante, são aqueles especificados no item 3.3.3.

4.2.7.3 Resultados obtidos

Na TAB. 4.5 são apresentados os resultados dos dois processos de moagem, em termos de granulometria e tempo de processamento. Conforme estabelecido, os diâmetros (50% passante) ficaram entre 5 e 6 μm e os tempos de moagem foram aqueles necessários para obtê-los.

Em seguida, na TAB. 4.6, são apresentados os dados da relação água/aglomerante determinados para o índice de consistência (225 ± 5) mm de acordo com o estabelecido na NBR 7215/96, e na TAB. 4.7, os valores da resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa rompidos aos 28 dias de idade e os respectivos índices de pozolanicidade. As FIG. 4.11 e 4.12 mostram fotos de microscopia eletrônica de varredura.

TABELA 4.5 Diâmetros 50% passante das cinzas CCA0 e CCA8 e respectivos tempos de moagem

Cinza	Processo de moagem	Diâmetro 50 % passante (μm)	Tempo de moagem (min)
CCA0	micronizador	5,49	60
	periquito	5,24	15,5
CCA8	micronizador	5,77	120
	periquito	5,09	12,5

TABELA 4.6 Relação água/aglomerante das argamassas para consistência (225 ± 5) mm

Argamassa		NBR 5752/92		“NBR 5752/92 Alterada”		
		Consistência (mm)	Relação água/agl. (% em massa)	Consistência (mm)	% de aditivo	Relação água/agl. (% em massa)
Referência		229	0,553	229	-	0,533
CCA0	micronizador periquito	222	0,648	225	0,25	0,533
		220	0,650	230	0,30	
CCA8	micronizador periquito	225	0,570	230	0,10	
		225	0,581	223	0,10	

TABELA 4.7 Resistência à compressão aos 28 dias e IAP

Tipo de cinza	Equipamento de moagem	Resistência à compressão (MPa) NBR 7215	IAP médio (%) NBR 5752	Resistência à compressão (MPa) “NBR 5752 Alterada”	IAP médio (%) “NBR 5752 Alterada”	
CCA0	micronizador	34,96	93,3	35,87	115,0	
		36,69		P		48,36
36,46		P		48,97		
CCA0	moinho periquito	37,91	102,7	46,57	113,4	
		38,01		P		35,06
		43,08		P		49,68
CCA8	micronizador	16,84	55,9	20,69	59,0	
		25,50		NP		23,69
22,45		NP		24,00		
CCA8	moinho periquito	20,10	61,2	21,10	63,4	
		24,38		NP		25,38
		26,45		NP		26,95
Referência		37,76	100	-	-	
		36,82				
		41,43				

P – pozolânico; NP – não pozolânico

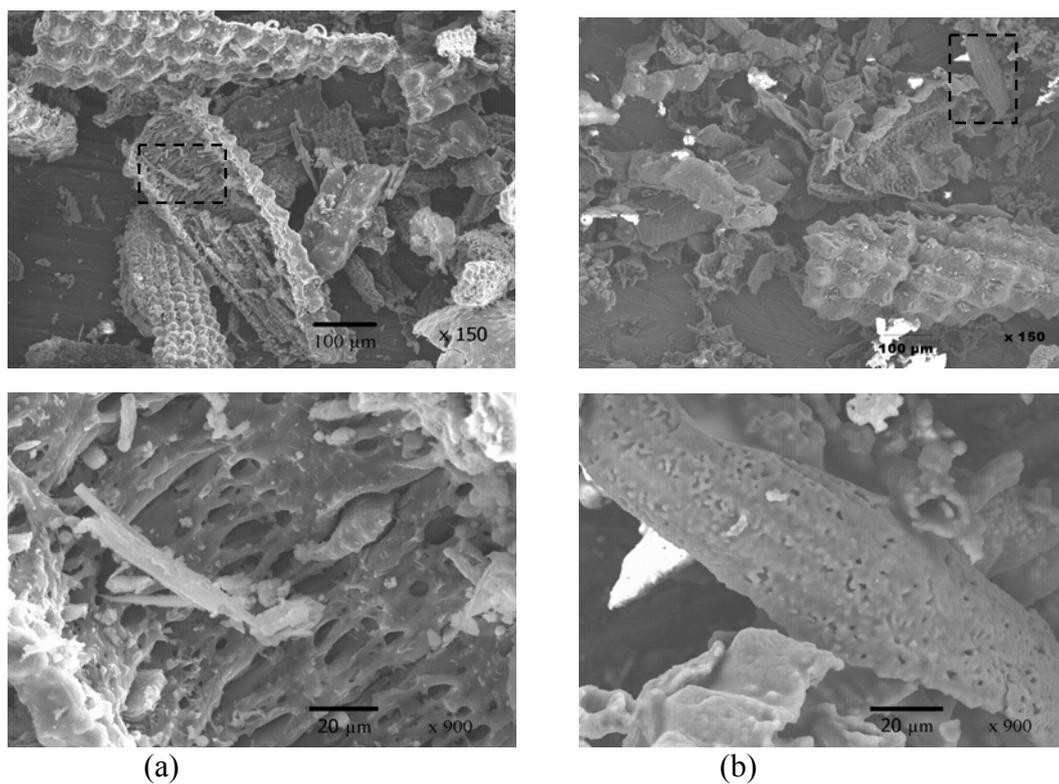


FIGURA 4.11 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das cinzas em estado natural, com magnificação de 900 vezes – (a) CCA0; (b) CCA8

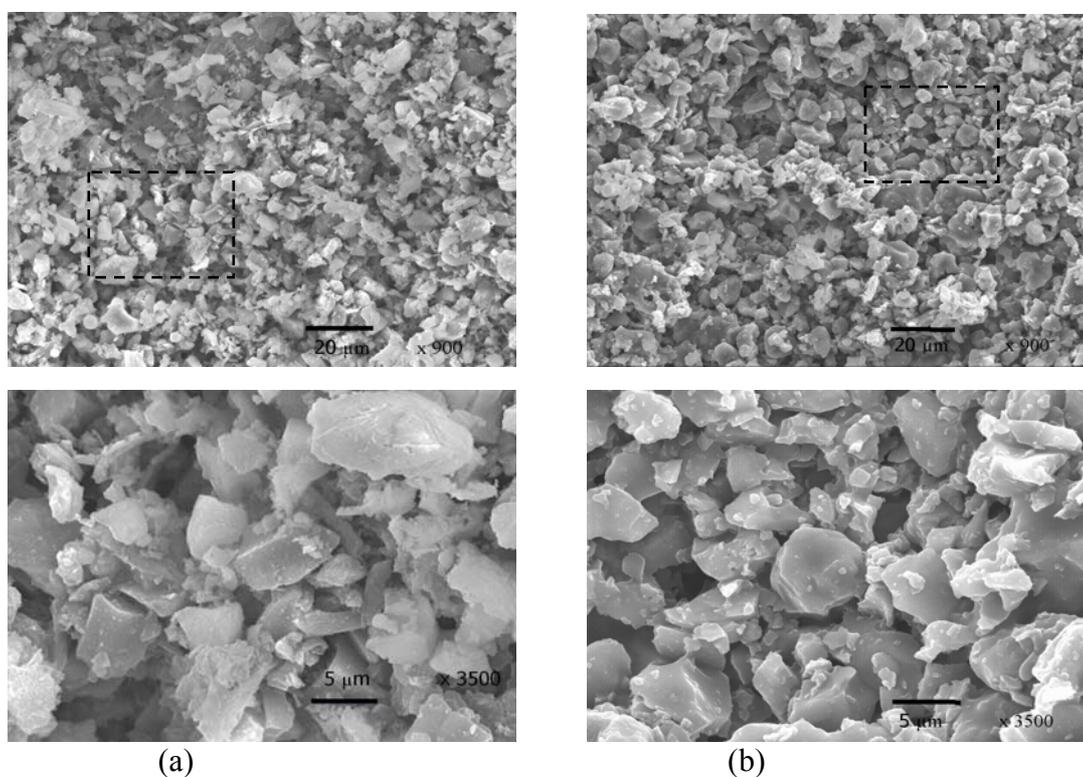


FIGURA 4.12 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das cinzas micronizadas com magnificação de 900 e 3500 vezes – (a) CCA0; (b) CCA8

4.2.7.4 Análise e discussão dos resultados

A análise estatística dos dados de resistência à compressão, tanto com aditivo, quanto sem aditivo, cuja tabela se encontra no Anexo IV, mostrou que:

- o fator cinza é significativo, ou seja, existe diferença entre o desempenho das cinzas CCA0 e CCA8;
- a comparação múltipla de médias, através do Teste de Duncan, confirma a diferença significativa entre os tipos de cinzas testados;
- o fator equipamento de moagem e a interação entre os fatores se mostraram não significativos, indicando que o diâmetro 50% passante pode ser considerado um bom parâmetro para a moagem das CCA quanto ao seu desempenho no IAP.

O resultado estatístico mostrou que o tipo de equipamento de moagem não é significativo. Cabe ressaltar que este resultado deve ser analisado no contexto do trabalho, onde significa que os equipamentos de moagem não diferem entre si somente quando os diâmetros das partículas obtidos por eles são iguais. O que não pode ser entendido como se o micronizador e o moinho periquito tivessem genericamente o mesmo comportamento, o que não é verdade, pois para obter granulometrias semelhantes, os tempos de moagem exigidos foram muito diferentes. O moinho periquito exigiu menor tempo de processamento do que o processo de micronização, conforme pode ser observado na TAB. 4.5.

Quanto às cinzas, no micronizador, a CCA8 exigiu o dobro do tempo de processamento da CCA0 para obter composição granulométrica semelhante, já para o moinho periquito, exigiu tempo inferior, conforme dados da TAB. 4.5. Isto posto, não é possível afirmar que a CCA8, por ser mais cristalina, é menos friável que a CCA0.

A FIG. 4.13 apresenta os resultados obtidos para as cinzas CCA0 e CCA8 em função do tipo de moagem empregado, enquanto a FIG. 4.14 mostra comparativamente os IAP.

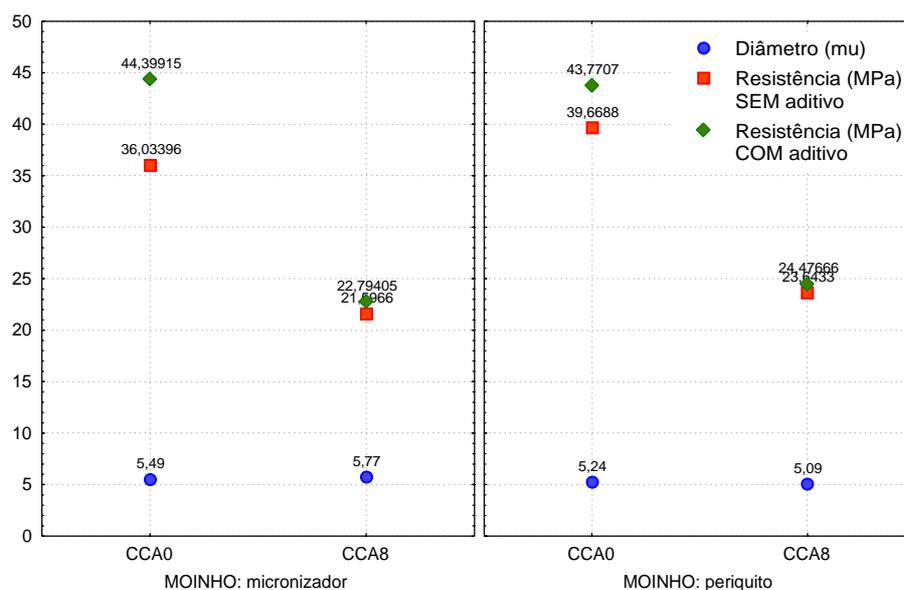


FIGURA 4.13 Diâmetros e resistência à compressão das cinzas CCA0 e CCA8 de acordo com o tipo de moinho

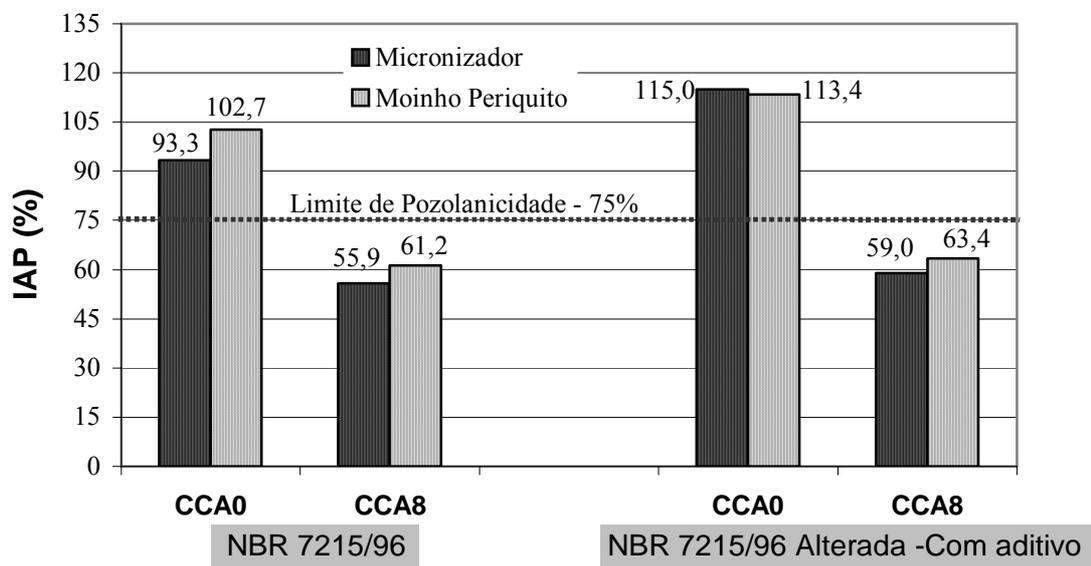


FIGURA 4.14 Índice de atividade pozolânica das cinzas CCA0 e CCA8, micronizadas e moídas no moinho periquito

Os IAP mostrados na FIG. 4.14, além de confirmarem a diferença de desempenho entre as duas cinzas, indicam que a CCA8 não atinge o limite mínimo de 75% determinado na NBR 12653 para ser considerada uma pozolana. Já a cinza CCA0, além de superar este limite mínimo, quando moída no moinho periquito, supera o valor de referência, atingindo 102,7%. Este desempenho supera o de outras pozolanas, como por exemplo, a sílica ativa e o metacaulin, cujos valores do IAP relatados na bibliografia atingem respectivamente 81,7% (DAFICO e PRUDÊNCIO JR, 2002) e 94,15% (SOUZA, 2003).

Os valores obtidos de IAP com o cimento, para as cinzas cristalina e amorfa, estão de acordo com aqueles citados na bibliografia: Santos e Prudêncio Jr. (1998) encontraram 99% para uma cinza residual moída por duas horas e 116% para esta mesma cinza, quando moída por 6 horas.

Como esperado, os valores de IAP obtidos pelo método “NBR 5752 Alterada” são superiores, pois a quantidade de água empregada é menor do que aquela usada nos corpos-de-prova moldados de acordo com a NBR 5752 (TAB. 4.6), além do efeito dispersante do superplastificante. A cinza CCA0 foi a que obteve maiores ganhos com esta alteração, chegando ao maior IAP (115%), quando micronizada, o que se explica por ter exigido maior relação água/aglomerante do que a cinza CCA8 para atingir o mesmo índice de consistência.

Assim como exigiu mais água para obter o mesmo índice de consistência, a CCA0 exigiu mais aditivo superplastificante quando foi adotado o método “NBR 5752 Alterada”. Isto, provavelmente, devido ao maior teor de carbono presente nesta cinza, o que pode ser deduzido pelo percentual de perda ao fogo de 8,2%, enquanto para a CCA8 o valor é de 0,8%, conforme dados da TAB. 3.7. Além disto, sua amorficidade, estrutura “rendilhada” em estado natural, conforme pode ser observado na FIG. 4.11 (a), e partículas de forma não tão arredondadas quando moída ou micronizada quanto a CCA8 (FIG. 4.12 - a e b) também contribuem. A área superficial mais elevada é outro fator importante que justifica a maior demanda de superplastificante pela CCA0. Por sua vez, a CCA8 é predominantemente cristalina e tem estrutura mais uniforme e menor área superficial (FIG. 4.11-b).

4.2.7.5 Conclusões do Experimento Preliminar I

A partir dos resultados deste experimento preliminar, pode-se concluir que:

- quanto às cinzas, o comportamento significativamente diferente apresentado entre elas confirmam que suas características mineralógicas influem no desempenho em relação à resistência à compressão;
- a cinza CCA0, amorfa, apresentou índices de pozolanicidade superiores ao limite mínimo e ao valor de referência, indicando que o material pode ser considerado uma pozolana, independente dos processos de moagem estudados;
- a cinza CCA8, cristalina, independente dos processos de moagem usados, apresentou índices de pozolanicidade inferiores ao limite mínimo, indicando que o material não é considerado como pozolana de acordo com os critérios da NBR 12653;
- quanto ao objetivo deste experimento, ou seja, comparar o desempenho do processo de micronização com o do moinho periquito, através do ensaio de pozolanicidade das cinzas com o cimento, os dados obtidos indicam que não há diferença entre eles, quando as composições granulométricas forem semelhantes.

Assim, a micronização, devido ao custo incompatível com a verba disponível para a realização da parte experimental desta tese, foi desconsiderada como um dos processos de redução de partículas adotados nas etapas que se seguiram.

4.2.8 Avaliação comparativa entre o processo de moagem nos moinhos de bolas, periquito e agitador, quanto ao Índice de Atividade Pozolânica - IAP - EXPERIMENTO PRELIMINAR II

4.2.8.1 Objetivo

Este experimento tem como objetivo avaliar o comportamento dos moinhos de bolas, periquito e agitador, tendo como critério o IAP com o cimento, além das composições granulométricas obtidas.

Tal como o Experimento Preliminar I, esta avaliação teve a perspectiva de obter parâmetros para a seleção dos moinhos que serão empregados nas etapas seguintes do trabalho. Portanto, as cinzas empregadas foram as mesmas selecionadas para a realização destas etapas e, para uma avaliação mais ampla, foram considerados três tempos de moagem para cada moinho.

4.2.8.2 Materiais e Métodos

a) Moinhos Empregados:

A principal conclusão do estudo sobre os equipamentos testados no tratamento físico das CCA é que eles podem ser divididos em dois grupos, conforme o seu desempenho: um grupo representado pelo moinho de bolas e o outro grupo, pelos demais (item 4.2.6). O moinho de bolas apresentou um comportamento isolado. Por isto, e por ser um equipamento largamente usado, foi selecionado para este experimento preliminar.

Os moinhos (periquito, agitador, planetário e micronizador) que constituem o segundo grupo apresentaram comportamento semelhante, ou seja, produziram diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm , em até duas horas de processamento. Entre eles, a micronização ficou descartada em função dos resultados do experimento preliminar I e os moinhos agitador e periquito foram escolhidos por produzirem os menores diâmetros.

A caracterização dos equipamentos e dos processos empregados consta no item 3.4.5.

b) Ensaio empregados:

Para determinar o índice de atividade pozolânica com o cimento, foram empregados os métodos descritos na NBR 5752/92 e “NBR 5752/92 Alterada”, cuja descrição e justificativa constam no item 3.3.2.

Além disto, foi determinada a massa específica de acordo com a NBR NM 23/2001 e realizada microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (item 3.2.2.).

c) Materiais empregados:

Os materiais básicos empregados, cimento CP V – ARI, areia normal, água potável e superplastificante, são aqueles especificados no item 3.2. Neste experimento, foram empregadas as mesmas cinzas - CCA0, CCA7 e CCA9 – utilizadas nas etapas de beneficiamento de CCA e produção de cimento, já que serviu de base para definir as moagens aplicadas no beneficiamentos. Estas cinzas estão especificadas também no item 3.2.

d) Projeto Estatístico:

O projeto estatístico adotado foi uma análise fatorial, cujos fatores considerados foram o tipo de equipamento, tempo de moagem e tipo de cinza. As variáveis de resposta são duas: resistência à compressão de acordo com a NBR 5752/96 e resistência à compressão obtida pela “NBR 5752 Alterada”. A TAB. 4.8 apresenta o projeto estatístico adotado.

TABELA 4.8 Projeto estatístico: Resistência à compressão (NBR 5752/96 e “NBR 5752/96 alterada”): análise fatorial com repetição

Fator			Níveis
A	Tipo de cinza	Fixo	3 níveis (i = cinzas CCA0; CCA7; CCA9)
B	Equipamento de moagem	Fixo	3 níveis (j = moinho bolas; moinho periquito; moinho agitador)
C	Tempo de moagem	Fixo	3 níveis (a; b; c) variáveis conforme cada moinho
Nº de repetições: 3			Referência – CP’S sem adição de cinza
Total:165 corpos de prova			

Os tempos adotados para cada moinho foram definidos em função dos resultados obtidos do capítulo anterior, sendo os seguintes:

- Moinho de bolas: 60, 120 e 180 minutos;
- Moinho periquito: 15, 30 e 60 minutos;
- Moinho agitador: 15, 30 e 60 minutos.

4.2.8.3 Resultados obtidos

Na TAB. 4.9 são apresentados os resultados da moagem, em termos de tempo de processamento e os respectivos diâmetros (50% passante) obtidos, além da massa específica.

TABELA 4.9 Resultados da moagem das cinzas CCA0, CCA7 e CCA9, nos moinhos de bolas, periquito e agitador

Cinza	Moinho	Tempo de moagem (min)	Características físicas		
			Diâmetro - (μm) (50% passante)	Massa específica - ρ - (g/cm^3)	
CCA 0	natural	0	39,18	1,88	
	Bolas	60	14,09	1,951	
		120	9,82	1,994	
		180	16,53	1,978	
		Periquito	15	3,95	1,952
	30		2,94	2,020	
	60		2,59	2,048	
	Agitador	15	9,83	2,001	
		30	5,07	2,105	
		60	3,59	2,060	
	CCA 7	natural	0	68,34	1,764
		Bolas	60	18,45	1,868
120			9,82	1,949	
180			14,2	1,949	
Periquito			15	6,34	2,022
		30	5,49	2,024	
		60	3,05	2,026	
Agitador		15	9,99	2,062	
		30	5,49	2,115	
		60	4,02	2,077	
CCA 9		natural	0	64,95	1,875
		Bolas	60	22,93	2,028
	120		10,44	2,074	
	180		15,64	2,022	
	Periquito		15	5,76	2,123
		30	4,54	2,076	
		60	3,69	2,101	
	Agitador	15	7,90	2,108	
		30	5,48	2,068	
		60	3,99	2,149	

A TAB. 4.10 apresenta os resultados dos ensaios de IAP realizados tanto pelo método da NBR 5752, quanto pela “NBR 5752 Alterada”, onde estão assinalados os valores de IAP inferiores ao limite mínimo de pozolanicidade, que é de 75% segundo a NBR 12653.

TABELA 4.10 Resultados dos ensaios de determinação do Índice de Atividade Pozolânica – IAP, segundo a NBR 5752/92 e “NBR5752/92 Alterada”

Cinza	Moinho	Tempo de moagem (min)	NBR 5752/92				“NBR5752/92 Alterada” Relação água/agl. = 0,553 %			
			Consistência (mm)	Relação água/agl. (%)	f _c (MPa)	IAP (%)	Consistência (mm)	% de aditivo	f _c (MPa)	IAP (%)
C C A 0	Bolas	60	227	0,67	28,2	72,9	225	0,55	40,0	103,5
		120	230	0,66	29,9	77,3	230	0,51	42,7	110,3
		180	225	0,65	31,8	82,3	230	0,55	42,0	108,7
	Periquito	15	225	0,65	26,8	69,3	225	0,40	50,7	131,2
		30	227	0,66	36,3	93,9	225	0,43	46,7	120,7
		60	230	0,66	37,3	96,4	225	0,46	53,1	137,3
	Agitador	15	226	0,63	29,2	75,6	225	0,40	40,9	105,9
		30	225	0,63	29,6	76,4	230	0,39	42,3	109,4
		60	225	0,63	34,2	88,5	225	0,40	36,1	93,3
C C A 7	Bolas	60	221	0,68	22,9	59,1	225	0,74	38,2	98,8
		120	230	0,68	34,0	87,9	230	0,58	41,2	106,4
		180	230	0,65	25,3	65,5	225	0,33	36,1	93,3
	Periquito	15	230	0,65	29,0	74,9	230	0,36	40,1	103,8
		30	230	0,65	33,8	87,4	225	0,36	46,0	119,0
		60	225	0,65	35,6	92,1	225	0,51	46,2	119,4
	Agitador	15	225	0,64	28,5	73,7	225	0,36	36,7	94,8
		30	225	0,63	33,0	85,3	225	0,36	44,6	115,3
		60	230	0,66	30,2	78,1	225	0,50	39,5	102,2
C C A 9	Bolas	60	230	0,65	22,2	57,4	225	0,40	31,1	81,2
		120	230	0,65	27,5	71,6	228	0,32	32,3	83,5
		180	230	0,64	23,6	61,0	230	0,25	32,7	84,6
	Periquito	15	220	0,62	34,0	87,9	225	0,21	37,8	97,7
		30	220	0,62	29,4	76,1	220	0,21	42,9	109,6
		60	222	0,64	31,1	80,4	225	0,36	41,4	107,0
	Agitador	15	225	0,63	28,0	72,3	225	0,25	35,1	90,7
		30	220	0,63	31,7	81,9	220	0,22	37,9	97,9
		60	220	0,63	29,7	76,8	220	0,21	28,1	72,9
Referência			225	0,553	38,7	100	-	-	-	-

Em relação aos resultados da moagem, os dados da TAB. 4.9 mostram que o diâmetro diminuiu com o aumento do tempo de moagem, com exceção do moinho de bolas com 180 minutos de moagem. Neste caso, os diâmetros são superiores àqueles obtidos com 120 minutos, indicando que durante o processo de moagem mais prolongado ocorreu uma aglomeração das partículas.

Quando empregado o ensaio pela NBR 5752, algumas amostras não atingiram o limite mínimo, conforme pode ser observado na TAB. 4.10, já os IAP determinados pela “NBR 5752Alterada”, todos superam tal limite.

4.2.8.4 Análise e discussão dos resultados

a) Análise estatística geral:

Estatisticamente, os três fatores (cinza, moinho e tempo de moagem) são significativos, e também o são, as interações entre a cinza e o tempo de moagem e entre os três fatores. As interações entre o tipo de moinho e o tipo de cinza, assim como a interação entre o tipo de moinho e o tempo de moagem não são significativos. A Tabela ANOVA encontra-se no Anexo IV.

b) Influência isolada do tipo de moinho no IAP:

O comportamento isolado do fator tipo de moinho nos IAP é mostrado na FIG. 4.15, onde estão plotadas as médias dos IAP segundo os ensaios da NBR 5752 e da “NBR 5752Alterada”.

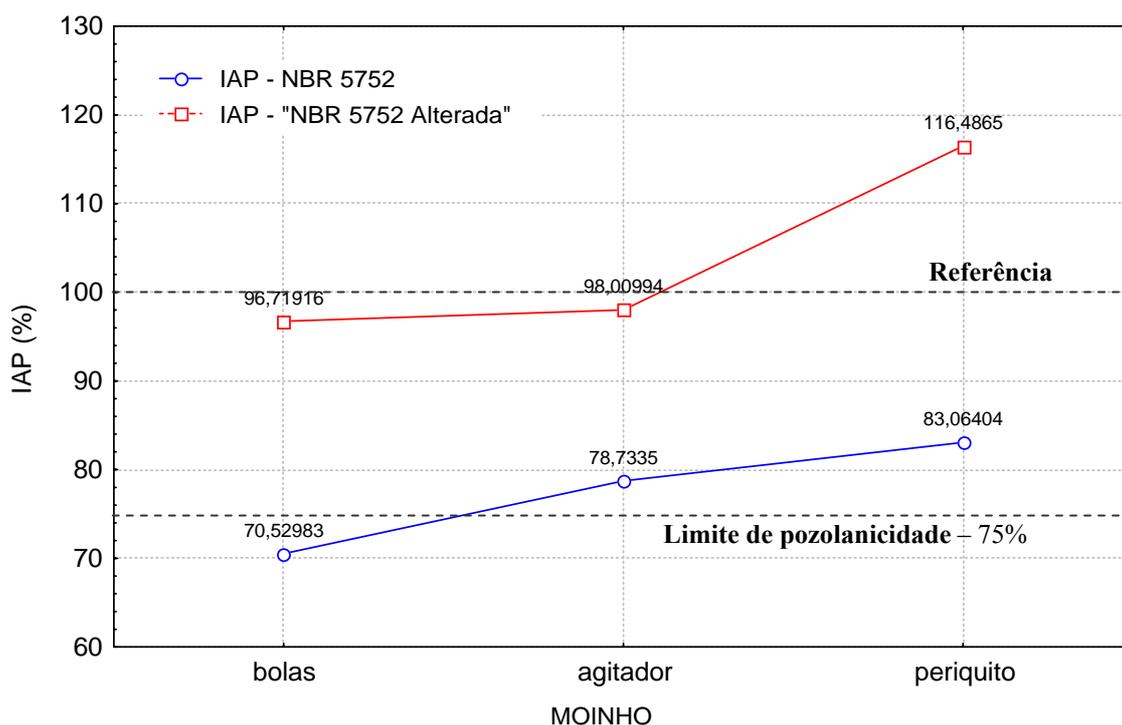


FIGURA 4.15 Influência média do tipo de moinho no IAP determinado pelos ensaios de NBR 7215 e “NBR 7215 Alterada”

Os dados das TAB 4.9 e 4.10 e do gráfico da FIG. 4.15 mostram que o moinho periquito teve o melhor desempenho ao produzir menores diâmetros e maiores IAP. Já o moinho de bolas foi o que apresentou os piores resultados, inclusive só atingindo o limite mínimo de pozolanicidade quando empregado o método “NBR 5752 Alterada”. O moinho agitador teve comportamento intermediário entre os moinhos de bolas e periquito, registrando IAP médio acima de 75%, para os dois ensaios empregados.

O comportamento do IAP determinado pela “NBR 5752 Alterada” foi semelhante ao da NBR 5752, porém com valores mais elevados, em relação a qualquer tipo de moinho considerado.

Numa comparação múltipla de médias, considerando a resistência à compressão como variável de resposta, através do teste de Duncan (nível de significância de 0,95), ficou constatado que o moinho de bolas difere significativamente dos moinhos agitador e do periquito, mas que estes não diferem entre si.

c) Influência isolada do tipo de cinza no IAP:

O comportamento isolado do fator tipo de cinza é mostrado no gráfico da FIG. 4.16, onde estão apresentados os valores médios de IAP determinados pelos dois métodos empregados.

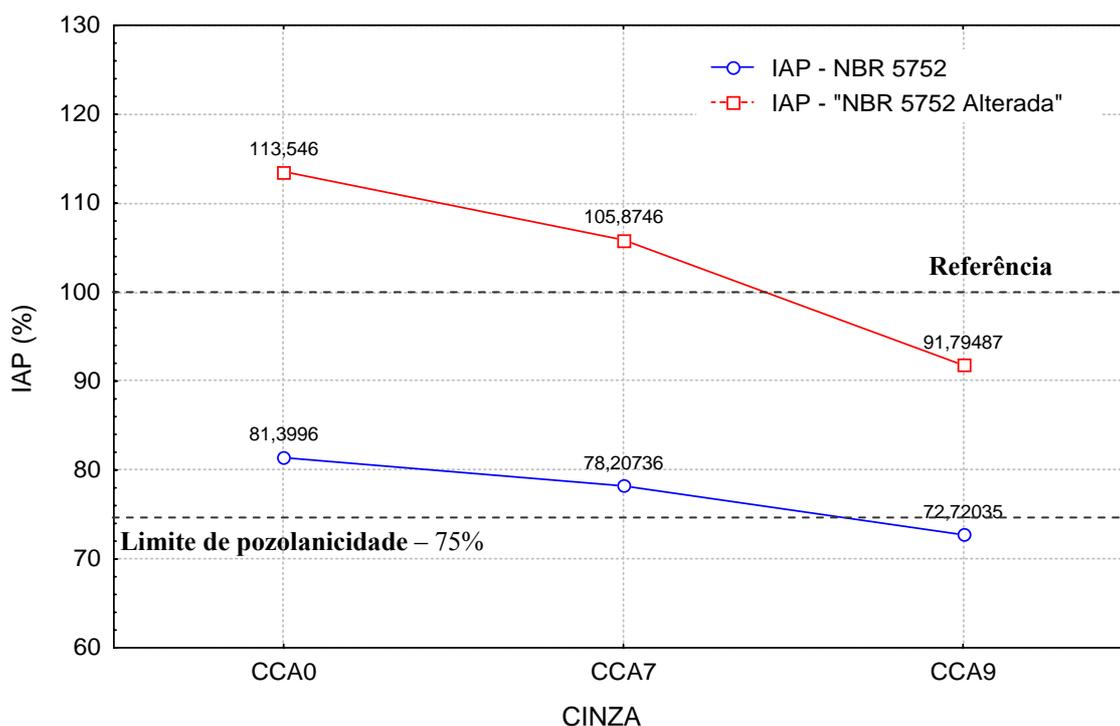


FIGURA 4.16 Influência média do tipo de cinza no IAP determinado pelos ensaios de NBR 7215 e “NBR 7215 Alterada”

O tipo de cinza influi de maneira significativa na resistência à compressão e, portanto, no IAP, conforme mostram o gráfico da FIG. 4.16 e os dados da TAB. 4.10. Observa-se que a pozolanicidade varia com a amorficidade das CCAs: na média, a CCA9, a mais cristalina, sequer atinge o limite mínimo para o IAP, já a cinza residual menos cristalina, CCA7, obteve valor igual 75%, enquanto a cinza de referência chegou a 81,4%.

Quando considerado o método “NBR 5752Alterada”, os índices de pozolanicidade sobem, superando os 100% para as cinzas CCA0 e CCA7 e chegando a 91,8% para a CCA9, mudando sua relação com o limite mínimo.

Quanto às cinzas, através de uma comparação múltipla de médias, considerando a resistência à compressão como variável de resposta, através do teste de Duncan (nível de significância de 0,95), as cinzas CCA0 e CCA7 não diferem significativamente entre si, porém ambas diferem da CCA9.

d) Influência isolada do tempo de moagem:

O tempo de moagem influi na granulometria resultante das amostras, conforme pode ser constatado na TAB. 4.9 e isto se reflete na resistência à compressão e, portanto, no IAP. Como os tempos de moagem adotados variaram em função do tipo de moinho, os resultados serão apresentados graficamente por moinho.

4.2.8.5 Discussão dos resultados

Os resultados de resistência à compressão e os respectivos valores de IAP estão de acordo com os dados apresentados na bibliografia, tal como ocorreu no experimento preliminar I. O IAP variou de 57,4% para a CCA9 com diâmetro de 22,93 μm , resultante de moagem em moinho de bolas, por uma hora, até 96,4% obtido pela CCA0 com diâmetro de 2,59 μm , após ser moída no moinho periquito, por 60 minutos. Rêgo (2004), estudando dez diferentes cinzas residuais, encontrou uma amplitude menor de variação para o valor de IAP, de 71,5 e 85,6%, no entanto, ele trabalhou o intervalo de variação dos diâmetros também menor, de 9,43 a 17,39 μm .

Para melhor discutir os dados visando o objetivo final do experimento, que é selecionar os moinhos e respectivos tempos de moagem, a abordagem passa a ser isolada por tipo de moinho.

a) Moinho de bolas:

O moinho de bolas, embora tenha empregado os maiores tempos de moagem (60, 120 e 180 min), foi o que resultou nos maiores diâmetros para todas as cinzas e nos menores valores de resistência à compressão, tal como pode ser observado na TAB. 4.9 e nos gráficos da FIG. 4.17. Isto indica que é o moinho menos eficiente, entre os estudados.

Analisando estatisticamente os dados, constata-se que os fatores tipo de cinza e tempo de moagem são significativos, bem como a interação entre eles. A tabela ANOVA está apresentada no Anexo IV.

Entre as cinzas, todas têm comportamento diferenciado entre si, comprovado estatisticamente através do teste de Duncan. A CCA0 atingiu IAP superior a 75% quando moída por 120 e 180 minutos e a cinza residual CCA 7, somente quando moída por 120 minutos. A CCA9, independente do tempo de moagem, não atingiu o limite mínimo de pozolanicidade, conforme pode ser observado nos gráficos da FIG. 4.17.

Quando empregado o método da “NBR 5752 Alterada” as três cinzas registraram IAP superior ao limite mínimo, independente do tempo de moagem.

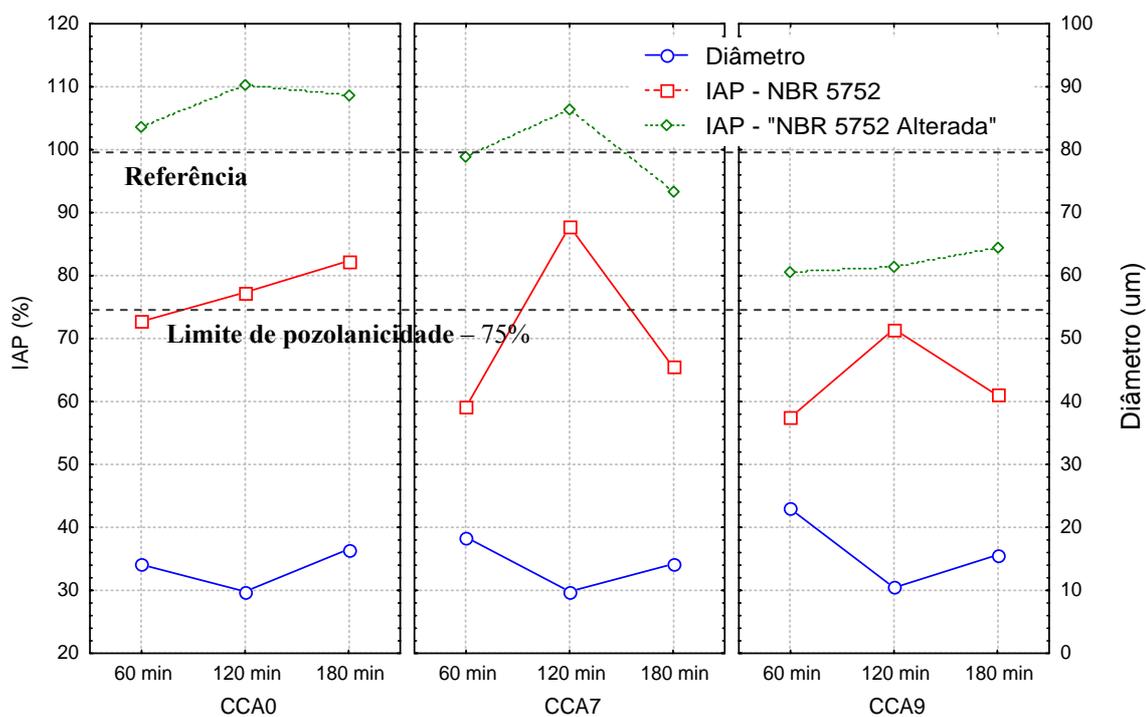


FIGURA 4.17 Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho de bolas

Em relação ao tempo de moagem, eles diferem entre si. Os valores mais elevados de resistência à compressão e, portanto, também do IAP, correspondem ao tempo de 120 minutos, que também é responsável pelos menores diâmetros. Com 60 minutos de moagem nenhuma das cinzas atingiu IAP superior ao limite de 75%.

b) Moinhos agitador e periquito:

Os comportamentos destes moinhos são semelhantes, inclusive não se diferenciando entre si quando comparados estatisticamente. Ambos resultaram em diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm , para todas as cinzas, independente do tempo de moagem empregado. As FIG. 4.18 e 4.19 apresentam, respectivamente, a influência do tipo de cinza e tempo de moagem no IAP, nestes dois moinhos.

Os fatores tipo de cinza e tempo de moagem, assim como a interação entre eles, não são significativos no comportamento da resistência à compressão determinada pela NBR 5752, portanto, também não o são em relação ao IAP. As respectivas tabelas ANOVA encontram-se no Anexo IV.

A atuação destes moinhos uniformizou os resultados tanto em termos de tipo de cinza quanto de tempo de moagem empregado, eliminando as diferenças que ficavam evidentes no moinho de bolas, como a cristalinidade das cinzas e a diferença entre os tempos de moagem.

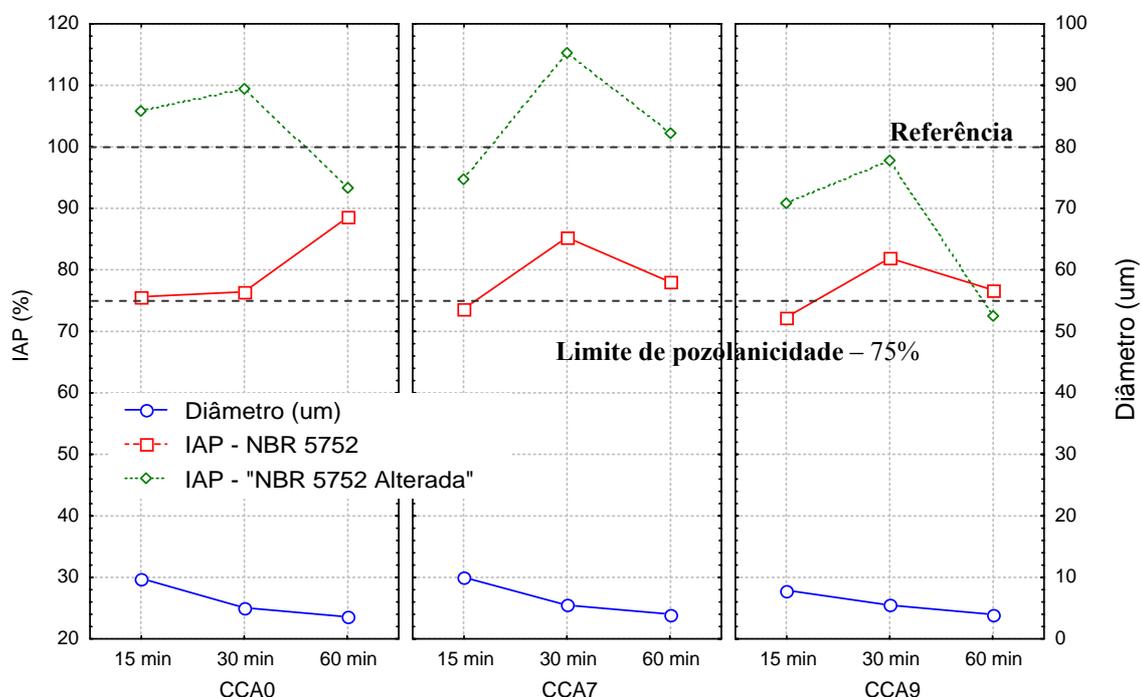


FIGURA 4.18 Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho agitador

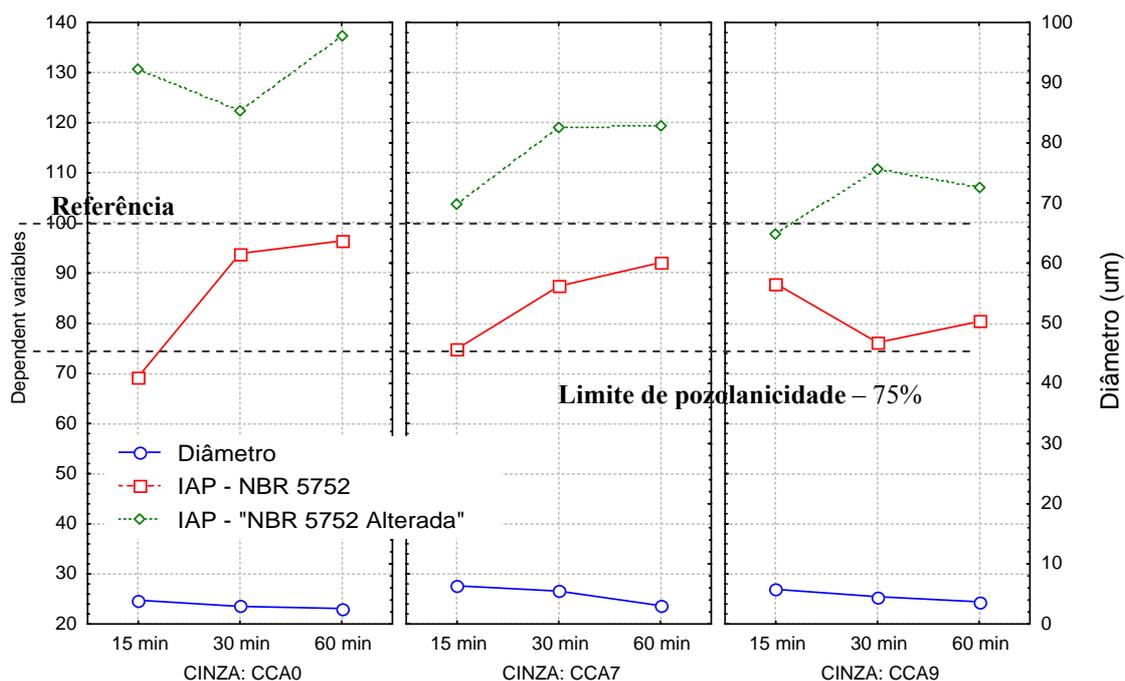


FIGURA 4.19 Influência do tempo de moagem e tipo de cinza no IAP, no moinho periquito

Quando são considerados os resultados pela “NBR 5752 Alterada”, o tipo de cinza passa a ser significativo nos dois moinhos e o tempo de moagem somente é significativo no moinho agitador.

4.2.8.6 Conclusões do experimento preliminar II

Considerando os objetivos deste experimento, cabe ressaltar como principais conclusões que:

- o IAP das cinzas processadas no moinho de bolas tem comportamento diferenciado do IAP das cinzas quando moídas nos moinhos periquito e agitador; o que se justifica pela diferença das granulometrias obtidas, embora os tempos de moagem adotados tenham sido os mesmos. Comportamento semelhante se verifica em termos de resistência à compressão;

- quando empregado o moinho de bolas, o tempo de moagem de 120 minutos corresponde aos valores mais elevados de resistência à compressão e, estatisticamente, se diferencia dos tempos de 60 e 180 minutos. Os tempos de 60 e 180 min não se diferenciam, possivelmente devido aos valores próximos de seus diâmetros (50% passante), pois com o prolongamento do processo de moagem (180 min) ocorreu uma aglomeração das partículas resultando diâmetros superiores àqueles obtidos aos 120 minutos e semelhantes aos obtidos com 60 min;
- os moinhos periquito e agitador não se diferenciam entre si; ambos produziram diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm , para todas as cinzas e tempos de moagem empregados, além disto, estatisticamente, em valores médios, não se diferenciam quanto à resistência à compressão determinada pela NBR 5752 e, portanto, em relação ao IAP.

Assim, os moinhos de bolas e periquito ficam selecionados como equipamentos de moagem a serem empregados nas etapas seguintes do trabalho de beneficiamento das CCAs e de produção de cimentos.

O tamanho de partícula de 10 μm foi tomado como referência nas considerações abaixo, por que vários autores relatam que a dimensão média das partículas de CCA ideal para a sua utilização como adição mineral deve ser menor que 10 μm (MALHOTRA e METHA, 1996 *apud* RÊGO, 2004).

O moinho de bolas foi selecionado por ter apresentado um comportamento diferenciado dos demais e, além disto, por ser um equipamento largamente usado. O tempo de moagem de 120 minutos foi selecionado por ter produzido os menores diâmetros, aproximadamente 10 μm , e os maiores valores de resistência à compressão.

O moinho periquito foi selecionado entre os demais moinhos avaliados, que caracterizam um outro comportamento, ou seja, produção de diâmetros inferiores a 10 μm (até 2,59 μm) em tempo inferior a 120 minutos. Foi selecionado por não ter se diferenciado estatisticamente do moinho agitador, em termos de resistência à compressão. O tempo de moagem escolhido foi de 30 minutos, intermediário entre os avaliados, já que este fator tempo também foi não significativo.

4.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Os tratamentos térmicos propostos tiveram o objetivo de alterar a cor da cinza, tornando-a mais clara, e/ou modificar a sua estrutura, quando cristalina, de tal forma que resultasse material amorfo. Os tratamentos térmicos foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER - UFRGS.

Diferentes amostras foram testadas nos tratamentos térmicos, mas para a seleção sempre foi mantido o critério de testar pelo menos duas CCA: uma do grupo das menos cristalinas e outra do grupo das mais cristalinas. A avaliação foi feita em pelo menos uma das três características: cor e composições química e mineralógica.

4.3.1 Tratamentos térmicos empregados

- TT0 - Tratamento Térmico 0 – Calcinação à temperatura de 400°C, em forno elétrico tipo mufla, por períodos de 6, 9 e 12 horas (JAMES e RAO, 1986 - adaptado). Amostras empregadas: CCA0, CCA1, CCA3 e CCA7.
- TT1 - Tratamento Térmico 1 – Calcinação à 600°C, em forno elétrico tipo mufla, por período de 3 horas (YALÇIN e SEVINÇ, 2001). Amostras empregadas: CCA0, CCA1 e CCA3, além das misturas M1 e M2.
- TT2 - Tratamento Térmico 2 – Calcinação à 1100°C, em forno elétrico tipo mufla, por 1 hora, e posterior resfriamento lento. Amostras empregadas: CCA0 e CCA3 e a mistura M2.
- TT3 - Tratamento Térmico 3 - Calcinação à 1100°C, em forno elétrico tipo mufla, por 1 hora, e posterior choque térmico (as amostras foram resfriadas bruscamente na água à temperatura ambiente). Amostras empregadas: CCA0, CCA1, CCA3 e M1.
- TT4 - Tratamento Térmico 4 - Choque térmico. Foi testada a utilização de uma pistola METCO 5P, por onde as cinzas de casca de arroz foram forçadas a passar por uma chama óxi-acetilênica (temperatura da chama primária de 3100°C), a uma velocidade de aproximadamente 60 m/s, e esfriadas bruscamente em água à temperatura ambiente. Foram testadas as amostras CCA1 e CCA3, porém somente a CCA1 foi aspergida. A impossibilidade de aspersão da cinza mais cristalina (CCA3) se deve, provavelmente, a baixa fluidez da cinza, isto é, a cinza não fluiu em direção à pistola, de forma contínua,

como o processo exige. Como o método não se mostrou exequível, não são apresentados resultados, embora tenha se constatado que não houve alteração de cor da CCA1, após a aspersão.

4.3.2 Resultados quanto à cor

4.3.2.1 Tratamento Térmico 0 - TT0

A FIG. 4.20 apresenta, comparativamente, porções de cinzas CCA0, CCA1, CCA3 e CCA7 com e sem tratamento.

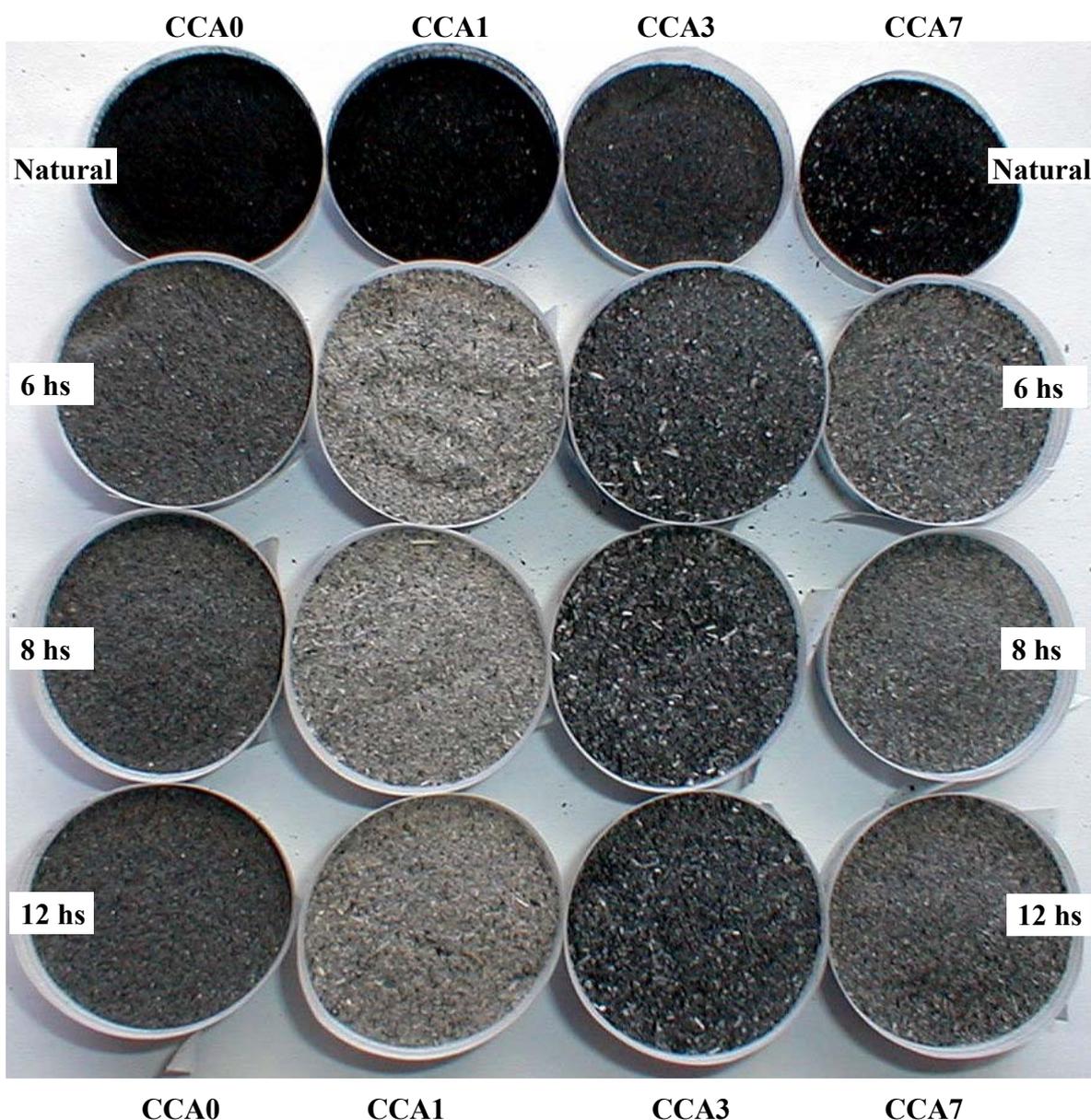


FIGURA 4.20 Porções de cinzas submetidas ao tratamento térmico TT0

Os parâmetros cromáticos foram obtidos nas leituras realizadas conforme descrito no item 3.2.2, os quais estão tabelados no Anexo III.

O estudo estatístico do parâmetro cromático L^* , que indica a luminância das amostras submetidas ao TT0, através de uma análise fatorial com dois fatores (tipo de cinza – 4 níveis; tempo – 4 níveis) e com duas repetições, mostra que as cinzas CCA0, CCA1, CCA3 e CCA7 diferem entre si, assim como os tempos de calcinação, ou seja, os dois fatores são significativos. Dados da análise estatística estão no Anexo IV.

Em termos de valores médios de luminância, a cinza CCA1 foi a que apresentou valor mais elevado (48,45%), o que é confirmado visualmente na FIG. 4.20, como sendo a cinza mais clara após o tratamento. Seguem-se as cinzas CCA 7 (43,13%), CCA 0 (38,93%) e a cinza CCA3 como a mais escura após o tratamento (37,52%). Por uma comparação múltipla de médias dos valores de luminância, através do Teste de Duncan, todas as cinzas diferem entre si.

Os gráficos da FIG 4.21 mostram o comportamento dos valores da luminância. O gráfico (a) apresenta a evolução de cada cinza em função do tempo de calcinação, enquanto o (b), o desempenho de cada tempo em função do tipo de cinza.

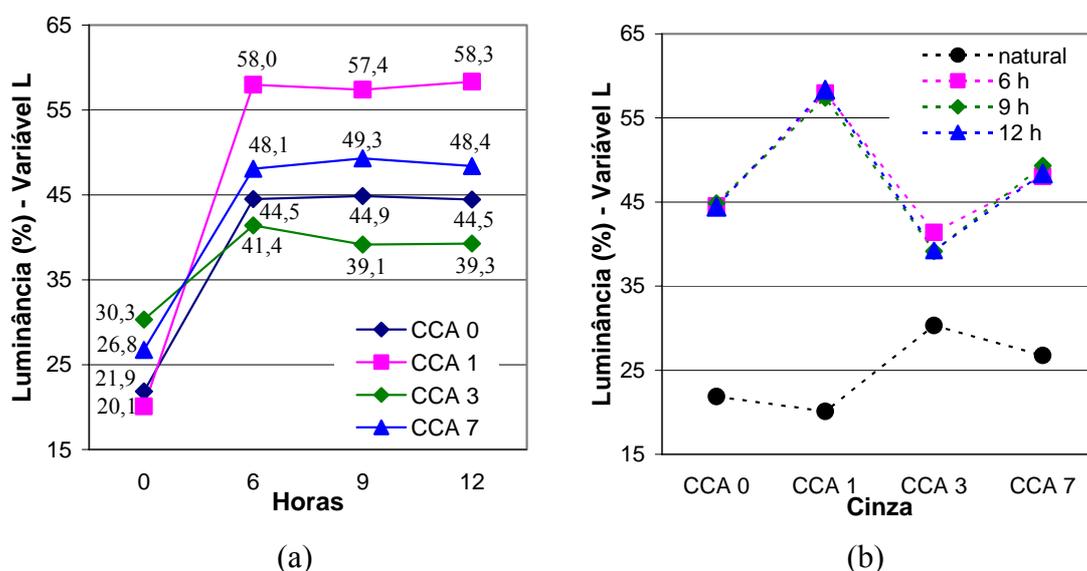


FIGURA 4.21 Comportamento da luminância das amostras tratadas com TT0 – (a) luminância de cada cinza em função do tempo; (b) luminância de cada tempo de queima em função do tipo de cinza

Nota-se que a cinza CCA 1, além de resultar mais clara, foi a que obteve maior ganho, já que em estado natural, é a que tem o menor valor de L^* . Enquanto isto, a cinza CCA3 foi a que obteve menor ganho.

Observa-se, no gráfico (b) da FIG. 4.21, que os resultados para os tempos de incineração a 400°C são muito semelhantes. Entretanto, por uma comparação múltipla de médias (Teste de Duncan), verifica-se que não há diferença significativa entre os tempos de 9 e 12 horas, sendo que ambos diferem do tempo de 6 horas e do estado natural.

4.3.2.2 Tratamento Térmico 1 – TT1

A FIG. 4.22 apresenta amostras de cinzas tratadas com TT1 ao lado de porções não tratadas. Além desta avaliação visual, é feita uma análise estatística dos parâmetros cromáticos obtidos nas leituras realizadas, que estão tabelados no Anexo III.

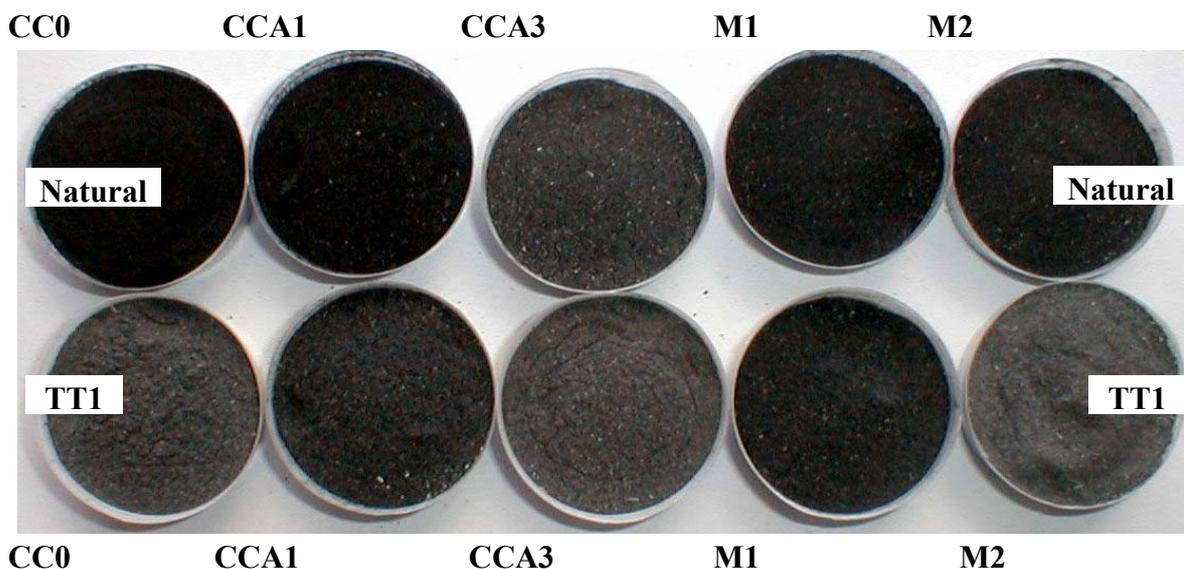


FIGURA 4.22 Amostras de cinzas e misturas com e sem tratamento TT1

Para o estudo estatístico, foi realizada uma análise fatorial com os dados de luminância (L^*), considerando como fatores o tipo de tratamento (2 níveis: natural ou sem tratamento e TT1) e o tipo de amostra (5 níveis: CCA0, CCA1, CCA3, M1, M2) e duas repetições. Esta análise indicou que ambos os fatores são significativos, ou seja, tanto as amostras diferem entre si, assim como o TT1 difere do natural ou sem tratamento.

Os gráficos (a) e (b) da FIG. 4.23 mostram o comportamento dos resultados de luminância das amostras tratadas e não tratadas com TT1. Nota-se que todas as amostras, após o tratamento térmico, tornaram-se mais claras.

A mistura M2 foi a que apresentou maior valor de luminância (42,96%), seguida pela cinza CCA0, cujo valor de L^* é próximo, 42,02%. Porém, estatisticamente (Teste de Duncan), as cinzas são consideradas diferentes entre si. Nota-se, no gráfico (b), que a cinza CCA0, embora não tenha resultado como a mais clara, foi a que obteve maior ganho, já que, em estado natural, sua luminância é de 21,29%, enquanto a da amostra M2 é 26,72%. Observando a foto da FIG. 4.22, estes resultados são constatados, ou seja, as amostras CCA0 e M2 são as mais claras, no entanto, é difícil de atestar, visualmente, qual das duas é mais clara.

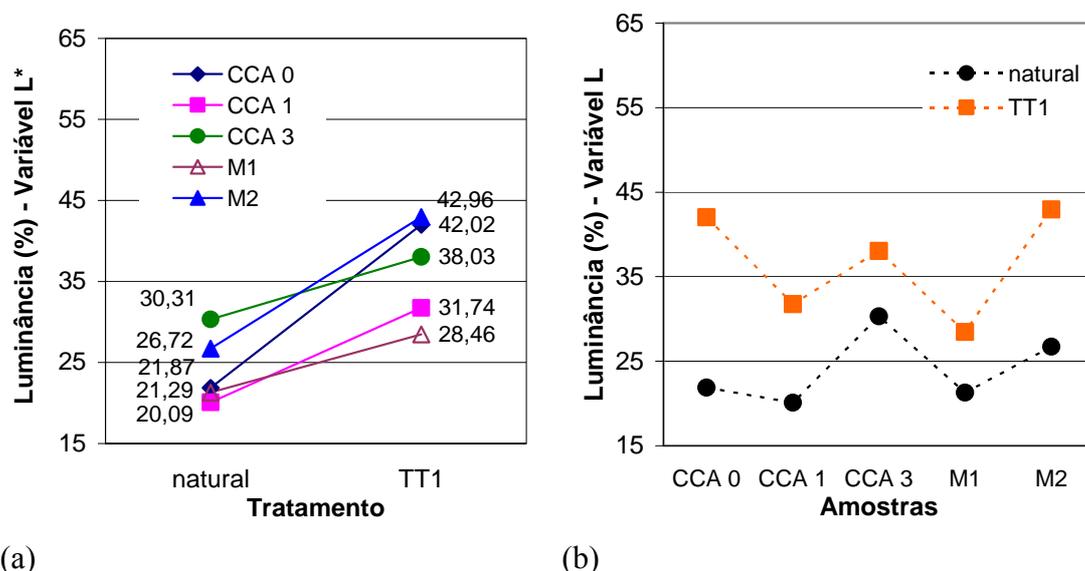


FIGURA 4.23 Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT1 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza

4.3.2.3 Tratamento Térmico 2 - TT2

A FIG. 4.24 apresenta foto de amostras das cinzas tratadas e não tratadas com TT2. Também são apresentados gráficos com os dados obtidos nas leituras cromáticas na FIG. 4.25. Os parâmetros cromáticos estão tabelados no Anexo III.



FIGURA 4.24 Amostras de cinzas e misturas com e sem tratamento TT2

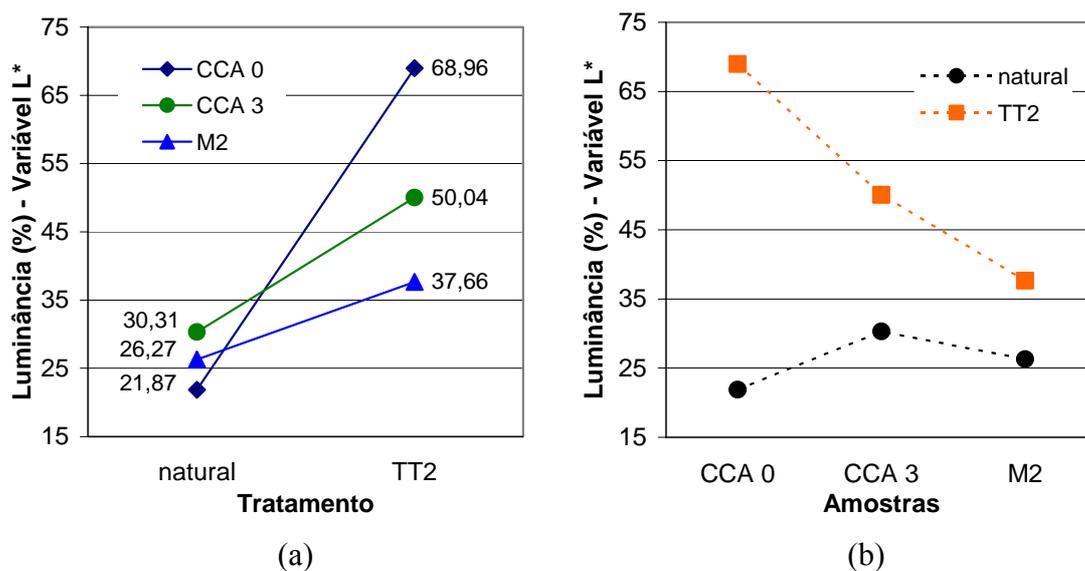


FIGURA 4.25 Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT2 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza

Visualmente, através da foto da FIG. 4.24, nota-se que todas as amostras se tornam mais claras após o tratamento. A CCA0 foi a que mais clareou, o que é comprovado pelos valores de luminância pré e pós-tratamento, 21,87 e 68,96%, respectivamente, e evidenciado nos gráficos (a) e (b) da FIG. 4.25.

Considerando que a mistura M2 é constituída em 50% da cinza CCA3, e comparando os resultados das mesmas, conclui-se que as outras cinzas que constituem a mistura clarearam muito pouco com o tratamento, pois além da M2 ter a mais baixa refletância pós-tratamento, a diferença entre os valores inicial e final é menor, o que fica evidente no gráfico (b).

O estudo estatístico aplicado aos dados de luminância comprova que os fatores (tipo de tratamento e tipo de amostra) são significativos, assim como a interação entre eles e que todos diferem entre si. Dados da análise estatística estão no Anexo IV.

4.3.2.4 Tratamento Térmico 3 - TT3

Os resultados do tratamento TT3 estão apresentados na foto da FIG. 4.26, enquanto os gráficos (a) e (b) da FIG. 4.27 apresentam os resultados obtidos nas leituras cromáticas. Semelhante aos demais tratamentos, todas as amostras clarearam. Tal como o que ocorreu no TT2, a cinza CCA 0 foi a que mais clareou.

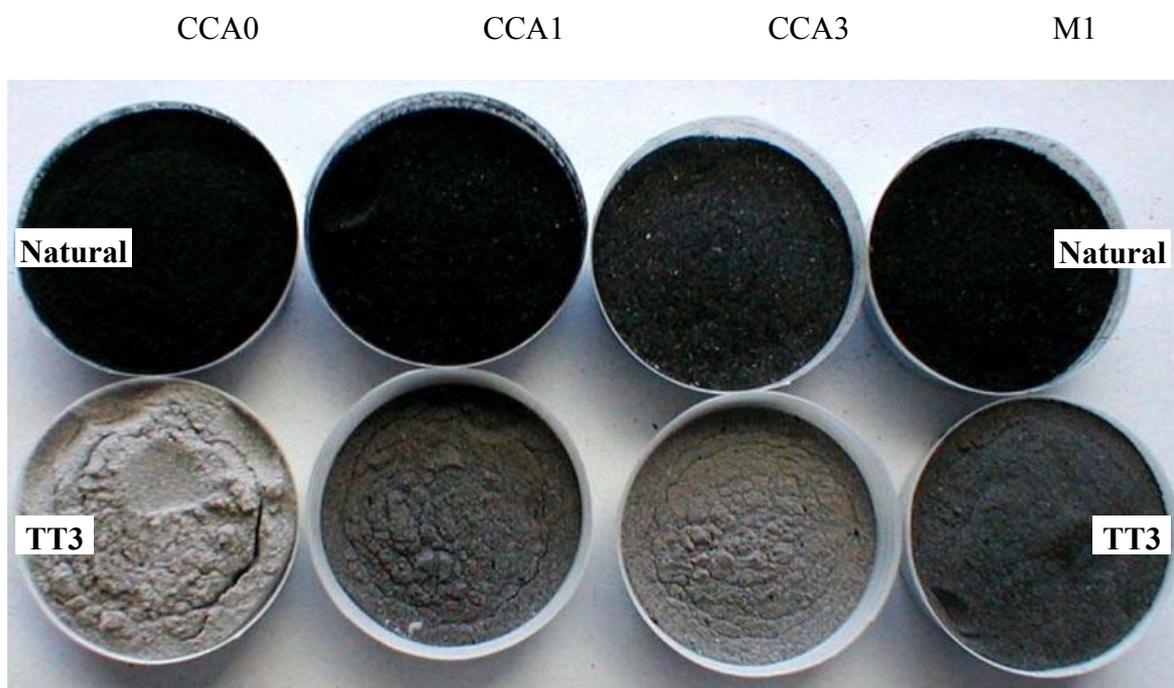


FIGURA 4.26 Amostras de cinzas CCA0, CCA1 e CCA3 e da mistura M1 com e sem tratamento TT3

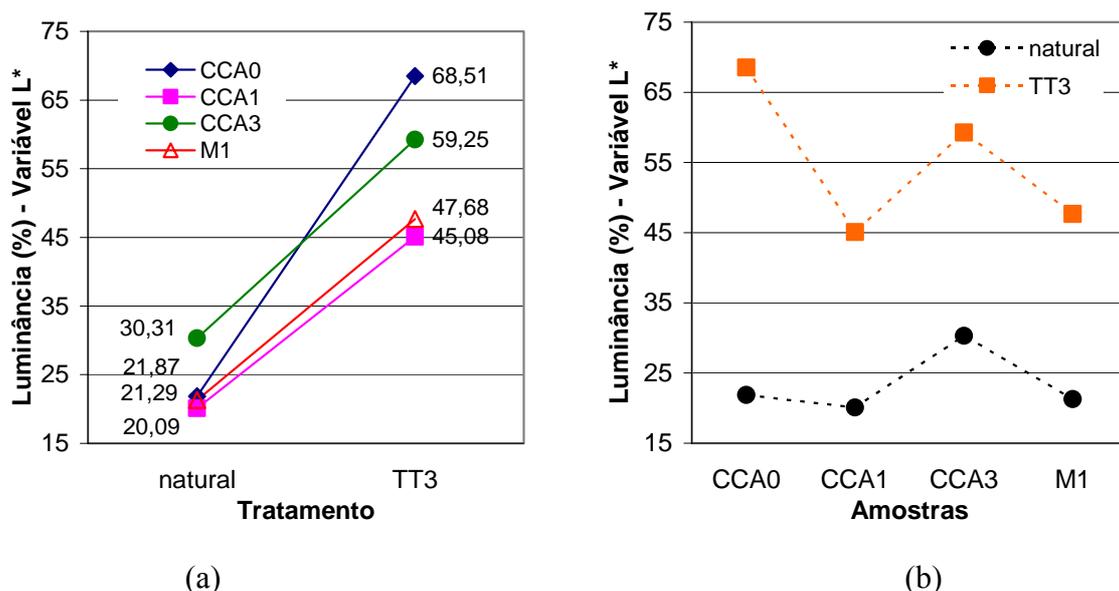


FIGURA 4.27 Comportamento da luminância das amostras com e sem tratamento TT3 – (a) luminância de cada cinza em função tratamento; (b) luminância de cada tratamento em função do tipo de cinza

4.3.2.5 Conclusões quanto à cor após os tratamentos térmicos

Com exceção do tratamento TT4, a aplicação dos demais tratamentos resultaram em amostras mais claras.

Os resultados mostraram que quanto mais elevada a temperatura do tratamento, mais claras resultaram as amostras, tal como ocorreu nos tratamentos TT2 e TT3, o que está de acordo com o citado na bibliografia (BOATENG e SKEETE, 1990; JONES, J. D. *apud* KRISHNARO *et al.*, 2001).

Quanto às cinzas, não houve comportamento uniforme em função do tipo de tratamento: a CCA0 foi a que mais clareou nos tratamentos TT2 e TT3, já no tratamento TT0, foi a cinza CCA1, enquanto a CCA3 foi a mais clara do TT1.

4.3.3 Resultados quanto à composição mineralógica

As composições mineralógicas das amostras, antes e depois dos tratamentos térmicos, determinadas por difração de raios X, são apresentadas na TAB. 4.11. Os difratogramas se encontram no Anexo III.

TABELA 4.11 Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras submetidas à tratamento térmico

Amostras	Tratamentos				
	Sem tratamento	TT1	TT2	TT3	TT4
CCA0	amorfa	amorfa	cristobalita feldspato	cristobalita tridimita	
CCA1	cristobalita	cristobalita		cristobalita tridimita	quartzo cristobalita
CCA3	cristobalita	cristobalita	cristobalita feldspato	cristobalita tridimita	
CCA7	cristobalita				
M1	cristobalita	cristobalita		cristobalita tridimita	
M2	cristobalita	quartzo cristobalita	-		

quartzo = SiO₂; cristobalita = SiO₂

Pela observação da TAB. 4.11, constatou-se que as amostras de cinzas e misturas submetidas ao tratamento TT1 não apresentaram alteração de fase para estes tratamentos, o que fica evidente pela CCA0 que permaneceu amorfa após estes tratamentos.

Em relação aos tratamentos TT2 e TT3 houve alteração de fase, tornando as amostras mais cristalinas. Com o tratamento TT2, quando as amostras são calcinadas a 1100°C e resfriadas lentamente, apresentam-se com fases predominantemente cristalinas, com presença de cristobalita e fedspato, independente de sua característica anterior (sem tratamento), ou seja, amorfa, no caso da CCA0, ou parcialmente cristalina na CCA3. A elevada temperatura e o choque térmico do TT3 tornaram todas as amostras predominantemente cristalinas, com presença de cristobalita e tridimita em todas as amostras, independente se eram mais amorfas ou mais cristalinas antes do tratamento.

Quanto ao TT4, a cinza tratada apresentou alguns picos, como o de quartzo, porém sem alterações significativas na característica mineralógica da cinza, mantendo-se pouco cristalina. O tratamento não pode ser mais bem avaliado, pois a cinza cristalina não conseguiu ser aspergida.

4.3.4 Resultados quanto à composição química

Considerando que os tratamentos TT2 e TT3 não apresentaram resultados satisfatórios em termos de composição mineralógica, pois tornaram as amostras mais cristalinas, e que o TT4 não se mostrou exequível, a indicação de qualquer um deles está descartada. Por isto, não foram realizadas análises químicas das amostras submetidas a estes tratamentos.

Os resultados das análises químicas das cinzas CCA0, CCA1 e CCA3, submetidas ao tratamento TT1 estão apresentados na TAB. 4.12.

TABELA 4.12 Composição química das amostras com e sem tratamento térmico TT1

Amostra / Tratamento	Composição típica em óxidos										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
CCA0 – ST	87,26	0,07	0,05	0,186	0,44	0,64	0,09	1,98	0,00	1,054	8,2
CCA0 – TT1	92,89	0,06	0,3	0,198	0,46	0,64	0,09	2,05	0,01	1,113	2,2
CCA1 – ST	62,62	0,06	0,05	0,118	0,26	0,48	0,07	1,19	0,0	0,449	34,7
CCA1 – TT1	76,55	0,07	0,06	0,142	0,32	0,58	0,07	1,46	0,01	0,543	20,2
CCA3 – ST	91,92	0,09	0,33	0,156	0,6	0,72	0,15	2,41	0,02	0,815	2,8
CCA3 – TT1	93,85	0,11	0,44	0,157	0,60	0,73	0,16	2,47	0,01	0,87	0,6

ST – sem tratamento

TT1

Os dados da TAB. 4.12 indicam que a calcinação (TT1) provocou, em todas as cinzas, um aumento do percentual de sílica, devido à redução na perda ao fogo por queima do carbono residual.

Após o tratamento, a cinza que resultou com maior teor de sílica, 93,85%, foi também a que mais clareou, além de apresentar a menor perda ao fogo (0,6%). Por outro lado, a cinza CCA 1, que resultou a mais escura entre as três, é também a que apresenta o menor percentual de sílica (76,55%) e o maior valor de perda ao fogo (20,2%), indicando, ainda, a presença de muito carbono e, por conseqüência, a cor mais escura. A cinza CCA0 apresentou comportamento intermediário, em termos de percentual de sílica e de coloração.

4.3.5 Conclusões quanto aos tratamentos térmicos

Os tratamentos TT0 e TT1 proporcionaram ganho em relação à cor, clareando as amostras. Nos tempos e temperaturas (400°C e 600°C) empregados, não houve alteração das características mineralógicas das amostras, cujo aspecto positivo é não tornar cristalinas as partículas amorfas. Estes resultados estão de acordo com os dados encontrados por Della (2001), que obteve cinzas mais claras, com temperaturas de até 700°C, sem tornar as amostras cristalinas. Em relação ao tratamento TTO, quanto à alteração da cor, o emprego dos maiores tempos de exposição (9 e 12 horas) não se justificam, pois, além de seus resultados não diferirem entre si, são inferiores àqueles obtidos em 6 horas.

Os tratamentos TT2 e TT3 foram os que produziram amostras mais claras, no entanto, tornaram-nas predominantemente cristalinas, devido à elevada temperatura. Este aspecto negativo, somado ao consumo de energia e à mão-de-obra envolvida nos processos, não justificam suas aplicações.

A técnica proposta no tratamento TT4 não se mostrou aplicável para todas as cinzas, não podendo, portanto, ser indicado. Diante disto, os resultados obtidos possibilitam somente uma avaliação parcial deste tratamento. Em termos mineralógicos, o resultado foi positivo, pois não apresentou alterações no difratograma; em relação à cor, foi negativo, pois a cinza não clareou.

Os tratamentos térmicos geraram aumento no percentual de sílica, sem reduzir os percentuais de impurezas, como constatado na TAB. 4.12. Isto se explica pela redução do percentual de perda ao fogo, indicando que foi eliminada parte do carbono residual.

Todos os tratamentos térmicos empregados resultaram em amostras mais claras do que em estado natural. Portanto, a calcinação ou requeima é um beneficiamento indicado para clarear cinza de casca de arroz. Tal constatação está de acordo com vários autores (JAMES e RAO, 1986; DELLA, 2001; DAFICO, 2001 e Weber 2001).

Resumidamente, os tratamentos TT0 e TT1 são indicados, pois não alteraram as características mineralógicas das cinzas, além de clareá-las e aumentar o percentual de sílica. Os tratamentos TT2 e TT3 tornaram todas as amostras cristalinas, portanto, não sendo indicados e o TT4, cuja técnica não se mostrou adequada para o material (cinza), também não é indicado.

4.4 TRATAMENTO QUÍMICO

Considerando os tratamentos químicos citados na bibliografia, aplicados à casca de arroz (CA) com o objetivo de obter cinza branca e com alto teor de sílica amorfa, neste trabalho são propostos tratamentos químicos constituídos basicamente de banhos ácidos e alcalinos, seguidos de tratamento térmico aplicados à CCA residual com a finalidade de clareá-la, aumentar seu teor de sílica e reduzir seu percentual de carbono residual. Os banhos químicos têm a finalidade de otimizar a eliminação do material orgânico e das impurezas residuais durante o processo de requeima.

Foram empregados dois ácidos (HCl e H₂SO₄) e uma base (NaOH), totalizando 5 tipos de banhos: dois com HCl em diferentes concentrações, um com H₂SO₄, um banho sucessivo dos dois ácidos e outro com a base.

Os tratamentos químicos foram realizados no laboratório de química do Laboratório de Ensaio de Modelagem de Estruturas – LEME – UFRGS.

4.4.1 Tratamentos químicos empregados

Os tratamentos químicos empregados na CCA são os descritos a seguir:

- TQ1 - Tratamento Químico 1: solução de 3,0 N HCl em água deionizada, fervida por 1 hora (KRISHNARAO *et al.*, 2001- adaptado). Amostras empregadas: CCA0, CCA1, CCA3, M1 e M2.
- TQ2 - Tratamento Químico 2: solução de 5,6 N HCl em água deionizada, fervida por 1 hora (KRISHNARAO *et al.*, 2001 –adaptado). Amostras empregadas: CCA0, CCA1, CCA3, M1 e M2.
- TQ3 - Tratamento Químico 3: solução com 10% H₂ SO₄ em água deionizada, fervida por 2 horas (YALÇIN e SEVINÇ, 2001 - adaptado). Amostras empregadas: CCA0, CCA1, CCA3, M1 e M2.
- TQ4 - Tratamento Químico 4: solução com 3% NaOH em água deionizada, durante 24 horas em temperatura ambiente (YALÇIN e SEVINÇ, 2001 - adaptado). Amostras empregadas: M1 e M2.

- TQ5 - Tratamento Químico 5: solução de 20 vol% HCl em água deionizada, por 24 horas e, em seguida, em solução de 20% vol H₂SO₄ também em água deionizada, por mais 24 horas, a temperatura ambiente (SOUZA *et al.*,2000 - adaptado). Foi empregada somente a amostra M1, pois foi um teste exploratório.

4.4.1.1 Proporção da mistura cinza/solução

A proporção da mistura cinza/solução empregada para todos os tratamentos foi de 50 g de cinza por litro de solução, proporção adotada de acordo com o que foi usado por Yalçin e Sevinç (2001) em seus experimentos na mistura casca de arroz/solução.

4.4.1.2 Outros procedimentos

Após a mistura cinza/solução ter sido fervida, no caso dos tratamentos TQ1, TQ2 e TQ3, ou aguardado o período previsto nos tratamentos TQ4 e TQ5, foram realizados os seguintes procedimentos:

- filtragem;
- lavagem com água deionizada e destilada, a temperatura ambiente (3 vezes);
- secagem em estufa a 110°C, por 24 horas;
- tratamento térmico – foi empregado o TT1 - queima a 600 °C, por 3 horas (YALÇIN e SEVINÇ, 2001).

4.4.2 Resultados quanto à composição química

A fim de facilitar a comparação e a análise dos dados, a TAB. 4.6 apresenta a composição química das amostras em estado natural, com tratamento químico/térmico e somente com tratamento térmico (queimadas a 600°C-3h) para verificar se as possíveis alterações são decorrentes da calcinação ou do tratamento químico, uma vez que as cinzas tratadas quimicamente, também foram calcinadas.

Os dados da TAB. 4.13 referentes aos TQ1, TQ2 e TQ3 indicam aumento do percentual de sílica nas amostras, já que os percentuais registrados são superiores aos das amostras simplesmente calcinadas, que por sua vez, são maiores que os das cinzas em estado natural (ST). O aumento do percentual de sílica se dá pela queima do carbono residual, ocorrido durante o tratamento térmico, e pela redução das impurezas em forma de óxidos que reagem com o ácido e são eliminados na lavagem e na queima.

TABELA 4.13 Composição química das amostras tratadas com TQ1, TQ2 e TQ3

Amostra / Tratamento		Composição típica em óxidos										
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
C	ST	87,26	0,07	0,05	0,186	0,44	0,64	0,09	1,98	0,00	1,054	8,2
C	600°C	92,89	0,06	0,30	0,198	0,46	0,64	0,09	2,05	0,01	1,113	2,2
A	TQ1	96,67	0,05	0,05	0,121	0,19	0,29	0,07	0,79	0,01	0,173	1,6
0	TQ2	96,74	0,04	0,04	0,118	0,19	0,26	0,07	0,77	0,01	0,151	1,6
	TQ3	96,92	0,05	0,04	0,117	0,20	0,28	0,07	0,76	0,01	0,153	1,4
C	ST	62,62	0,06	0,05	0,118	0,26	0,48	0,07	1,19	0,00	0,449	34,7
C	600°C	76,55	0,07	0,06	0,142	0,32	0,58	0,07	1,46	0,01	0,543	20,2
A	TQ1	95,98	0,21	0,06	0,083	0,21	0,21	0,05	0,46	0,01	0,147	2,6
1	TQ2	86,85	0,09	0,06	0,078	0,19	0,18	0,06	0,44	0,01	0,136	11,9
	TQ3	96,16	0,05	0,05	0,091	0,21	0,22	0,05	0,51	0,01	0,156	2,5
C	ST	91,92	0,09	0,33	0,156	0,60	0,72	0,15	2,41	0,02	0,815	2,8
C	600°C	93,85	0,11	0,44	0,157	0,60	0,73	0,16	2,47	0,01	0,870	0,6
A	TQ1	96,24	0,09	0,09	0,129	0,41	0,40	0,12	1,67	0,01	0,235	0,6
3	TQ2	95,77	0,13	0,06	0,123	0,41	0,39	0,12	1,64	0,01	0,235	1,1
	TQ3	96,11	0,09	0,11	0,129	0,41	0,41	0,13	1,66	0,01	0,236	0,7
M	ST	82,23	0,09	0,13	0,156	0,44	0,65	0,11	1,72	0,01	0,565	13,9
1	TQ4	93,4	0,13	0,11	0,200	0,46	0,78	1,31	1,36	0,01	0,440	1,8
	TQ5	96,22	0,09	0,11	0,126	0,31	0,34	0,08	1,14	0,01	0,186	1,4
M	ST	82,93	0,09	0,28	0,161	0,44	0,65	0,1	1,75	0,01	0,58	13,0
2	TQ4	94,21	0,12	0,41	0,179	0,53	0,75	0,56	1,57	0,01	0,485	1,2

PF – perda ao fogo

O maior percentual de sílica obtido com estes tratamentos foi de 96,92%, para a cinza CCA0, com o tratamento TQ3 (solução de H₂SO₄).

Na cinza residual CCA1 houve uma grande redução no percentual de perda ao fogo das amostras com tratamento químico/térmico (2,6%; 11,9%; 2,5%) quando comparadas com a amostra submetida somente ao tratamento térmico (20,2%), indicando que os banhos químicos influenciaram no processo de queima do carbono residual. Isto também se verificou para a cinza CCA0, porém em menor escala.

Já para a cinza residual CCA3 não foi constatada a influência do tratamento químico na redução do percentual de perda ao fogo, visto que os percentuais registrados para as amostras com tratamento químico/térmico são semelhantes ou até maiores que os das calcinadas. Cabe ressaltar que esta cinza, em estado natural, apresenta baixo percentual de perda ao fogo (2,8%).

Os percentuais de Na_2O se mantiveram constantes quando as amostras foram calcinadas e apresentaram redução, quando com tratamento químico/térmico; o percentual de redução variou com o tipo de cinza.

Quanto aos óxidos K_2O e P_2O_5 , em relação às cinzas CCA0, CCA1 e CCA3, constata-se redução de seus percentuais nas amostras com tratamento químico/térmico quando comparadas com a amostra submetida somente ao tratamento térmico, indicando que os tratamentos químicos influenciaram na redução da presença destes elementos, tal como era esperado.

Quanto aos demais óxidos, existem pequenas variações nos percentuais entre as amostras com ou sem tratamento, mas não há uma tendência que deva ser registrada e, possivelmente, variam em função do tipo de cinza e não do tipo de tratamento.

4.4.3 Resultados quanto à presença de resíduos dos tratamentos aplicados

Em relação a este item, os resultados são apresentados segundo o tipo de resíduo e não de acordo com o tratamento ou cinza.

Para verificar a presença de resíduos de cloro (Cl) e enxofre (S) nas amostras, foi feita uma análise qualitativa que permitiu estimar os teores aproximados destes elementos.

4.4.3.1 Técnica empregada

A análise qualitativa de traços permite estimar os teores aproximados de cloro e enxofre. A técnica empregada foi a espectrometria de fluorescência de raios X. O padrão de cloro foi o riolito JR-1, certificado para teor de cloro de 920 ppm, e o padrão de enxofre o *lake sediment* LKSD2, certificado para 1400 ppm de enxofre. A determinação foi por comparação da intensidade dos picos de raios X característicos medidos em um padrão (de composição muito diferente) e nas amostras de CCA tratadas e ajustados por gaussianas no espectro do padrão e das amostras, porém sem correção de matriz (por isso determinado aqui de semi-quantitativo).

4.4.3.2 Resíduo de cloro (Tratamentos com HCl - TQ1, TQ2 e TQ5)

A FIG. 4.28 mostra gráficos dos resultados gerados pela análise qualitativa.

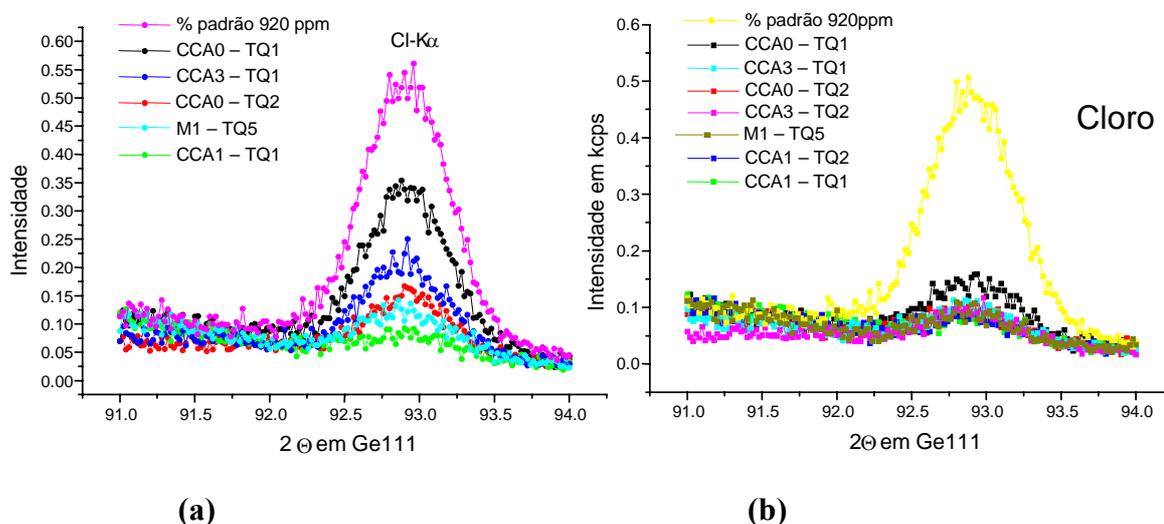


FIGURA 4.28 Gráficos qualitativos do resíduo de cloro após os tratamentos TQ1 e TQ2 – (a) uma etapa de lavagem; (b) duas etapas de lavagem

Diante dos resultados mostrados no gráfico (a), que evidenciam a presença de resíduo de Cl em algumas das cinzas, novas amostras foram tratadas quimicamente e tiveram o processo de lavagem duplicado. Em seguida, as amostras foram submetidas ao tratamento térmico (calcinação a 600°C/3h) e então, ensaiadas. Os resultados desta nova análise são apresentados no gráfico (b).

A comparação entre os gráficos (a) e (b) deixa claro a influência do processo de lavagem na quantidade de cloro residual.

4.4.3.3 Resíduo de enxofre (Tratamentos com H_2SO_4 - TQ3 e TQ5)

A FIG. 4.29 mostra os resultados gerados pela análise qualitativa, em forma gráfica.

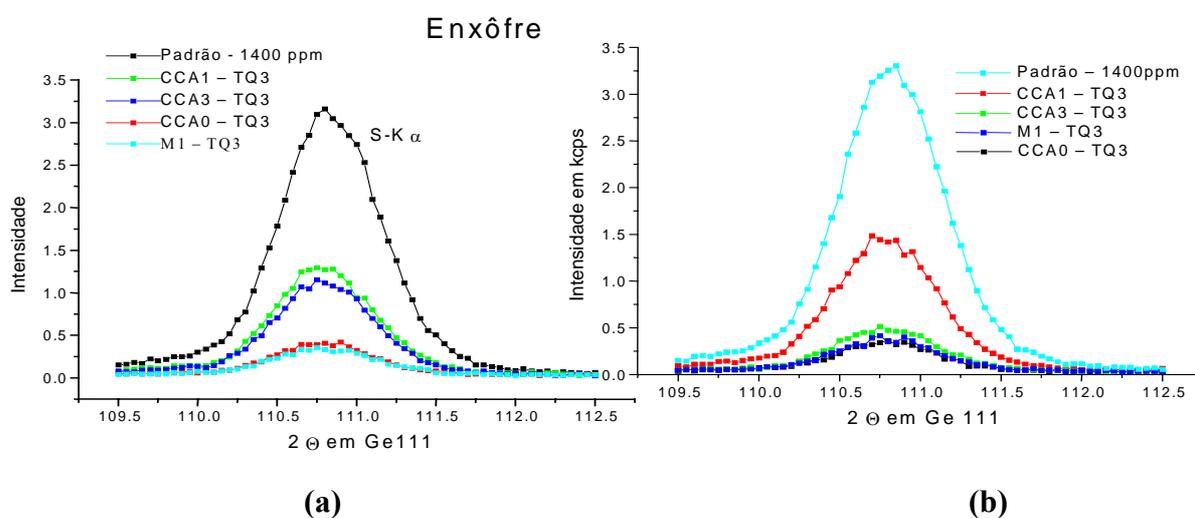


FIGURA 4.29 Gráficos qualitativos do resíduo de enxofre após os tratamentos TQ3 e TQ5 – (a) uma etapa de lavagem; (b) duas etapas de lavagem

No caso do resíduo de enxofre, também foi necessário realizar uma segunda etapa de lavagem, pois como mostra o gráfico (a) da FIG. 4.29, as cinzas CCA1 e CCA3 apresentaram elevada quantidade de resíduo quando submetidas a somente uma etapa de lavagem. O gráfico (b) apresenta os resultados de amostras lavadas em duas etapas de três vezes, em água deionizada. Os dados mostram que a cinza CCA3 obteve redução na quantidade de resíduo, quando lavada novamente, aproximando-se ao nível das demais (CCA0 e M1). Já a cinza CCA1 não teve comportamento semelhante, mantendo o percentual de resíduo, independente na nova lavagem, como pode ser verificado no gráfico (b); no entanto, a mistura M1, composta por 50% de cinza CCA1 foi a que apresentou menor percentual de resíduo, inclusive quando submetida a uma só etapa de lavagem (gráfico a). Logo, a justificativa não pode ser atribuída às características da cinza, mas sim

ao processo de lavagem. Assim, conclui-se que a lavagem não eliminou totalmente a presença de resíduos de enxofre devido ao tratamento com H_2SO_4 .

4.4.3.4 Resíduo de sódio (Tratamento com Hidróxido de Sódio - NaOH - TQ4)

A presença de resíduo de sódio pode ser verificada por comparação dos percentuais de Na_2O nas composições químicas das amostras com e sem tratamento químico. Tal como aconteceu com a investigação dos outros resíduos, a análise química das cinzas tratadas com TQ4 foi repetida em amostras submetidas a uma segunda seção de lavagem em água deionizada. A TAB. 4.14 apresenta as composições químicas das misturas M1 e M2 tratadas e não tratadas.

As células escurecidas indicam que, para ambas as misturas, houve aumento dos percentuais de Na_2O após o tratamento químico/térmico. Para a amostra M1, o percentual passou de 0,11% da cinza sem tratamento para 1,31% da com tratamento e 0,88%, com tratamento e duas lavagens; para a mistura M2, o percentual cresceu de 0,1% para 0,56% quando tratada e reduziu para 0,54% com duas seções de lavagem.

TABELA 4.14 Composição química das amostras tratadas quimicamente com TQ4

Amostra / Tratamento		Composição típica em óxidos										
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
M 1	ST	82,23	0,09	0,13	0,156	0,44	0,65	0,11	1,72	0,01	0,565	13,9
	TQ4	93,4	0,13	0,11	0,2	0,49	0,78	1,31	1,36	0,01	0,44	1,8
	TQ4*	94,65	0,12	0,28	0,2	0,49	0,81	0,88	1,35	0,02	0,394	0,8
M 2	ST	82,93	0,09	0,28	0,161	0,44	0,65	0,10	1,75	0,01	0,58	13
	TQ4	94,21	0,12	0,41	0,179	0,53	0,75	0,56	1,57	0,01	0,485	1,2
	TQ4*	95,06	0,12	0,19	0,192	0,53	0,78	0,52	1,57	0,01	0,431	0,6

PF – perda ao fogo

* 2 etapas de lavagem

Tais resultados indicam que a lavagem reduziu o percentual de Na_2O das amostras tratadas, mas mesmo assim, os valores ainda são superiores aos das amostras não tratadas. Estes dados sugerem a presença de resíduo do tratamento aplicado à base de NaOH, mesmo que as amostras sejam bem lavadas, por diversas vezes.

4.4.4 Resultados quanto à cor

Primeiramente, são mostradas fotografias de cinzas tratadas de acordo com o tratamento aplicado. Posteriormente, é feita uma análise estatística dos valores do parâmetro de luminância levantados nas medições cromáticas, de forma conjunta dos diversos tratamentos, quando também é apresentada, para fins ilustrativos, uma foto conjunta das amostras tratadas.

As cinco figuras a seguir (FIG. 4.30 a 4.33) apresentam, respectivamente, fotos de cinzas com tratamentos TQ1 e TQ2, TQ3, TQ4 e TQ5, comparando-as com porções não tratadas.

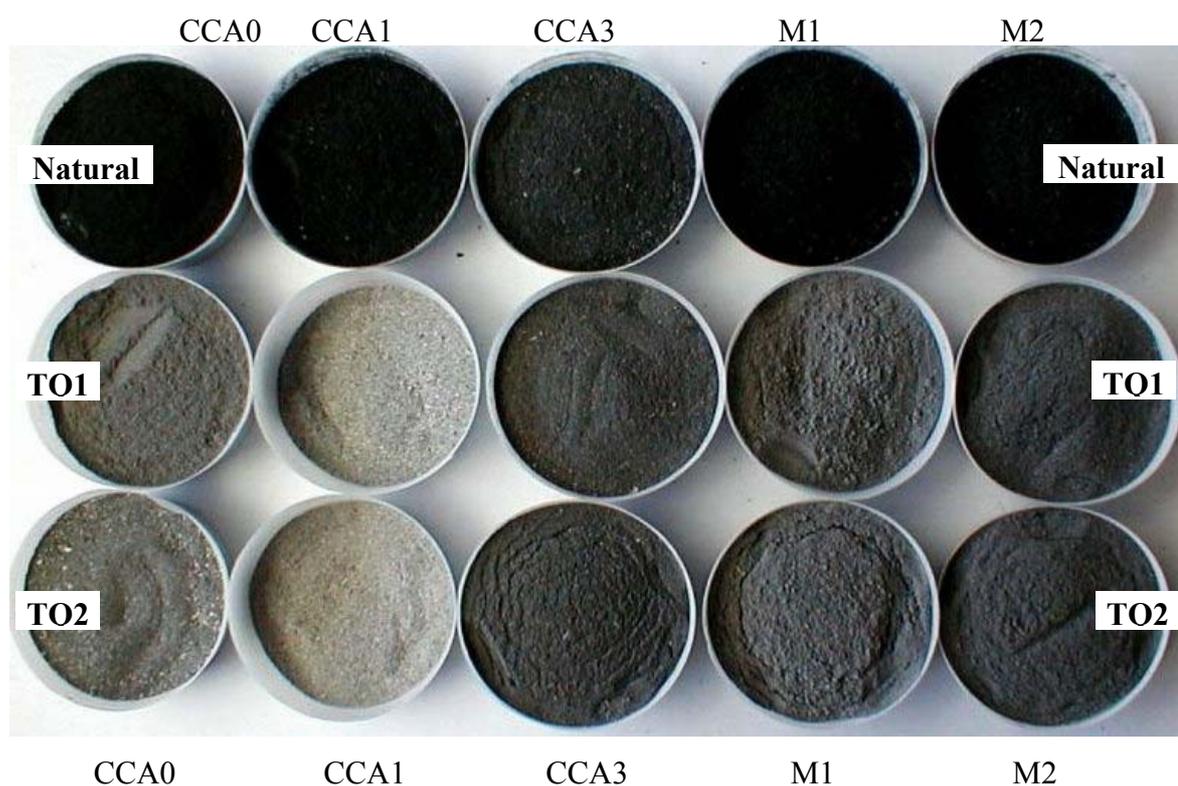
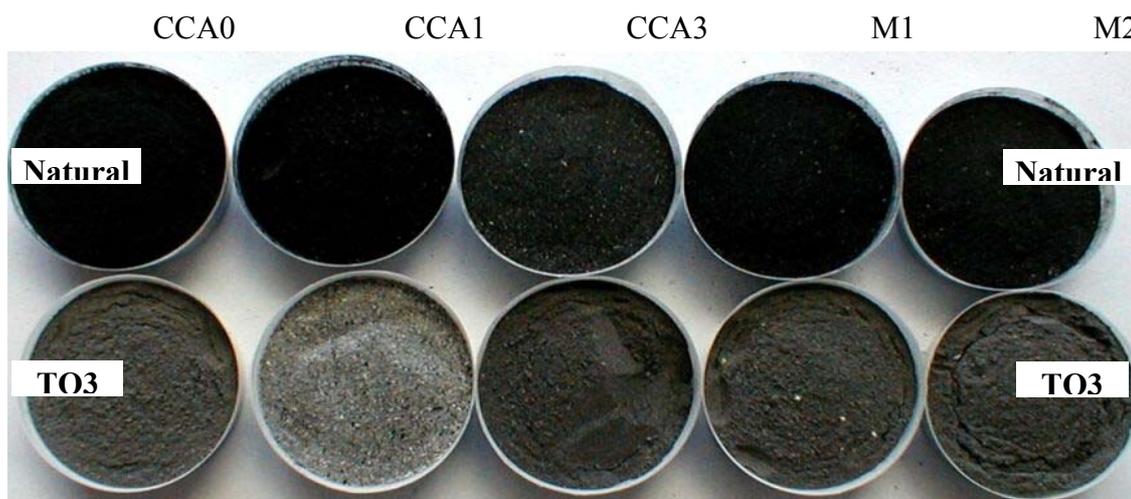


FIGURA 4.30 Amostras em estado natural e submetidas aos tratamentos TQ1 e TQ2 (solução de HCl)



CCA0 CCA1 CCA3 M1 M2

FIGURA 4.31 Cinzas e misturas com e sem tratamento TQ3 (solução de H_2SO_4)



FIGURA 4.32 Misturas de cinzas residuais, M1 e M2, tratadas com TQ4 (solução NaOH)



FIGURA 4.33 Mistura M1 tratada com TQ5 ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$)

4.4.4.1 Avaliação colorimétrica

Os parâmetros cromáticos obtidos estão locados no **Espaço da Cor $L^*a^*b^*$** , conforme mostra a FIG. 4.34, e se encontram tabelados no Anexo III.

Para fins de análise estatística, foi considerada uma matriz 5x5, onde um dos fatores é o tipo de tratamento (5 níveis: sem tratamento ou natural; calcinada ou tratamento térmico; TQ1; TQ2 e TQ3) e o outro, é o tipo de cinza (5 níveis: CCA0; CCA1; CCA3; M1; M2). Foram desconsiderados os tratamentos TQ4 e TQ5, por não fecharem a matriz.

A análise estatística dos parâmetros cromáticos mostrou que, quando considerados os dois fatores (tipo de amostra e tipo de tratamento), ambos são significativos, assim como a interação entre eles. Considerando valores médios, o tratamento TQ1 foi o que produziu cinzas mais claras, ou seja, com maior valor de luminância (52,2%), acompanhado pelos tratamentos TQ2 e TQ3, com 50,0% e 48,2%, respectivamente. Através de comparação múltipla de média (Teste de Duncan), foi constatado que os tratamentos TQ1 e TQ2 não diferem entre si de forma significativa, enquanto os demais, sim. Os dados da análise estatística estão apresentados no Anexo IV.

A FIG. 4.35 apresenta gráficos de comportamento da luminância das amostras. Nos gráficos fica evidente que a cinza CCA1 foi a mais beneficiada pelos tratamentos químicos, enquanto a CCA3, a menos beneficiada. O gráfico (b) comprova que todas as cinzas e misturas em estado natural são escuras, com valores de luminância não superiores a 30. Nota-se, também, que todas se tornam mais claras com a calcinação e mais ainda com os tratamentos químicos.

A FIG. 4.36 apresenta foto do conjunto de amostras avaliadas no sistema CIELab.

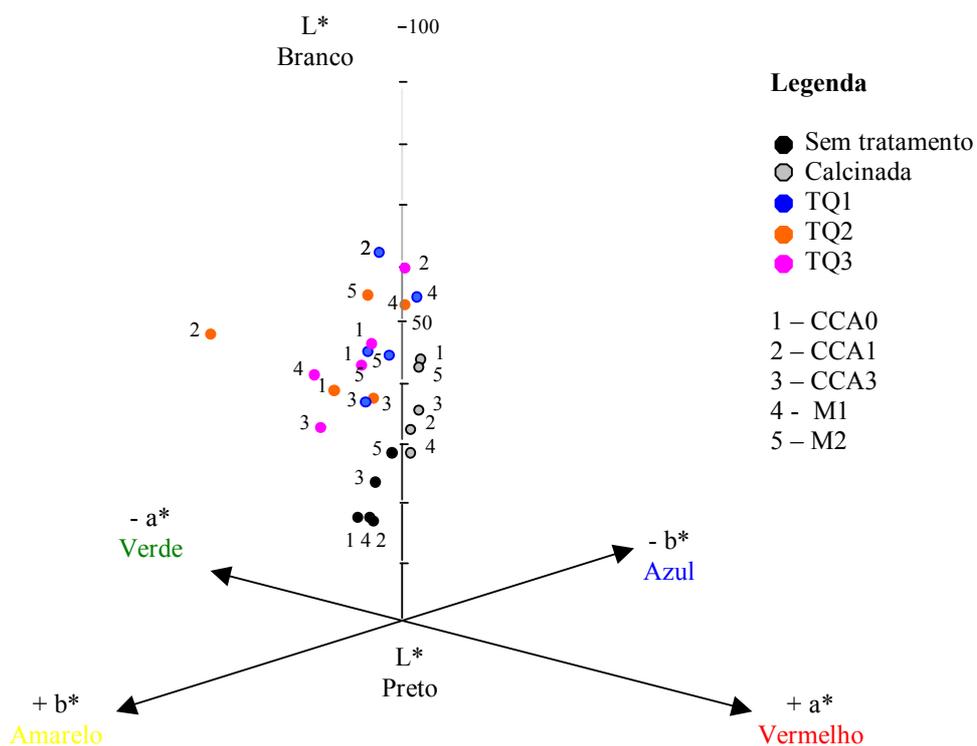


FIGURA 4.34 Locação dos parâmetros cromáticos no Espaço da cor $L^* a^* b^*$

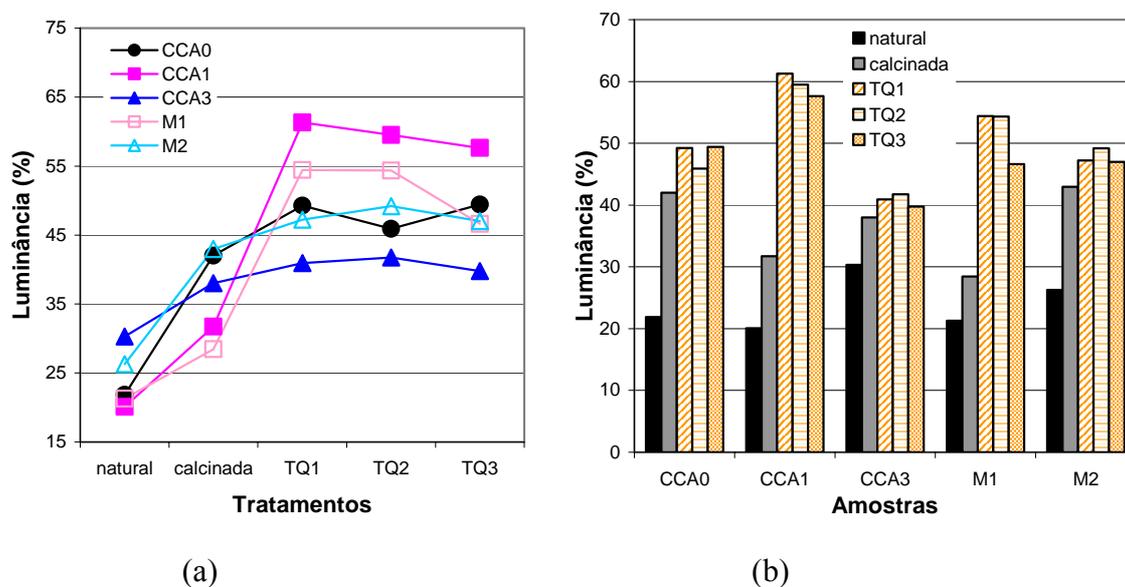


FIGURA 4.35 Comportamento da luminância – (a) das cinzas em relação ao tipo de tratamento; (b) tipo de tratamento em função das amostras)

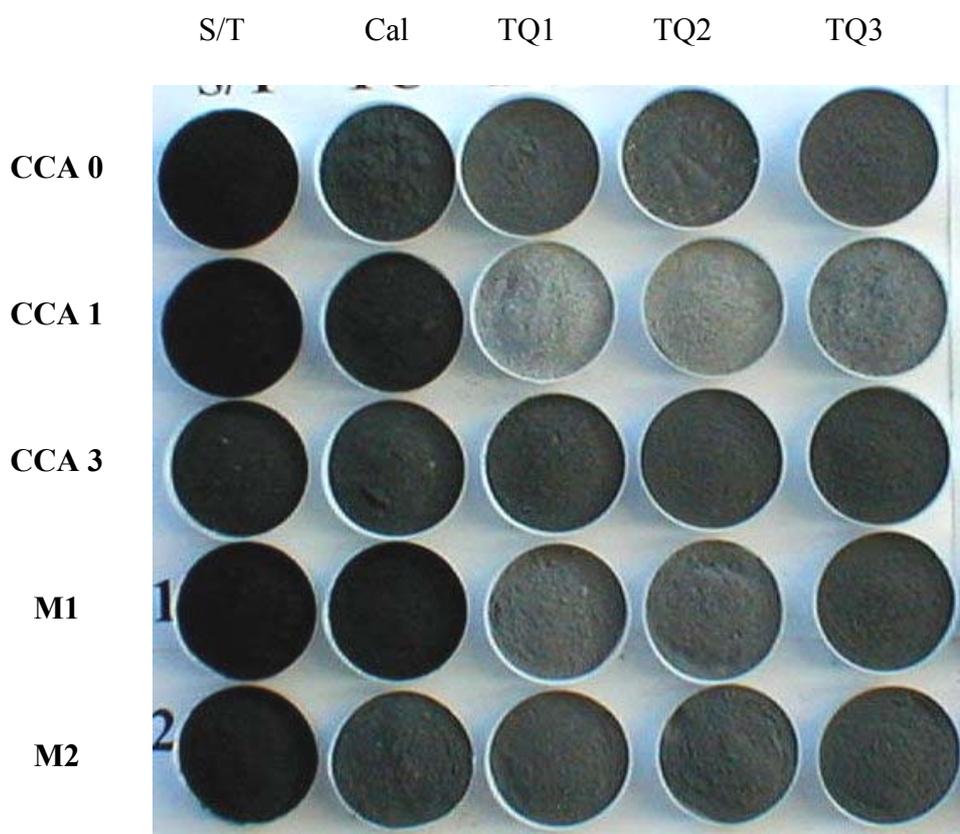


FIGURA 4.36 Conjunto de amostras em estado natural e submetidas aos tratamentos químicos TQ1, TQ2 e TQ3

Pela observação da foto e pela análise estatística do valor da luminância, pode-se fazer as seguintes observações:

- todas as amostras submetidas aos tratamentos químicos resultaram mais claras que as amostras em estado natural, o que era esperado, pois a aplicação do banho químico tem a finalidade de reduzir as impurezas através da reação química entre eles;
- constata-se que há acréscimo no valor da luminância, quando comparados os tratamentos químicos (TQ) com o tratamento térmico (TT – calcinação), cuja diferença indica o ganho pelo ação química, uma vez que a diferença entre eles é o ataque prévio das soluções;
- entre os tratamentos, os banhos com solução de HCl (TQ1 e TQ2) foram os mais eficientes, pois produziram amostras mais claras;

- entre as amostras, a da cinza CCA1 foi a que obteve maiores vantagens em relação à cor quando tratada quimicamente, possivelmente por ser uma cinza mal queimada, constituída de elevado percentual de matéria orgânica (PF = 34,7%) na qual o banho ácido atuou mais. Em contrapartida, a cinza CCA3, mais cristalina e com menor percentual de perda ao fogo (2,8%), foi a que menos clareou;
- o desempenho das misturas é condicionado pelo comportamento da cinza que participa com maior percentual na sua constituição;
- entre os banhos, os ácidos apresentaram melhor desempenho que o básico, sendo todas as amostras tratadas com qualquer um deles, mais claras que as tratadas com solução básica.

4.4.5 Resultados quanto à composição mineralógica

A composição mineralógica das amostras antes e depois dos tratamentos químicos, determinadas por difração de raios X, são apresentadas na TAB. 4.15. Os difratogramas se encontram no Anexo III.

TABELA 4.15 Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras submetidas à tratamento térmico

Amostras	Tratamentos					
	Sem tratamento	TQ1	TQ2	TQ3	TQ4	TQ5
CCA0	amorfa	amorfa	amorfa	amorfa		
CCA1	cristobalita	cristobalita	cristobalita quartzo	cristobalita		
CCA3	cristobalita	cristobalita quartzo	cristobalita quartzo	cristobalita quartzo		
M1	cristobalita	cristobalita	cristobalita	cristobalita quartzo	cristobalita	cristobalita
M2	cristobalita	cristobalita quartzo	cristobalita	cristobalita	cristobalita quartzo	

quartzo = SiO₂; cristobalita = SiO₂

Os dados da TAB. 4.15 mostram que os tratamentos químicos seguidos por tratamento térmico (600°C/3h) causaram transformações em algumas amostras, constatadas pela presença de quartzo que não ocorria nas amostras sem tratamento. Quando comparados com os dados do tratamento TT1 (TAB. 4.11), somente a CCA3 apresentou diferença, ou seja, registrou a presença de quartzo, que eventualmente pode ter sido exposta pela retirada do carbono pelo tratamento químico.

Os banhos com solução de HCl (TQ1 e TQ2), entre os aplicados, foram os que produziram melhores resultados, ou seja, cinzas mais claras. No entanto, a diferença de concentração entre os banhos TQ1 (3N) e TQ2 (5,6N) não produziu diferenças significativas nos resultados. Por isto e com o objetivo de minimizar a quantidade de ácido aplicado, foi testada uma concentração menor.

4.4.6 Análise dos Resultados dos Banhos químicos

Analisando os resultados obtidos com os tratamentos químicos, constatou-se que a aplicação dos tratamentos TQ1 e TQ2 resultaram em cinzas mais claras entre os demais. Portanto, o banho com solução de HCl foi selecionado para as próximas etapas do trabalho. No entanto, a avaliação de duas concentrações mostrou que as diferenças entre si não foram significativas, indicando que concentrações mais elevadas são desnecessárias, ou seja, que há ácido em excesso, além daquela quantidade que reage com os óxidos residuais.

No banho químico, os óxidos residuais, como potássio e sódio, são eliminados pela ação do ácido clorídrico, pela seguinte equação genérica:

$\text{HCl} + \text{xO} \rightarrow \text{xCl} + \text{H}_2\text{O}$, onde x pode ser sódio, ou potássio, menos silício, pois o óxido de silício não reage com o ácido.

Assim, com o objetivo de encontrar uma solução com concentração mais baixa e de simplificar o processo, obtendo os mesmos resultados, foram testadas, de forma comparativa, as alternativas abaixo.

4.4.6.1 Banhos químicos com soluções de diferentes concentrações de HCl

- Banho em solução 3N Cl, com fervura durante uma hora (testado anteriormente e por isto considerado referência) – Amostra 1;
- Banho em solução 1N Cl, sem ferver, por 24 horas – Amostra 2;
- Banho em solução 1N Cl, sem ferver, por 1 hora – Amostra 3.

Após o banho químico, as amostras foram secas em estufa, a 100°C, e posteriormente, calcinadas a 600°C por 3 horas. A cinza empregada foi a CCA0.

A concentração de 1N foi adotada por também ser citada na bibliografia (CHAKRAVERTY *et al.*, 1988; QINGGE *et al.*, 2004).

Os resultados obtidos são mostrados na FIG. 4.37, onde é apresentada foto das amostras tratadas comparativamente com uma em estado natural. Além disto, foi feita avaliação colorimétrica, cujos resultados das leituras colorimétricas estão apresentados na TAB. 4.16.



FIGURA 4.37 Amostras de CCA0 submetidas a banhos químicos com diferentes concentrações de HCl

TABELA 4.16 Parâmetros colorimétricos médios de amostras da CCA0 submetidas a diferentes banhos com solução de HCl

Parâmetros Colorimétricos	CCA 0		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
L*	46,29	48,62	45,80
a*	0,527	0,475	0,606
b*	0,723	0,404	0,722

Embora estatisticamente diferentes, os valores de luminância apresentam pequenas diferenças entre si, como se pode observar na foto da FIG. 4.37, onde, em termos visuais, estas diferenças praticamente não são percebidas. A amostra submetida ao banho com solução de 1N Cl, por uma hora, sem ferver, resultou no maior valor médio de luminância, 48,62%. Assim, não se justifica o emprego de concentrações maiores que 1N e fervura da mistura solução/cinza. Quanto ao tempo do banho, uma hora se mostrou satisfatório em termos de resultados. Isto se justifica pelo fato das reações entre o ácido e os óxidos serem quase instantâneas.

4.4.7 Conclusões quanto aos tratamentos químicos

Considerando os objetivos do banho químico - eliminar as impurezas (alcalis), tornando as cinzas mais claras, com maior percentual de sílica e com menor risco de reação alcali-agregado - os banhos com solução de HCl apresentaram os melhores resultados.

Assim, fica selecionado o banho com solução de 1 N Cl, por uma hora, seguido de por várias lavagens (até obter pH igual a 7) e secagem em estufa a 100°C, como tratamento químico a ser usado nas próximas etapas. Posteriormente, as amostras são submetidas aos tratamentos térmico e físico.

CAPÍTULO 5

5 CINZAS BENEFICIADAS: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO

Este capítulo está dividido em dois itens. Um que trata da produção das cinzas beneficiadas, sendo apresentadas as cinzas, as operações unitárias e os tratamentos empregados no beneficiamento, e o outro que aborda a avaliação destas cinzas, quanto à pozolanicidade e outros critérios, tal como está indicado na FIG. 3.2.

5.1 PRODUÇÃO DE CINZAS BENEFICIADAS

5.1.1 Cinzas empregadas

As cinzas usadas foram:

- CCA0, de referência;
- CCA7, residual;
- CCA9, residual.

Estas CCA estão caracterizadas no item 3.2. O critério de seleção foi trabalhar, comparativamente, sempre com duas cinzas residuais de composições mineralógicas distintas: uma menos cristalina e outra, mais cristalina, além da cinza de referência. As cinzas beneficiadas são aquelas que foram empregadas na etapa seguinte do trabalho, ou seja, na produção de cimentos.

5.1.2 Tratamentos selecionados e respectivas operações unitárias

Os tratamentos empregados são: físico, térmico e químico. São aqueles que foram selecionadas ao longo do Capítulos 4.

5.1.2.1 Tratamento físico

O tratamento físico é a moagem, que visa à redução da composição granulométrica das cinzas através de duas diferentes alternativas. Tais alternativas de moagem foram selecionadas a partir dos resultados do Experimento preliminar II (item 4.2.8) e são as seguintes:

- moagem, em moinho de bolas, por 120 minutos;
- moagem em moinho periquito, por 30 min.

5.1.2.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico adotado foi o TT1, selecionado a partir dos resultados do Capítulo 4, e constitui-se de:

- queima da cinza, a 600°C, em forno de mufla, por 180 min.

5.1.2.3 Tratamento químico

O tratamento químico empregado foi o banho com ácido clorídrico, definido no Capítulo 4, cujas operações unitárias são:

- banho químico com solução de 1N HCl, por uma hora;
- lavagem;
- secagem em estufa, a 100°C, por 24 horas.

5.1.3 Beneficiamentos

Os beneficiamentos das cinzas são aqueles resultantes da associação e sobreposição dos diferentes tratamentos selecionados e descritos e especificados no item 5.1.2, anteriormente.

A FIG. 5.1 apresenta, de forma esquemática, os beneficiamentos e tratamentos aplicados nas cinzas CCA0, CCA 7 e CCA9.

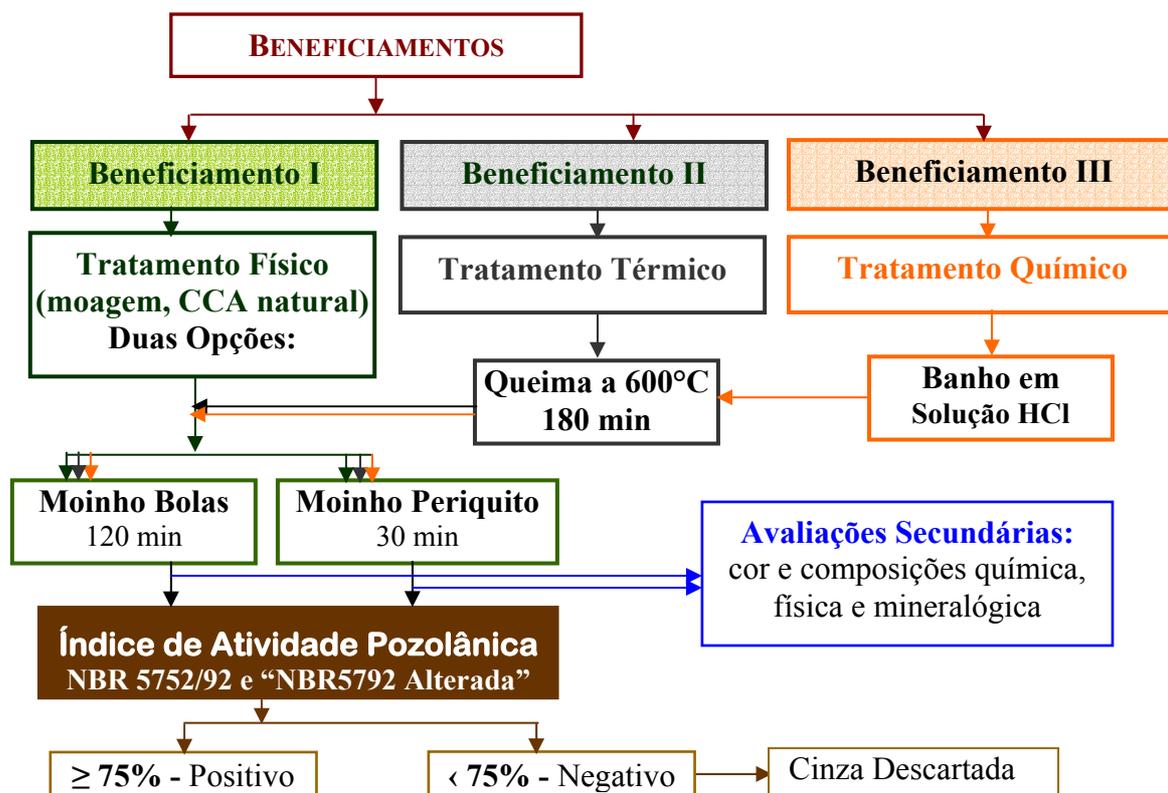


FIGURA 5.1 Esquema dos tratamentos e beneficiamentos aplicados nas cinzas CCA0, CCA7 e CCA9

5.1.3.1 Aplicação dos beneficiamentos

Inicialmente, cada cinza foi dividida em três lotes e, em seguida, um lote de cada cinza foi submetido a cada um dos beneficiamentos.

Concluídos os tratamentos das cinzas, resultaram dezoito diferentes lotes de cinzas beneficiadas (3 cinzas x 3 tratamentos x 2 moagens), os quais foram avaliados por sua pozolanicidade com o cimento, além de outros critérios secundários como cor e suas composições química, física e mineralógica, tal como indicado na FIG. 5.1.

5.2 AVALIAÇÃO DAS CINZAS BENEFICIADAS

Para as avaliações quanto à cor, à composição química e à composição mineralógica não foi levado em conta o tratamento físico, visto que o grau de moagem não interfere nestas características avaliadas.

5.2.1 Quanto à cor

5.2.1.1 Avaliação qualitativa da cor

A FIG. 5.2 apresenta foto de amostras das nove cinzas resultantes da aplicação dos três beneficiamentos em estudo.

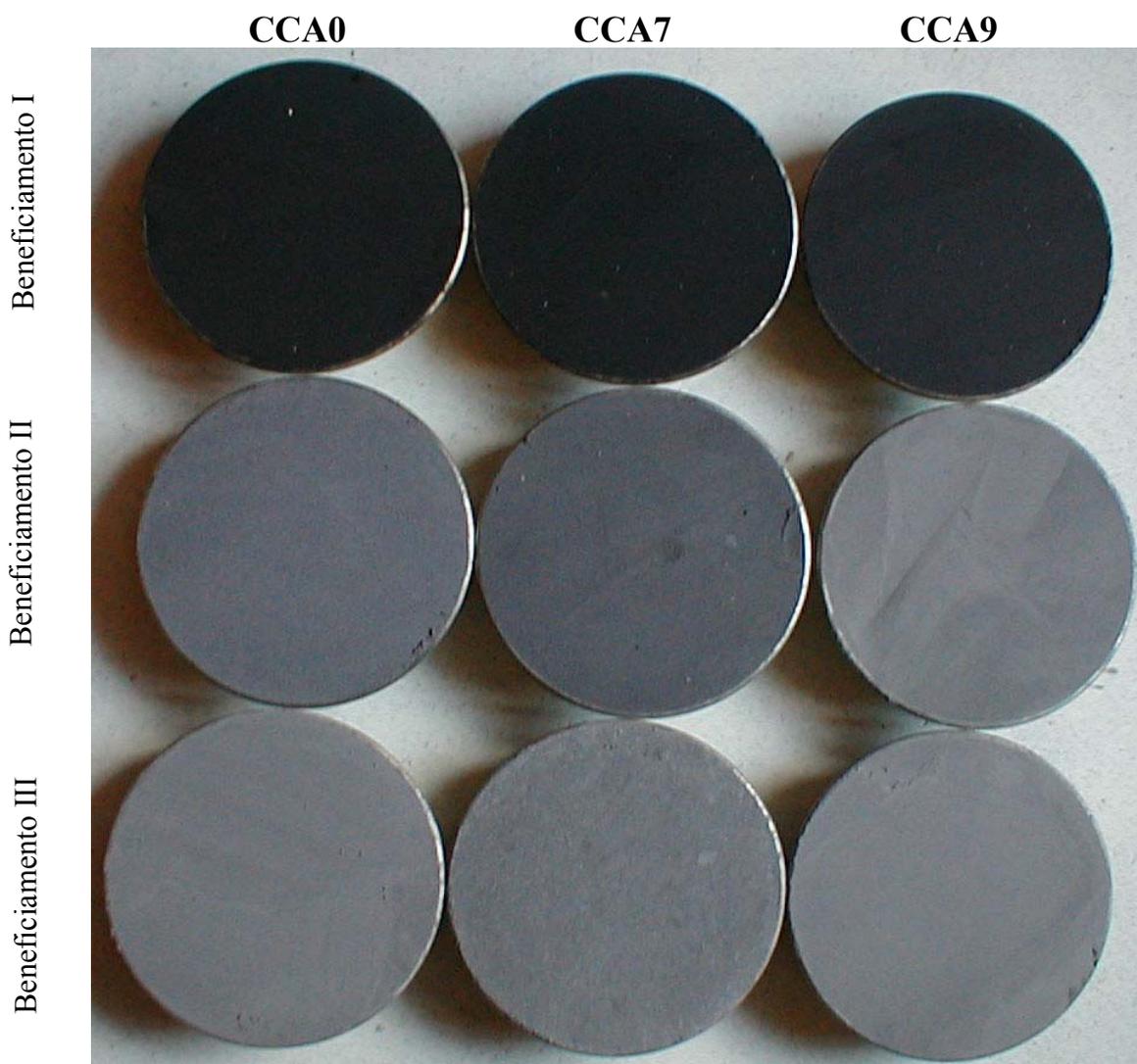


FIGURA 5.2 Amostras de cinzas após beneficiamento

A foto da FIG 5.2 permite fazer uma avaliação qualitativa da cor. Observa-se que há grande diferença de cor entre as amostras de cinzas em submetidas ao beneficiamento I (moagem das CCA, em estado natural) e aquelas submetidas aos beneficiamento II (tratamento térmico seguido de tratamento físico – moagem) e III (tratamento químico seguido pelos tratamentos térmico e físico). No entanto, a diferença entre os beneficiamentos II e III não é tão acentuada, sendo que as cinzas mais claras são aquelas submetidas à sequencia dos três tratamentos (beneficiamento I) . A seguir é feita uma avaliação quantitativa da diferença de cor entre as cinzas beneficiadas.

5.2.1.2 Avaliação colorimétrica no CIE Lab

As medidas colorimétricas foram feitas de acordo com o descrito no 3.3.1.1. Os parâmetros cromáticos obtidos estão apresentados na TAB. 5.1.

TABELA 5.1 Parâmetros cromáticos das cinzas beneficiadas

Cinza	Beneficiamento	L*	a*	b*
CCA0	I	22,56	0,37	0,67
		22,30	0,35	0,74
	II	46,13	0,27	0,68
		45,91	0,28	0,68
	III	51,92	0,41	0,06
		51,83	0,44	0,21
CCA7	I	22,18	0,21	0,49
		22,77	0,18	0,45
	II	39,92	0,38	0,08
		39,91	0,42	0,04
	III	47,36	0,35	0,20
		47,67	0,35	0,07
CCA9	I	25,71	0,26	0,35
		25,95	0,24	0,27
	II	50,08	0,55	0,93
		49,65	0,57	1,02
	III	51,58	0,42	0,59
		51,53	0,45	0,63

Os valores das medições de luminância comprovam a avaliação visual de que as amostras mais claras são resultantes do beneficiamento III (com tratamento químico), seguidas por aquelas submetidas ao beneficiamento II (com tratamento térmico), enquanto as mais escuras são as cinzas com beneficiamento I (CCA em estado natural, moídas).

Analisando estatisticamente os dados de luminância (L^*), através de uma análise fatorial com duas repetições, constata-se que o tipo de cinza e o tipo de tratamentos são fatores significativos, bem como a interação entre eles. A Tabela ANOVA se encontra no Anexo IV.

Por comparação múltipla de médias, através do Teste de Duncan, as cinzas diferem entre si, assim como os tipos de tratamentos, em relação à luminância.

O gráfico da FIG. 5.3 mostra o comportamento da variável luminância de cada cinza em função do tipo de beneficiamento, indicando que a CCA9 é a cinza mais clara e a CCA7 é mais escura, conforme já constatado, tanto visual como estatisticamente. Observa-se também que as cinzas têm comportamentos semelhantes entre si, mesmo diferindo estatisticamente, ou seja crescem com os beneficiamentos I, II e III.

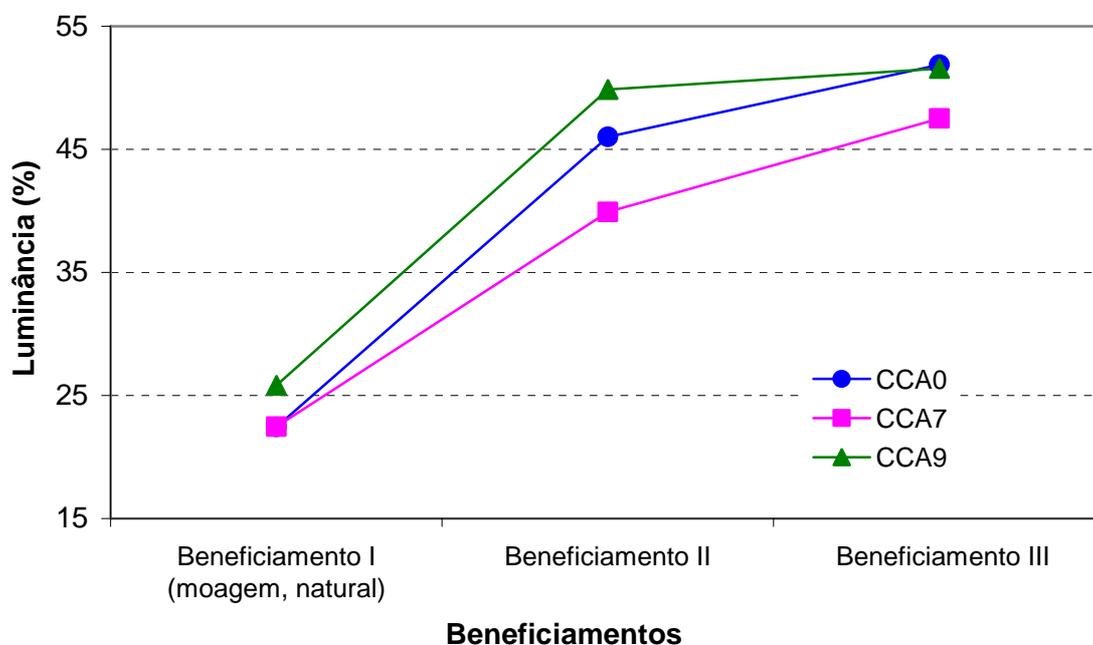


FIGURA 5.3 Comportamento da variável luminância em função do tipo de beneficiamento

No gráfico da FIG. 5.4 está evidenciado o comportamento dos beneficiamentos em função do tipo de cinza, onde se constata que o beneficiamento III (com ataque químico) tem o melhor desempenho, registrando valores de luminância aproximadamente igual ao dobro daqueles obtidos pelas CCA em estado natural (tratamento I). Embora estatisticamente significativa, a diferença entre os beneficiamento II e III não é muito grande, porém, em relação às cinzas em estado natural (beneficiamento I), ambos diferem de forma mais acentuada.

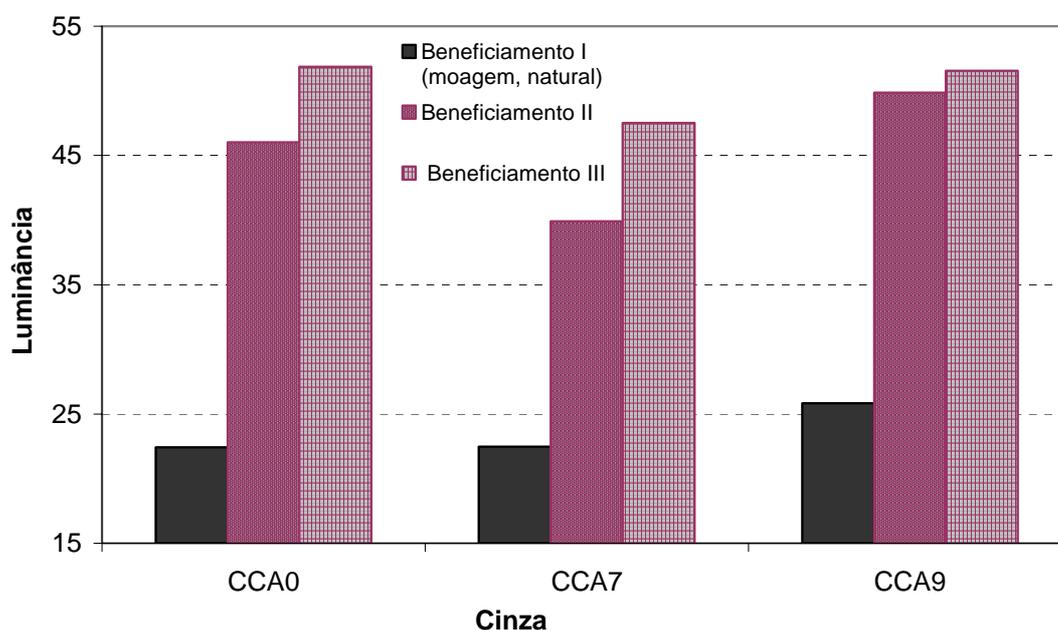


FIGURA 5.4 Comportamento da variável luminância em função do tipo de CCA

5.2.2 Quanto à composição química

As composições químicas das amostras de CCA beneficiadas estão apresentadas na TAB. 5.2. As análises químicas foram realizadas de acordo com item 3.2.

Os dados da TAB. 5.2 permitem avaliar que com o ataque químico do beneficiamento III atingiu os objetivos propostos para aplicação da CCA, ou seja, houve um aumento do teor de sílica, chegando ao valor máximo de 98,24% para a CCA7, e redução dos percentuais de impurezas como o potássio e o fósforo. A cinza CCA0 apresentou a maior redução do percentual de K_2O , passando 2,24 para 0,97%, e de P_2O_5 , passando de 1,21 para 0,31%. Nas cinzas residuais também houve reduções, porém um pouco menores, já que inicialmente os respectivos teores já eram mais baixos.

Em relação ao teor de sílica das amostras, estatisticamente, tanto o tipo de cinza quanto o tipo de beneficiamento são significativos e, para uma mesma CCA, os valores referentes a cada beneficiamento diferem entre si. Os dados da análise estatística estão no Anexo IV.

Quanto ao beneficiamento II, observa-se que as reduções nos teores de impurezas foram mais menores, como ocorreu nas cinzas residuais, em que o teor de K_2O passou de 2,09 para 1,92 % na CCA7 e de 1,79 para 1,62 % na CCA9.

TABELA 5.2 Composição química das CCA beneficiadas

CCA	Beneficiamento	Composição típica em óxidos						
		SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	MnO
CCA0	I	95,078	2,237	0,641	1,207	-	0,367	0,124
	II	94,895	2,168	0,636	1,431	0,143	0,393	0,115
	III	98,048	0,974	0,281	0,310	-	0,274	0,056
CCA7	I	96,061	2,085	0,565	0,557	0,339	0,331	0,062
	II	96,646	1,916	0,566	0,463	-	0,298	0,111
	III	98,240	0,930	0,240	0,176	0,163	0,174	-
CCA9	I	96,432	1,789	0,728	0,610	-	0,283	0,089
	II	96,870	1,617	0,722	0,393	-	0,313	0,085
	III	97,532	1,326	0,597	0,170	-	0,315	0,060

5.2.3 Quanto à composição mineralógica

Para avaliação quanto à composição mineralógica, foram realizadas análises de difração de raios X das amostras beneficiadas. Os resultados estão na TAB. 5.3 e, a fim de ilustrar, também são apresentados em forma de difratogramas.

TABELA 5.3 Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X para as amostras beneficiadas

Amostras	Beneficiamento		
	I	II	III
CCA0	amorfa	amorfa	amorfa
CCA7	crystalita	crystalita	crystalita
CCA9	crystalita	crystalita	crystalita

crystalita = SiO₂

5.2.3.1 Cinza CCA0 – referência

O gráfico da FIG. 5.5 apresenta os difratogramas de raios X das amostras beneficiadas da cinza CCA0, comparativamente com o da cinza em estado natural. Pela observação do gráfico, constata-se que os beneficiamentos II (térmico) e III (químico) não alteram a mineralogia do material, mantendo-o predominantemente amorfo, como era de se esperar.

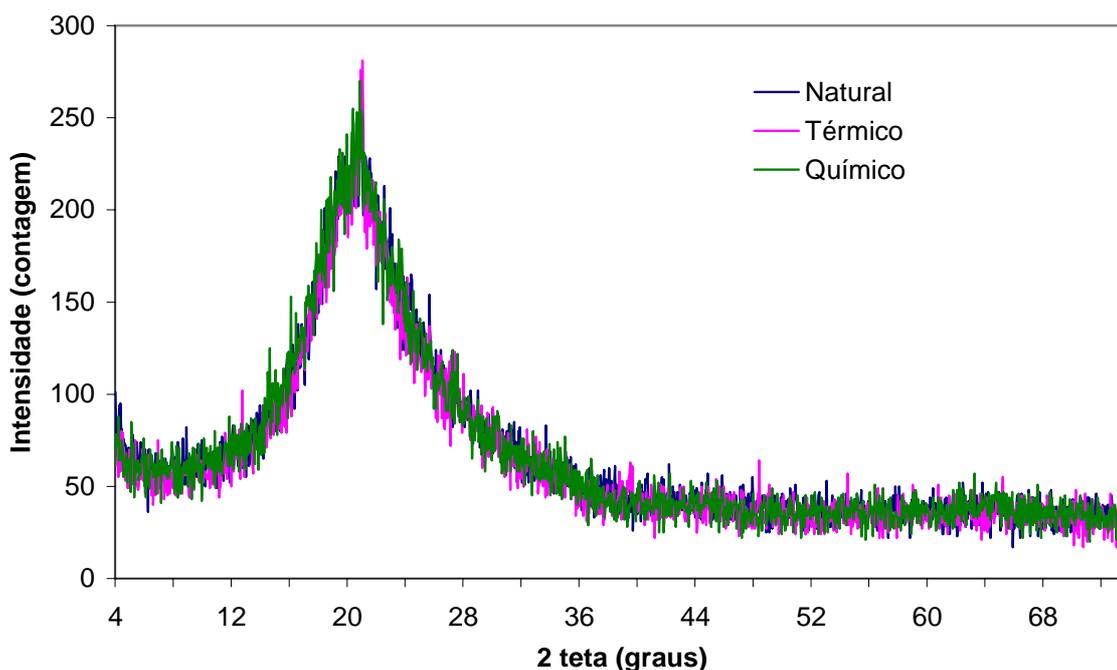


FIGURA 5.5 Difratogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA0

5.2.3.2 Cinza CCA7

Os difratogramas de raios X das amostras beneficiadas da cinza CCA7 estão apresentados, de forma conjunta, no gráfico da FIG. 5.6, onde se constata que não houve surgimento de novos picos com os tratamentos térmico e químico. Todavia, observa-se que há uma intensificação dos picos com o beneficiamento II (térmico) e uma redução destes mesmos picos com o beneficiamento III (químico).

5.2.3.3 Cinza CCA9

A FIG. 5.7 apresenta os difratogramas de raios X de amostras beneficiadas da cinza residual CCA9, comparativamente com o da amostra em estado natural. Nota-se que os beneficiamentos aplicados não alteraram de maneira importante a composição

mineralógica da CCA9, ou seja, não houve surgimento de nenhum novo pico, porém alguns dos existentes tornaram-se mais intensos, o que era esperado, em função dos resultados do Capítulo 4 e da temperatura não ter ultrapassado 600°C.

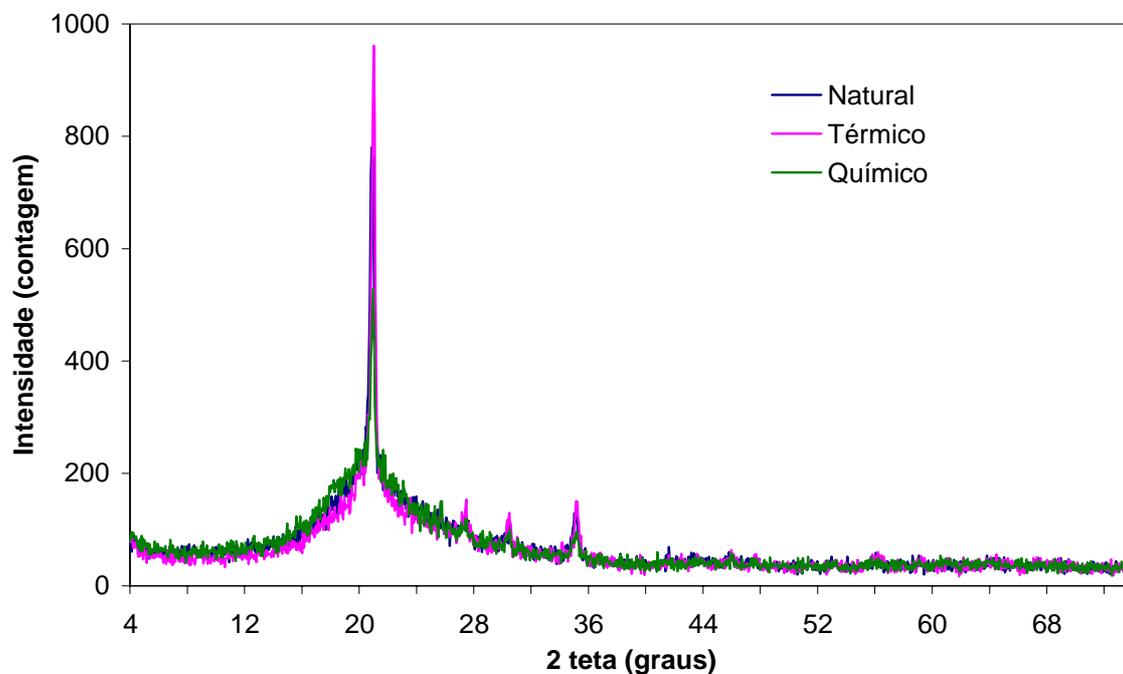


FIGURA 5.6 Difratomogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA7

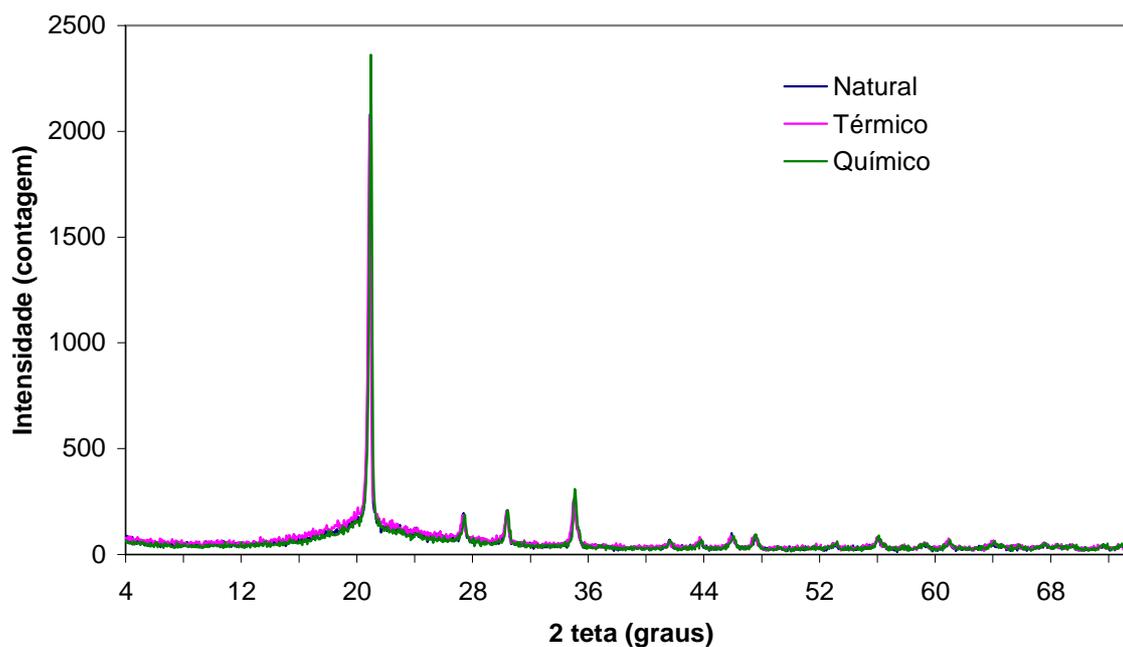


FIGURA 5.7 Difratomogramas de raios X sobrepostos das amostras beneficiadas da CCA9

5.2.4 Quanto à caracterização física

A caracterização física das cinzas beneficiadas, quanto à composição granulométrica, à massa específica e à área superficial, estão apresentadas na TAB. 5.4.

TABELA 5.4 Caracterização física das cinzas beneficiadas

CCA	Beneficiamentos		Propriedade física					
			Massa específica (g/cm ³)	Área superficial (m ² /g)	Composição granulométrica			
	Tratamento Físico	10%			50%	90%	médio	
CCA0	I	Bolas	1,994	33,29	1,69	9,28	27,28	12,45
		Periquito	2,020	35,30	0,91	4,55	16,70	6,79
	II	Bolas	2,050	5,70	5,46	28,76	58,26	30,71
		Periquito	2,135	9,50	1,10	4,89	17,04	7,26
	III	Bolas	2,035	15,30	3,41	17,45	43,09	20,82
		Periquito	2,128	17,50	1,14	5,19	18,36	7,75
CCA7	I	Bolas	1,949	31,26	1,79	9,82	26,09	12,42
		Periquito	2,024	31,20	1,08	4,92	16,01	6,91
	II	Bolas	2,065	7,33	4,58	25,59	55,11	28,15
		Periquito	2,155	9,50	1,26	5,58	20,19	8,62
	III	Bolas	2,105	14,40	3,54	19,20	45,77	22,45
		Periquito	2,182	34,20	1,10	5,03	18,42	7,66
CCA9	I	Bolas	2,074	23,07	1,85	10,44	25,64	12,57
		Periquito	2,076	23,55	0,97	4,60	16,31	6,78
	II	Bolas	2,156	7,75	3,16	18,07	42,69	20,89
		Periquito	2,182	8,89	1,12	4,79	20,88	8,65
	III	Bolas	2,188	12,61	2,59	14,27	36,11	17,21
		Periquito	2,202	14,12	1,05	4,60	16,88	6,94

As FIG. 5.8 e 5.9 apresentam, respectivamente, a variação do diâmetro (50% passante) e da área superficial em relação ao tipo de beneficiamento, nos moinhos de bolas e periquito. Nestas figuras, além dos tipos de beneficiamentos I, II e III já referidos, aparece a identificação “inicial” que corresponde à cinza em estado natural sem ser moída.

A observação dos gráficos da FIG. 5.8 indica que quando é empregado o moinho periquito, o tipo de beneficiamento e o tipo de cinza não influenciam nos valores do diâmetro obtidos. No entanto, quando é empregado o moinho de bolas, os resultados são influenciados tanto pelo tipo de beneficiamento quanto pelo tipo de cinza, ou seja, a energia

aplicada pela rotação mais elevada do moinho periquito elimina as diferenças entre as cinzas e os beneficiamentos, em termos de diâmetro. Tal como foi observado e já comentado no Experimento preliminar II apresentado no item 4.2.8.

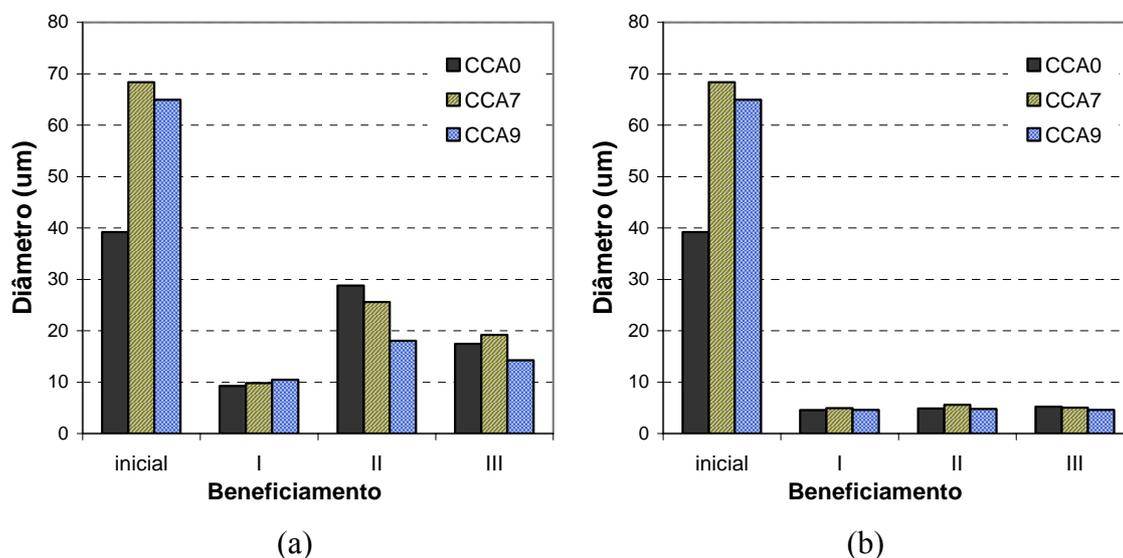


FIGURA 5.8 Variação do diâmetro (50% passante) de cada cinza em função do tipo de beneficiamento – (a) moinho de bolas; (b) moinho periquito

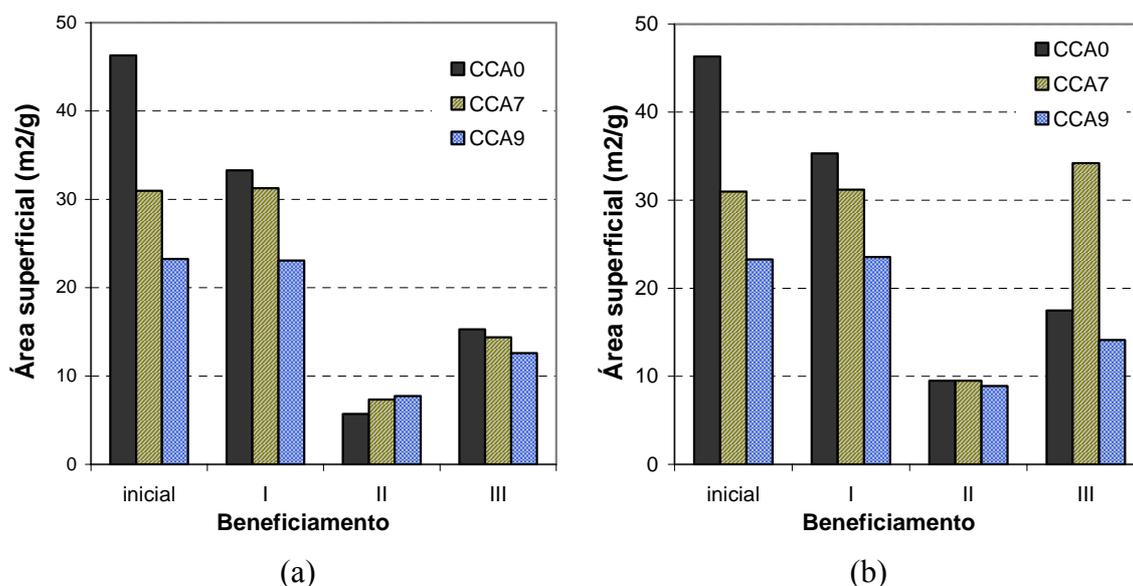


FIGURA 5.9 Variação da área superficial de cada cinza em função do tipo de beneficiamento – (a) moinho de bolas; (b) moinho periquito

Quanto à área superficial, os gráficos da FIG. 5.9 permitem observar o seguinte:

- os beneficiamentos II (térmico) e III (químico) reduziram a área superficial das cinzas, quando comparadas com sua situação inicial, com exceção da CCA7 com beneficiamento III;
- o beneficiamento II (térmico) gerou a maior redução de área superficial. Este comportamento está de acordo com dados apresentados por outros autores, como James e Rao (1986), Weber (2000) e Della (2001), os quais também observaram a redução da área superficial em CCA após serem submetidas a tratamento térmico. Weber registrou, por exemplo, uma redução da área superficial (Blaine) de 1759 m²/kg para 1559 m²/kg em um dos tratamentos testados. Della (2001) constatou uma redução de 177 m²/g para 54 m²/g para uma CCA submetida a uma temperatura de 700°C, por 6 horas. Possivelmente, esta redução ocorre devido ao novo ciclo térmico, pois em função da temperatura e do tempo de exposição pode ter ocasionar um efeito de sinterização incipiente, aglomerando as partículas mais próximas umas das outras e reduzindo a porosidade, além da redução de carbono incombusto que tem alta área superficial;
- o beneficiamento III (químico) também resultou em redução da área superficial, porém menor do que a do beneficiamento II (térmico). Esta diferença pode ser creditada também à possibilidade de uma sinterização incipiente, decorrente de tratamento térmico, ocorrer em CCA que teve sua porosidade aumentada pela retirada de impurezas que se verifica com o banho químico;
- quanto ao beneficiamento I (tratamento físico), constatou-se as cinzas moídas no periquito apresentaram área superficial ligeiramente superior as moídas no moinho de bolas, o que ser explicado por seus diâmetros serem menores. Nas cinzas CCA 7 e CCA9 praticamente não houve alteração da área superficial, após a moagem, independente do moinho empregado e da variação da granulometria. Para a cinza CCA0, houve uma redução da área superficial.;
- os moinhos apresentaram comportamentos semelhantes em função da área superficial, com exceção da CCA7 com tratamento químico e moída no periquito que, estranhamente, apresentou comportamento distinto dos demais;

A grande diferença registrada entre os diâmetros obtidos no moinho de bolas e no moinho periquito não se reproduz, na mesma proporção, em relação à massa específica e à área superficial, conforme pode ser observado nos gráficos das FIG 5.8 e 5.9 e na TAB. 5.4.

Constata-se também que a área superficial não é condicionada de maneira importante pelo tamanho das partículas, pois, embora os comportamentos dos diâmetros tenham sido diferentes entre os moinhos, a área superficial não refletiu esta diferença, mantendo comportamentos semelhantes nos dois moinhos. As alterações na área superficial são decorrentes do tipo de tratamento.

5.2.5 Quanto à pozalanicidade

A metodologia empregada para determinação da pozalanicidade das cinzas beneficiadas foi aquela descrita no item 3.3.2 e é a mesma utilizada no Capítulo 4 – nos itens 4.2.7 e 4.2.8 (experimentos preliminares). Refere-se aos ensaios para determinação do IAP pela NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”.

5.2.5.1 Resultados obtidos

Tanto os resultados obtidos durante a execução dos corpos-de-prova, como água requerida e percentual de aditivo empregado, quanto a resistência à compressão média e o IAP calculado, estão apresentados na TAB. 5.5. A resistência à compressão corresponde à média de três valores obtidos pela ruptura de três corpos-de-prova, aos 28 dias de idade.

Analisando os dados da TAB. 5.5 constata-se que todas as cinzas registraram percentual de água requerida inferior ao limite máximo de 110% (NBR 12653). Portanto, em relação a este critério, são consideradas pozolanas.

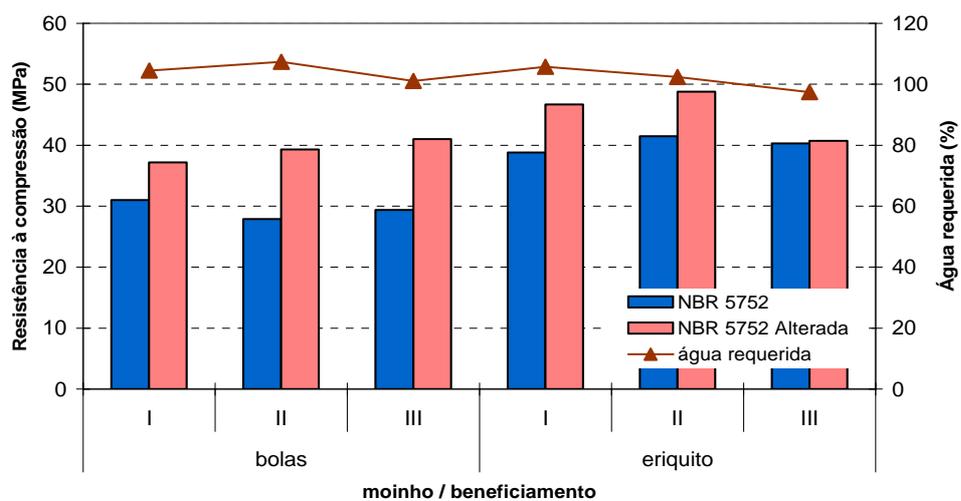
A FIG. 5.10 apresenta graficamente os dados de resistência à compressão pelos métodos da NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada” para cada cinza, comparando-os com os percentuais de água requerida.

TABELA 5.5 Resultados obtidos nos ensaios de pozolanicidade das cinzas beneficiadas: índice de consistência, água requerida, percentual de aditivo, resistência à compressão (**fc**) e índice de atividade pozolânica (**IAP**)

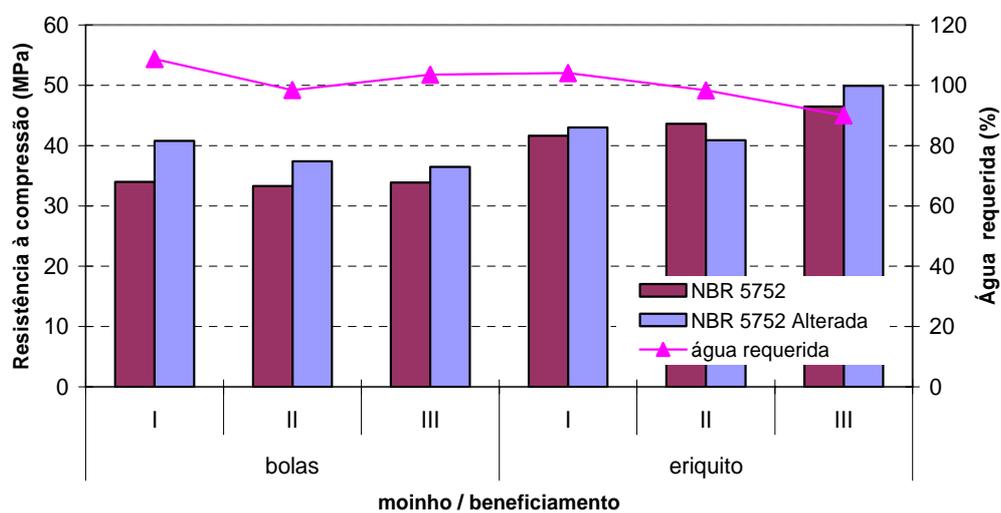
Cinza	Beneficiamento	Moinho	NBR 5752/92				“NBR5752/92 Alterada” Relação água/agl. = 0,553			
			Consistência (mm)	Água requerida (%)	fc (MPa)	IAP (%)	Consistência (mm)	% de aditivo	fc (MPa)	IAP (%)
CCA0	I	Bolas	225	104,5	31,0	79,1	230	0,500	37,2	94,8
		Periquito	227	105,7	38,8	98,9	225	0,450	46,7	119,2
	II	Bolas	230	107,3	27,9	71,2	225	0,399	39,3	100,2
		Periquito	222	102,4	41,5	105,8	230	0,153	48,8	124,5
	III	Bolas	225	101,1	29,4	74,9	225	0,181	41,0	104,7
		Periquito	224	97,4	40,3	102,9	225	0,263	40,7	104,0
CCA7	I	Bolas	230	108,7	34,0	86,7	230	0,232	40,8	104,1
		Periquito	230	104,1	41,6	106,0	225	0,207	43,0	109,8
	II	Bolas	225	98,4	33,3	84,9	223	0,150	37,4	95,5
		Periquito	220	98,3	43,6	111,3	230	0,120	40,9	104,5
	III	Bolas	230	103,5	33,9	86,6	220	0,279	36,5	93,0
		Periquito	220	90,0	46,5	118,7	230	0,170	49,9	127,2
CCA9	I	Bolas	230	104,8	27,5	70,3	228	0,330	32,3	82,5
		Periquito	220	99,3	29,4	75,0	220	0,200	37,1	94,8
	II	Bolas	225	101,5	31,4	80,1	228	0,155	33,7	86,1
		Periquito	225	101,4	37,8	96,4	230	0,130	37,7	96,2
	III	Bolas	225	101,5	31,7	80,9	228	0,139	34,4	87,7
		Periquito	230	102,8	38,8	99,0	230	0,164	38,1	97,2
REFERÊNCIA			225	100,0	39,2	100	225	0,0	39,2	100

Quanto ao IAP, quando considerado o ensaio da norma NBR 5752/92, três cinzas não atingiram índice mínimo de 75%. São elas: CCA0 quando submetida aos beneficiamentos II e III e moída em moinho de bolas; CCA9, em estado natural, moída, no moinho de bolas. Tais percentuais estão destacados na TAB. 5.5. No ensaio da “NBR 5752/92 Alterada”, todas as cinzas atingem IAP maior que 75%.

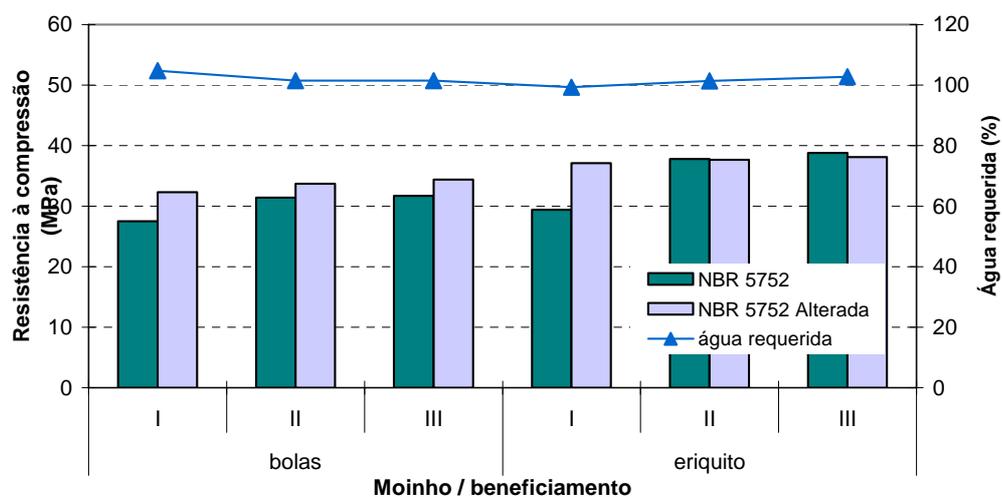
A cinza CCA7 submetida ao beneficiamento III/ periquito foi a que registrou os maiores IAP, tanto pela NBR 5752/92 (118,7%), como pela “NBR 5752/92 Alterada” (127,2%). Cabe observar que esta cinza também registrou o mais elevado teor de sílica (98,24%) e a maior área superficial (34,2 m²/g) entre as amostras beneficiadas, cujo valor, conforme comentado anteriormente, não seguiu o comportamento das demais. No entanto, o seu diâmetro (D_{50%}) não é o menor (5,03 μm) entre as amostras.



(a) CCA0



(b) CCA7



(c) CCA9

FIGURA 5.10 Resistência à compressão pela NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada” e água requerida

5.2.5.2 Análise dos dados

A FIG. 5.11 apresenta gráfico do comportamento da resistência à compressão das cinzas em função do tipo de beneficiamento, nos moinhos de bolas e periquito, para ensaios executados de acordo com as normas NBR 5752/95 e NBR 7215.

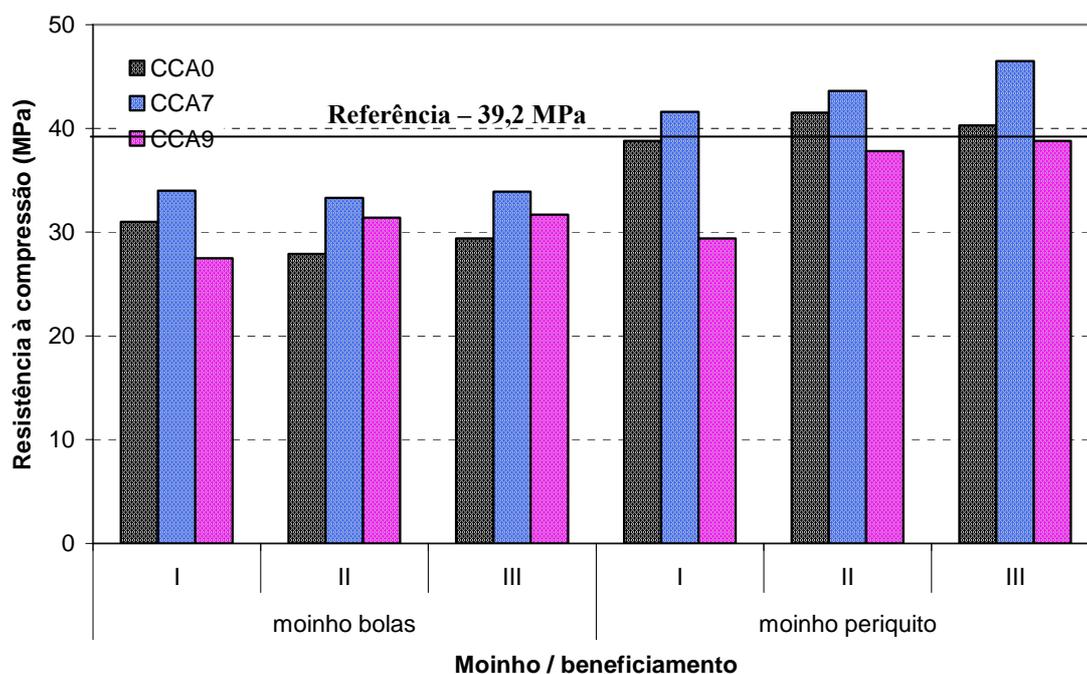


FIGURA 5.11 Variação da resistência à compressão das cinzas CCA0, CCA 7 e CCA9, em função do tipo de beneficiamento e tipo de moinho

O gráfico da FIG. 5.11 evidencia o comportamento diferenciado entre as cinzas, mostrando que a cinza residual CCA7 teve o melhor desempenho em termos de resistência à compressão, independente do tipo de beneficiamento ou tipo de moinho empregado. Nota-se também que a cinza residual CCA9 foi a que lucrou maiores acréscimos de resistência com os beneficiamentos II e III, chegando a atingir 56% e 61%, quando feita comparação entre os beneficiamentos I e II, e I e III, respectivamente, e quando empregado o moinho periquito. As cinzas CCA7 e CCA0 não apresentaram comportamento regular em relação à interação tratamento e moinho: Para a CCA7 só houve aumento de resistência com os diferentes tratamentos quando moída no periquito, ou seja, com granulometria menor. Já a cinza CCA0, ora teve redução no valor da resistência,

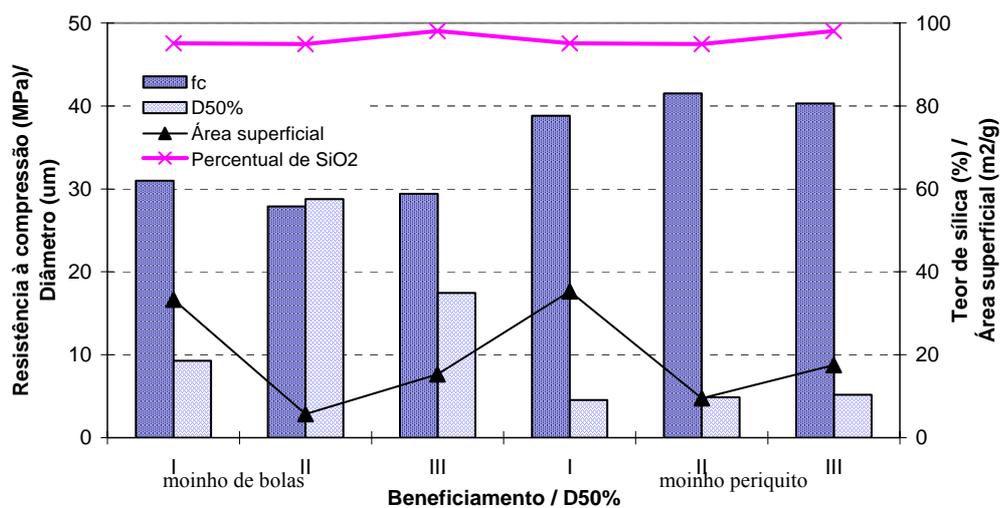
quando empregado o moinho de bolas e ora, acréscimos, quando empregado o moinho periquito.

Face a este comportamento inesperado, a questão passa a ser a seguinte: a influência é da granulometria, da área superficial ou da ação do tipo de tratamento sobre o tipo de cinza? Neste sentido, cabe observar o gráfico da FIG. 5.8, onde fica claro que, no caso do moinho periquito, a granulometria obtida independe do tipo de beneficiamento e do tipo de cinza, portanto as variações verificadas no comportamento da resistência de cada cinza são devidas ao beneficiamento e/ou à área superficial. Já no caso do moinho de bolas, estes gráficos mostram que há influência do tipo de beneficiamento sobre o resultado obtido na moagem de cada cinza e, portanto, o comportamento da resistência é resultado da interação do tipo de beneficiamento com o tipo de cinza e com o processo de moagem deste equipamento.

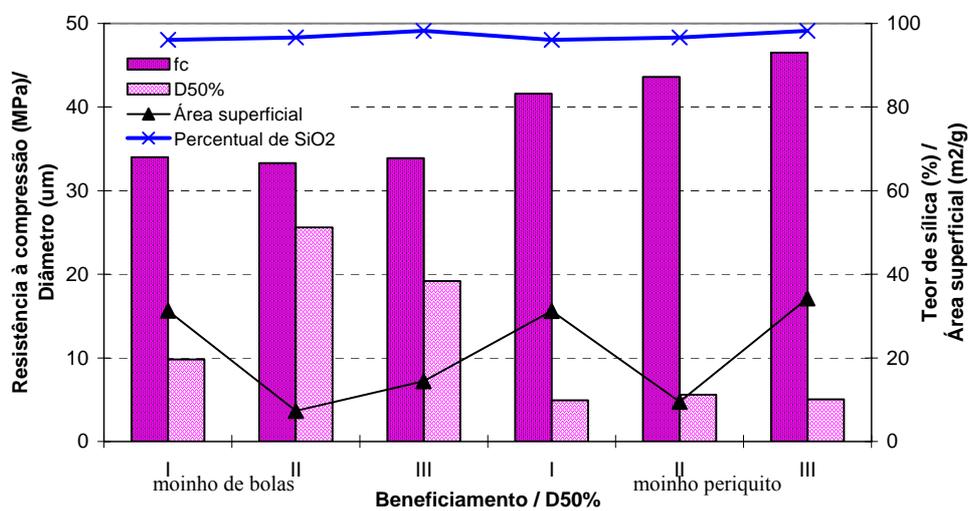
A FIG. 5.12 apresenta gráficos das três cinzas, onde estão comparados os comportamentos de resistência à compressão com os de algumas de suas características físicas, como diâmetro ($D_{50\%}$), área superficial e percentual de sílica. O cruzamento destes dados tem o objetivo de identificar relacionamento entre os comportamentos.

Os gráficos da FIG. 5.12 evidenciam a influência da granulometria na resistência à compressão. A moagem no moinho periquito resultou em diâmetros ($D_{50\%}$) em torno de 5 μm para as três cinzas, independente do tipo de beneficiamento, e a resistência à compressão destas cinzas foram sempre superiores aquelas obtidas com CCA processadas no moinho de bolas, cujos diâmetros, em geral, foram bem superiores à 10 μm .

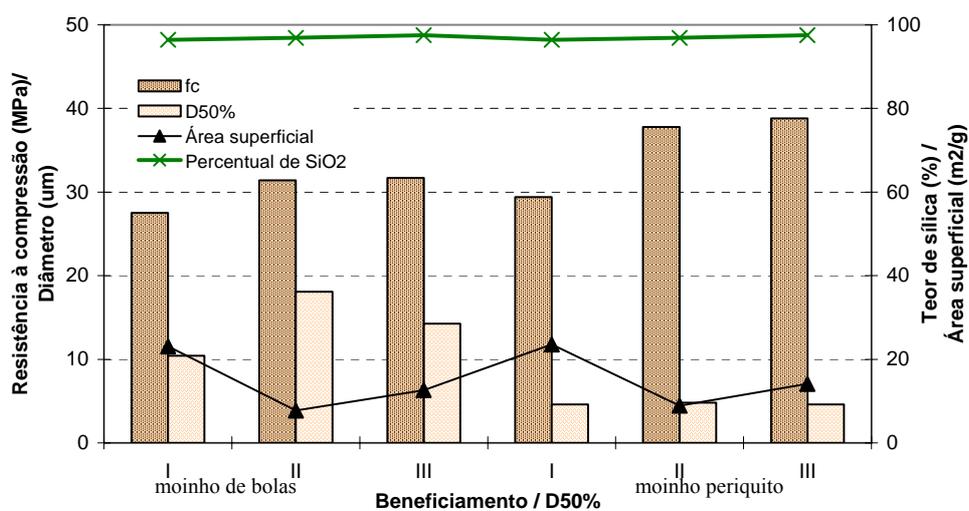
Analisando os dados referentes ao moinho de bolas, ou seja, o comportamento de cinzas com diâmetro ($D_{50\%}$) a partir de 10 μm , não fica evidente a influência do tamanho das partículas. Por exemplo, comparando os beneficiamentos I e II das três CCA, houve aumento do diâmetro e do teor de sílica, redução da área superficial e a resposta em termos de resistência foi variável com o tipo de cinza, ou seja, sofreu redução na CCA0, ficou estável na CCA7 e aumentou na CCA9. Neste caso, a água requerida é o provável fator influente na resposta, pois interfere de maneira importante na resistência à compressão e, portanto, no IAP.



(a) CCA0



(b) CCA7



(c) CCA9

FIGURA 5.12 Comportamento da resistência à compressão, aos 28 dias, confrontado com propriedades físicas das cinzas: (a) CCA0; (b) CCA7; (c) CCA9

Analisando os dados referentes ao moinho periquito, constata-se que a diferença de comportamento de resistência à compressão entre as cinzas é função de outras propriedades que não a granulometria, já que esta se tornou uniforme (em torno de 5 μm). Estas diferenças podem ser atribuídas a outras características da CCA, como composição mineralógica, área superficial, teor de SiO_2 e a água requerida. A CCA9 foi a cinza que apresentou o pior desempenho, sendo também a cinza mais cristalina e a que apresentou, na média, a mais baixa área superficial. A CCA7 e a CC0 apresentaram comportamentos semelhantes, no entanto, a CCA7 apresentou resistências mais elevadas, sempre associada à área superficial ou ao teor de SiO_2 mais elevados também e menor demanda de água:

no beneficiamento I – maior teor de sílica (96,06% > 95,08%), menor área superficial (31,2 m^2/g < 33,29 m^2/g) e menor percentual de água requerida (104,1% < 105,7% - TAB. 5.5) ;

- no beneficiamento II – maior teor de sílica (96,65% > 94,90%), igual área superficial (9,5 m^2/g) e menor percentual de água requerida (98,3% < 102,4%);
- no beneficiamento III - maior teor de sílica (98,24% > 98,05%), maior área superficial (34,2 > 17,5) e menor percentual de água requerida (90,0% < 97,4%).
- Todos estes fatores justificam o melhor desempenho da CCA7, embora não seja uma cinza predominantemente amorfa como a CCA0.

Também é possível observar nos gráficos da FIG. 5.12 que as propriedades como área superficial e diâmetro, embora variando de maneira acentuada, não se refletem visivelmente nas linhas de comportamento da resistência à compressão, possivelmente porque sua influência fique mascarada por outro fator e/ou a interação entre eles.

5.2.5.3 Análise estatística dos dados

a) Água requerida

A realização de uma análise fatorial indicou que todos os fatores considerados – tipo de cinza; tipo de tratamento e tipo de moinho – são significativos, bem como a interação entre eles. A tabela ANOVA se encontra no Anexo IV.

Os dados estatísticos revelam o que se segue:

- quanto à influência isolada do tipo de cinzas: a CCA0 foi a que apresentou maior percentual de água requerida (103,1%) e a CCA7, o menor (100,5%);
- quanto à influência isolada do tipo de beneficiamento: o beneficiamento I (só tratamento físico - moagem) foi o que registrou maior percentual de água requerida (104,5%) e o III (químico), o menor (99,4%), sendo o único com média inferior a 100%;
- quanto à influência isolada do tipo de moinho: o moinho de bolas assinalou 103,5%, enquanto o periquito, 100,1%, refletindo as diferentes granulometrias obtidas;
- quanto às interações: todas são significativas, indicando que a alteração em um dos fatores se reflete no comportamento dos demais;
- quanto aos percentuais de aditivo empregados, o comportamento foi semelhante ao da água requerida, refletindo esta demanda, ou seja, a cinza CCA0 (0,324%), o beneficiamento I (0,319%) e o moinho de bolas (0,263%) foram os que apresentaram valores percentuais médios mais elevados.

b) Resistência à compressão e Índice de atividade pozolânica - IAP

Para os resultados dos ensaios pela NBR 5752/92, a análise estatística dos dados indica que os três fatores - tipo de cinza, tipo de tratamento e tipo de moinho - são significativos, bem como as interações entre os fatores dois a dois. A interação tripla entre os fatores não é significativa. A tabela ANOVA se encontra no Anexo IV.

Já para a “NBR 5752 Alterada”, o fator B - tipo de tratamento - não é significativo, bem como a interação entre ele e o fator C - tipo de moinho. Os fatores A - tipo de cinza e B - tipo de moinho - são significativos e as demais interações também.

Na análise geral dos dados, a cinza residual CCA7, o beneficiamento III e o moinho periquito apresentaram os melhores resultados, enquanto a cinza CCA9 e o beneficiamento I, os piores.

- **Influência isolada do tipo de cinza no IAP**

A FIG. 5.13 apresenta gráfico da influência isolada do tipo de cinza nos IAP determinados pela NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”.

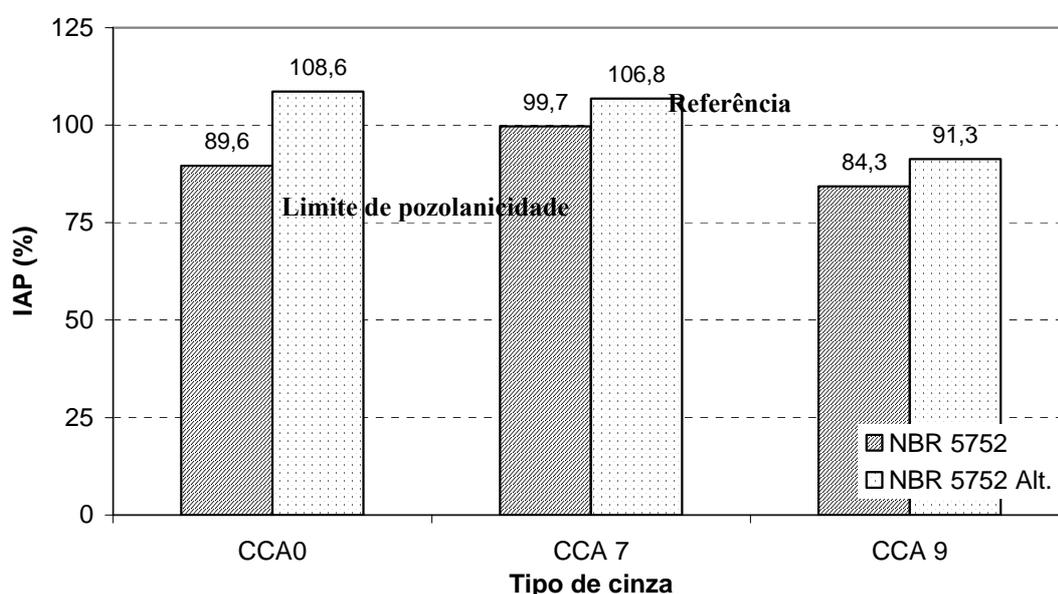


FIGURA 5.13 Influência isolada do tipo de cinza nos IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”

Por comparação múltipla de médias (Teste de Duncan), constata-se que as cinzas se diferenciam entre si, quando considerados os resultados pela NBR 5752. Já para os resultados pela “NBR 5752 Alterada”, as cinzas CCA0 e CCA7 não se diferenciam.

A cinza CCA7 foi a que apresentou melhor resultado, quando considerado o ensaio pela NBR 5752. Isto se justifica, principalmente por ter apresentado o mais baixo percentual de água requerida entre as demais. Já a CCA0, embora predominantemente amorfa, apresentou resultados inferiores certamente devido ao seu elevado percentual de água requerida. A consideração do percentual de água requerida é importante, pois, é sabido que a resistência à compressão de uma pasta é influenciada pela sua porosidade e esta, pela relação água/aglomerante empregada.

Quando são analisados os resultados pela “NBR 5752 Alterada” fica evidente a influência do percentual de água requerida, pois quando tornado constante, a CCA0, a cinza mais amorfa, foi a que apresentou melhor desempenho, embora estatisticamente não apresente difira de forma significativa da CCA7.

- **Influência isolada do tipo de beneficiamento no IAP**

O fator tipo de beneficiamento só é significativo quando considerados os resultados pela NBR 5752/92, cuja influência isolada no IAP está apresentada no gráfico da FIG. 5.14.

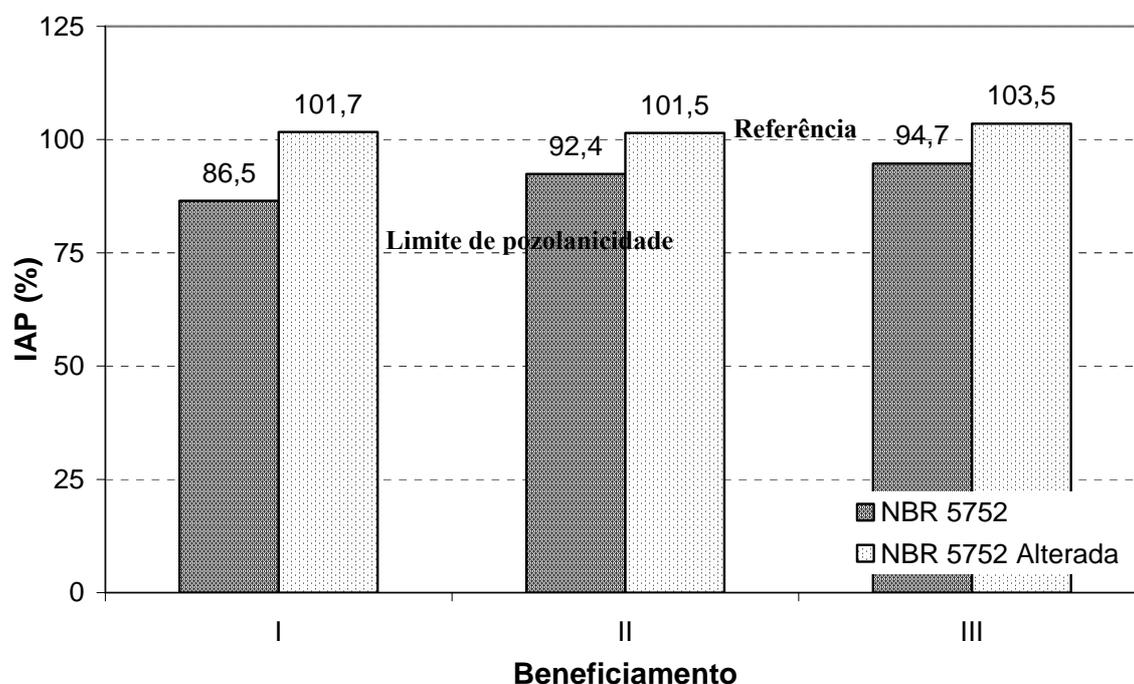


FIGURA 5.14 Influência isolada do tipo de tratamento nos IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”

O gráfico da FIG. 5.14 mostra que o beneficiamento III (químico) apresentou o melhor resultado em termos de IAP, enquanto o I (físico), o pior, quando considerados os resultados pela NBR 5752. É importante observar que além de clarear as cinzas, os beneficiamentos II e III não tiveram seus desempenhos, quanto à pozolanicidade, afetado.

A comparação múltipla de médias, pelo Teste de Duncan, indica que os beneficiamentos I, II e III diferem entre si, quando determinados pelo ensaio da NBR 5752. Tabela com dados estatísticos é apresentada no Anexo IV. Já em relação ao ensaio da “NBR 5752 Alterada, os tipos de beneficiamento não diferem entre si, pois este fator não é significativo.

A confrontação dos dados de IAP (NBR 5752) do gráfico da FIG. 5.14 com os de água requerida mostra que há comportamento inverso entre eles, ou seja, o valor de IAP cresce do beneficiamento I para o III, enquanto o percentual de água requerida diminui. Assim, constata-se as observações feitas por Gava (1999), Weber (2001) e Rêgo (2004) de que o valor do IAP é fortemente influenciado pelo percentual água/aglomerante, distorcendo os resultados. Tanto, que, quando a relação água/aglomerante é a mesma (“NBR 5752 Alterada”), o fator tipo de tratamento deixa de ser significante, pois os valores de IAP passam a ser muito próximos.

- **Influência isolada do tipo de moinho no IAP**

A influência isolada do tipo de moinho no IAP é apresentada no gráfico da FIG. 5.15.

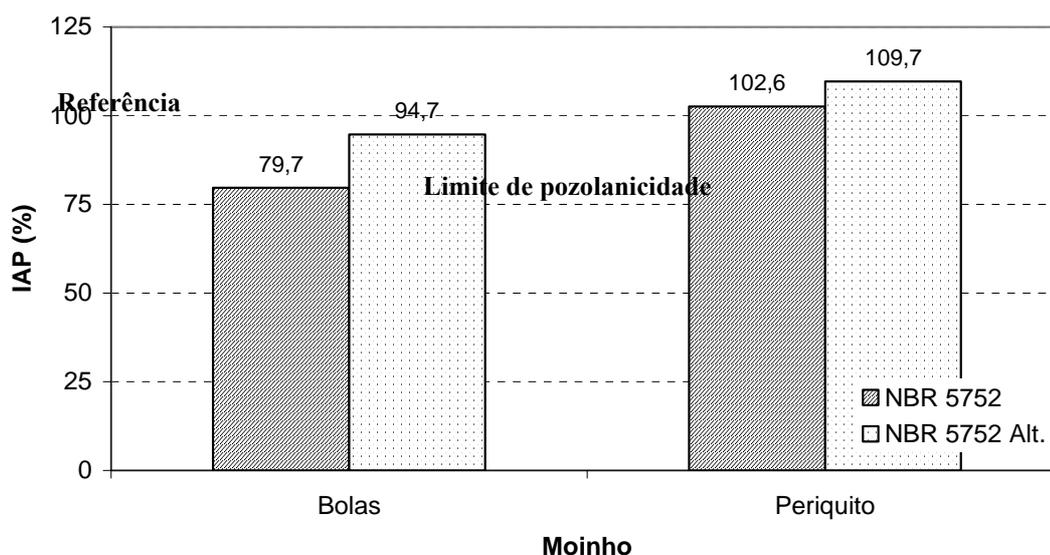


FIGURA 5.15 Influência isolada do tipo de moinho no IAP, segundo NBR 5752 e “NBR 5752 Alterada”

As CCA obtidas a partir de moagem no moinho periquito foram as que apresentaram melhor desempenho. A comparação múltipla de médias, através do Teste de Duncan, indica que os moinhos diferem entre si de maneira significativa, independente do método de ensaio empregado. Tabela com dados estatísticos consta no Anexo IV.

Este resultado é coerente e esperado, visto que os diâmetros ($D_{50\%}$) obtidos em cada moinho são muito diferentes.

- Interação entre o tipo de cinza e o tipo de beneficiamento no IAP

A interação entre o tipo de cinza e o tipo de beneficiamento é apresentada no gráfico da FIG. 5.16. É uma interação significativa, indicando que, dependendo do tipo de cinza, os beneficiamentos têm resposta diferenciada entre si.

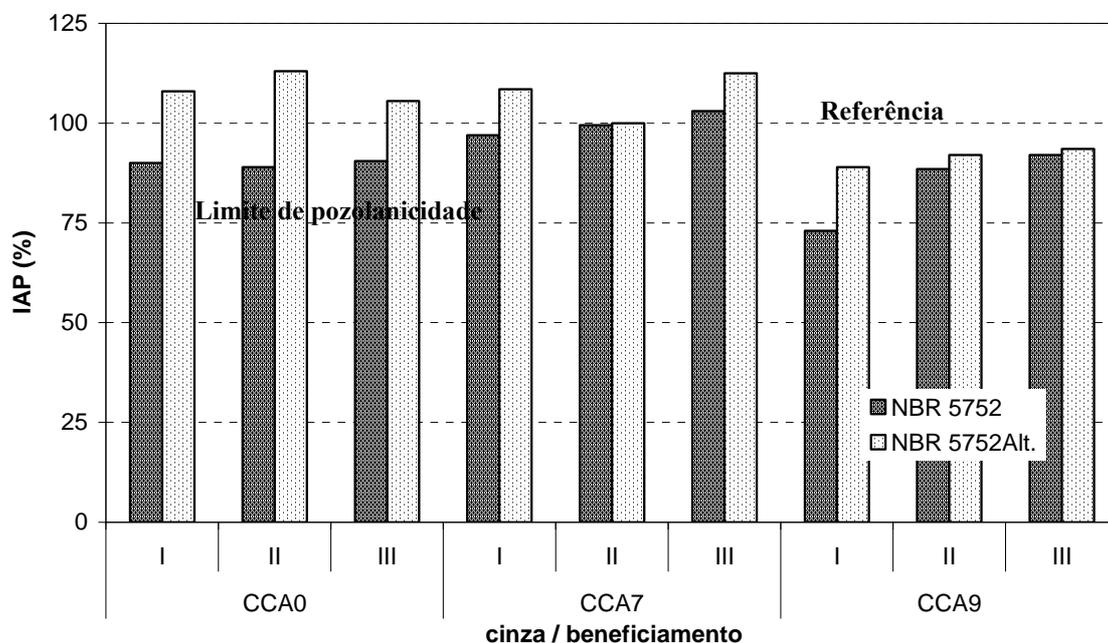


FIGURA 5.16 Interação do tipo de cinza com o tipo de beneficiamento

- Interação entre o tipo de cinza e o tipo de moinho no IAP

O gráfico da FIG. 5.17 apresenta gráfico da interação entre o tipo de cinza e o tipo de moinho. Também é uma interação significativa para os resultados dos dois ensaios, ou seja, dependendo do tipo de cinza, o tipo de moinho atua de forma diferenciada, podendo ser mais ou menos eficiente na moagem e, conseqüentemente, no IAP.

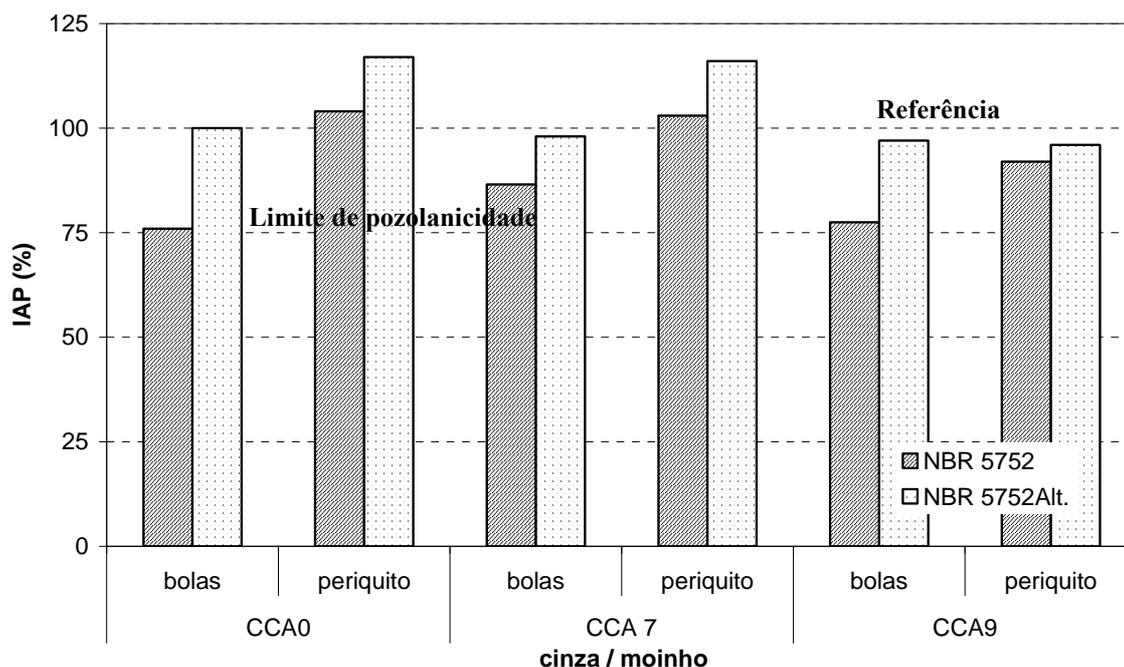


FIGURA 5.17 Interação entre o tipo de cinza e o tipo de moinho

- Interação entre o tipo de beneficiamento e o tipo de moinho no IAP

A FIG. 5.18 apresenta gráfico da interação entre o tipo de beneficiamento e o tipo de moinho.

Esta interação só é significativa para os resultados dos ensaios de acordo com a NBR 5752. O desempenho dos moinhos tem comportamento diferenciado conforme o tipo de tratamento, o que justifica a interação ser significativa. O moinho periquito tem um desempenho melhor com os beneficiamentos II e III.

No gráfico da FIG. 5.18 fica constatado a semelhança entre os resultados obtidos pela “NBR 5752 Alterada”, motivo pelo qual, esta não é uma interação significativa.

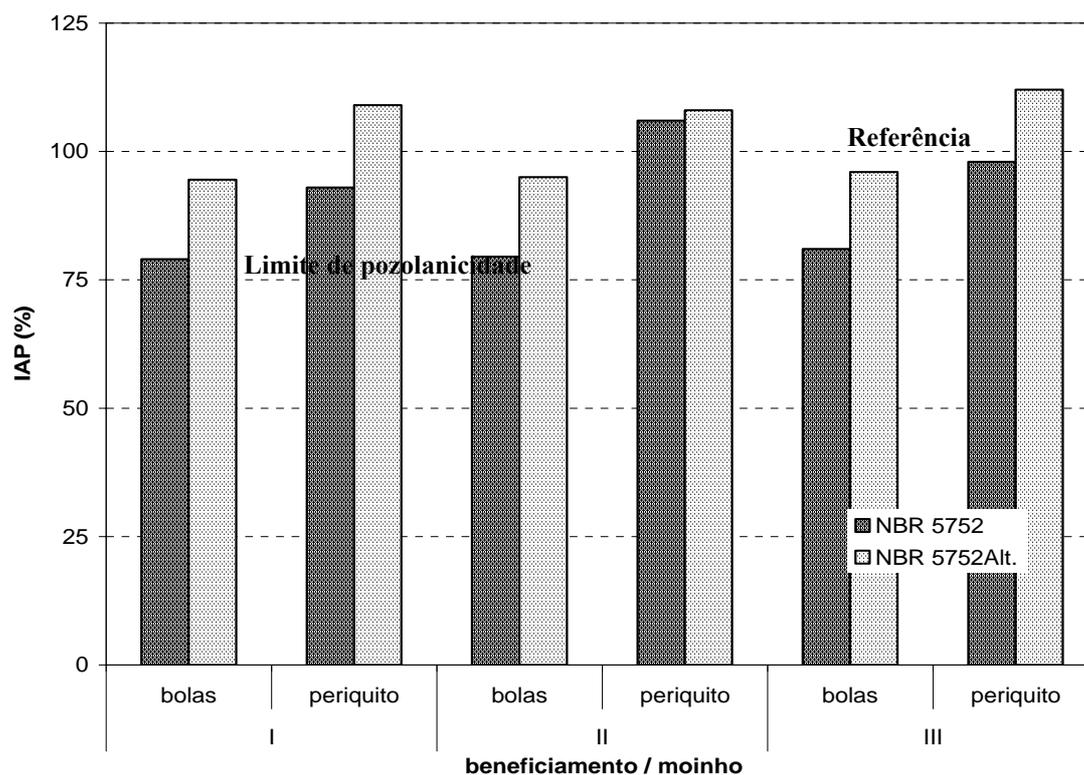


FIGURA 5.18 Interação do tipo de beneficiamento com o tipo de moinho

5.2.5.4 Discussão dos dados

Qingge *et al.* (2004), empregando o método de Lúxan, constataram o aumento da pozolanicidade de cinzas oriundas de casca de arroz tratada com HCl, quando comparadas com cinzas provenientes de casca sem tratamento químico, bem como o aumento da resistência à compressão, em torno de 8% para corpos-de-prova em argamassas com 10 % de CCA, ensaiados aos 28 dias de idade.

Embora o presente trabalho difira de Qingge *et al.* (2004), pois aborda o efeito do banho químico na CCA e não na casca, constatou-se também um aumento da pozolanicidade entre as cinzas com beneficiamento I e III, através do IAP pelo método da NBR 5752. Quanto à resistência à compressão, na média, também se verificou aumento, porém um pouco mais elevado, na ordem de 14,5%. Cabe salientar que estes valores indicam tendências, não sendo possível compará-los já que há muitas diferenças entre os experimentos, inclusive o percentual de CCA empregado.

5.2.6 Conclusões sobre o beneficiamento das CCA

Os resultados dos ensaios realizados com as cinzas beneficiadas permitem concluir que:

- Considerando os tempos de moagem estudados, em termos de redução da granulometria das CCA, a energia aplicada pela rotação do moinho periquito eliminou as diferenças entre os tipos de cinzas e de beneficiamentos; no moinho de bolas estes fatores se refletiram no resultado dos diâmetros obtidos;
- os beneficiamentos aplicados não alteram a composição mineralógica das cinzas, mas alteram sua área superficial;
- as 18 amostras analisadas registraram percentual de água requerida dentro do limite estabelecido pela NBR 12653/92, sendo, portanto, consideradas pozolanas em relação a este requisito;
- os fatores tipo de cinza, tipo de beneficiamento e tipo de moinho são significativos em relação à resistência à compressão determinada pela NBR 5752/92 e ao percentual de água requerida, bem como a interação entre eles. Todos os níveis destes fatores, em relação à resistência à compressão, diferem entre si;
- três das cinzas beneficiadas não atingiram IAP superior a 75%, quando este índice foi determinado pela NBR 5752/92. São elas: CCA0, tratamento II, moinho de bolas; CCA0, tratamento III, moinho de bolas; CCA9, tratamento I, moinho de bolas;
- o fator tipo de beneficiamento não é significativo em relação à resistência à compressão determinada pela “NBR 5752/92 Alterada”, assim como a interação entre ele e o fator tipo de moinho. Os fatores tipo de cinza e tipo de moinho são significativos e seus respectivos níveis diferem entre si;
- todas as cinzas beneficiadas atingiram $IAP \geq 75\%$, quando este índice foi determinado pela “NBR 5752/92 Alterada”;
- a cinza CCA7 foi a que registrou maior resistência à compressão, seguida pela CCA0 e pela CCA9;
- o beneficiamento III foi o que assinalou maior resistência à compressão, seguido pelo II e com menores valores, o I;

- o moinho periquito registrou melhor desempenho do que o moinho de bolas;
- todas as amostras de cinzas beneficiadas que foram testadas em relação ao IAP com o cimento, cujos resultados estão apresentados neste capítulo, foram aprovadas em pelo menos um dos dois ensaios realizados, ou seja, atingiram $IAP \geq 75\%$. Conseqüentemente, todas foram empregadas na confecção dos cimentos avaliados, assunto do Capítulo 6 que se segue.

CAPÍTULO 6

6 CIMENTOS COM CCA BENEFICIADA

Para a produção dos cimentos, após a realização das operações de beneficiamento, foram feitas as misturas de cada uma das cinzas - CCA0, CCA7 e CCA9 - com o cimento CP V - ARI, nos percentuais de substituição de 6%, 10%, 15%, 33% e 50%, estabelecidos no item 3.1.3. Foram produzidos 90 cimentos diferentes, resultantes da combinação do número de cinzas (3), com o de beneficiamentos (6) e com o de percentuais de substituição (5). Em função do elevado número de cimentos produzidos foi dada a identificação apresentada na TAB. 6.1. Além destes cimentos, foi avaliado o cimento de referência, sem adição de cinza, ou seja, somente CP V – ARI, já caracterizado no item 3.2.3. A FIG. 6.1 apresenta foto com amostras de todos os cimentos produzidos com CCA beneficiada e o cimento de referência.

Após a pesagem e mistura dos materiais, o cimento produzido foi homogeneizado no moinho de bolas por meia hora, sem corpos moedores.

Conforme o Programa Experimental deste trabalho, os cimentos foram avaliados em quatro propriedades mecânicas e físicas entre aquelas estabelecidas como obrigatórias nas normas – NBR11578/91 – Cimento Portland composto e NBR 5736/91 – Cimento Portland pozolânico. Os dados obtidos nos ensaios e a avaliação de cada uma destas propriedades passam a ser apresentados a seguir e, posteriormente, são apresentados quadros-resumo de cada cimento, com os respectivos dados e classificação.

TABELA 6.1 Identificação dos cimentos produzidos a partir de substituição por CCA beneficiada

Beneficiamento da CCA		Percentual substituição (%)	Cinza de Casca de Arroz - CCA		
			CCA 0	CCA 7	CCA 9
			Cimentos C1 a C 30	Cimentos C31 a C 60	Cimentos C61 a C 90
I	moinho de bolas	6	C 1	C 31	C 61
		10	C 2	C 32	C 62
		15	C 3	C 33	C 63
		33	C 4	C 34	C 64
		50	C 5	C 35	C 65
	moinho periquito	6	C 6	C 36	C 66
		10	C 7	C 37	C 67
		15	C 8	C 38	C 68
		33	C 9	C 39	C 69
		50	C 10	C 40	C 70
II	moinho de bolas	6	C 11	C 41	C 71
		10	C 12	C 42	C 72
		15	C 13	C 43	C 73
		33	C 14	C 44	C 74
		50	C 15	C 45	C 75
	moinho periquito	6	C 16	C 46	C 76
		10	C 17	C 47	C 77
		15	C 18	C 48	C 78
		33	C 19	C 49	C 79
		50	C 20	C 50	C 80
III	moinho de bolas	6	C 21	C 51	C 81
		10	C 22	C 52	C 82
		15	C 23	C 53	C 83
		33	C 24	C 54	C 84
		50	C 25	C 55	C 85
	moinho periquito	6	C 26	C 56	C 86
		10	C 27	C 57	C 87
		15	C 28	C 58	C 88
		33	C 29	C 59	C 89
		50	C 30	C 60	C 90

A foto da FIG. 6.1 mostra que os cimentos produzidos com as cinzas com beneficiamento I (moagem, em estado natural) são os mais escuros e que, quanto maior o percentual de substituição, mais escuro resulta o cimento. Quando são empregadas as cinzas submetidas aos beneficiamento II e II, os cimentos apresentam coloração próxima a do cimento de referência, não havendo grandes distinções, mesmo quando o percentual de substituição foi de 50%. Para baixos percentuais de substituição, até 15 %, a alteração na cor não é importante, mesmo quando são empregadas as cinzas submetidas ao beneficiamento I.

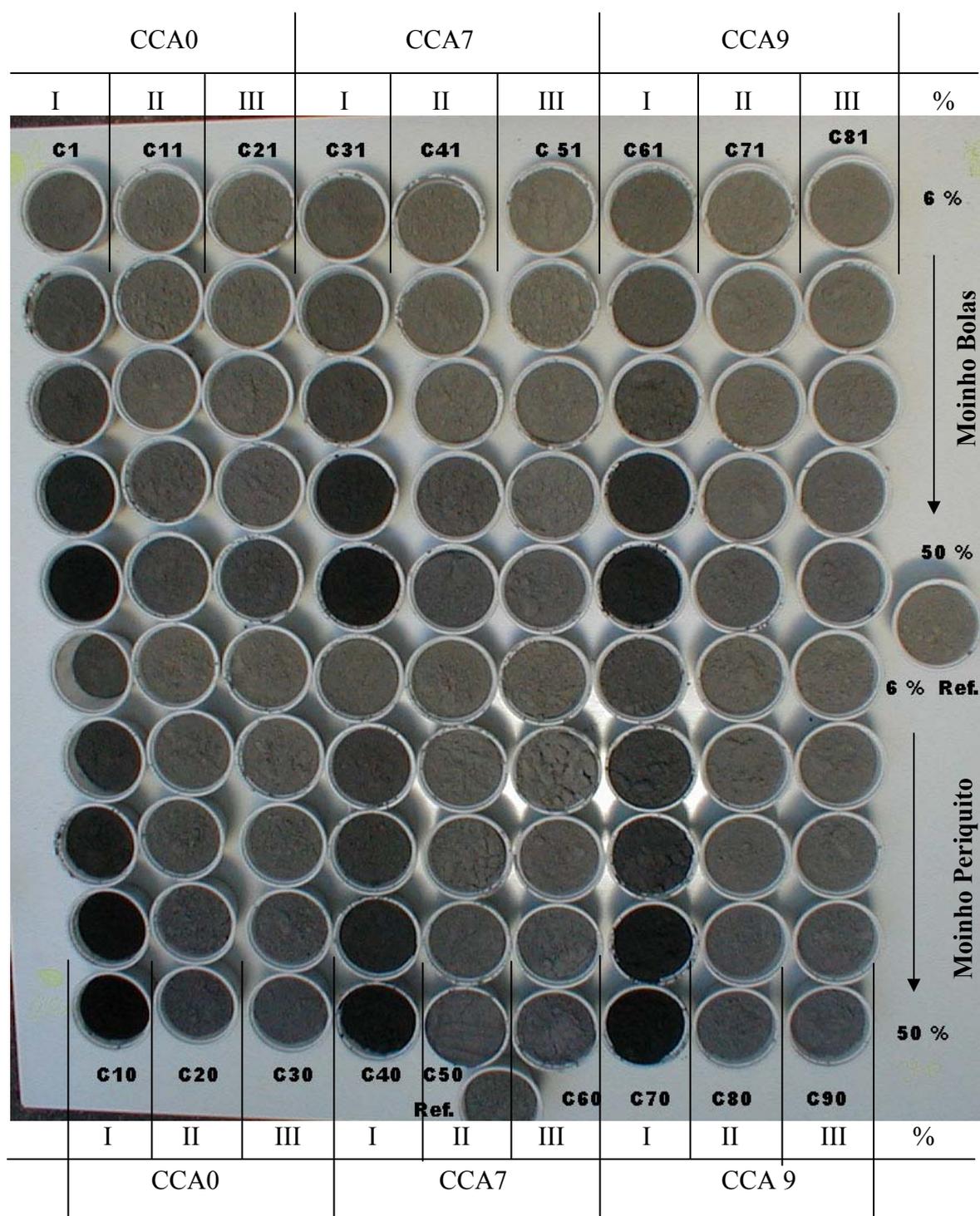


FIGURA 6.1 Fotografia de amostras dos cimentos produzidos, por substituição, por CCA beneficiada

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO

A resistência à compressão foi avaliada nas idades obrigatórias de 3, 7 e 28 dias, conforme as normas brasileiras NBR 11578/91 e NBR 5736/91, nos 90 cimentos confeccionados. Para a idade facultativa de 91 dias foram testados 54 cimentos, perfazendo 64% do total; para os outros 36 cimentos, a resistência à compressão nesta idade foi estimada por uma curva de ajuste aos valores obtidos aos 3, 7 e 28 dias. O cimento de referência foi avaliado nas quatro idades consideradas.

6.1.1 Materiais Empregados

Para a confecção dos corpos-de-prova foram empregados os seguintes materiais: CP V-ARI (referência), areia normal, aditivo e água, todos caracterizados no item 3.2, além dos 90 cimentos produzidos por substituição, em massa, por CCA beneficiada

6.1.2 Resultados obtidos

A TAB. 6.2 apresenta os resultados das médias das resistências à compressão individuais de cada cimento, para cada idade, calculadas de acordo com o item 3.4.1. Também é apresentado o percentual de aditivo, em relação à massa de cimento, empregado na mistura a fim de obter trabalhabilidade da argamassa, conforme justificado no item 3.4.1. O espalhamento obtido na mesa para índice de consistência pelo traço de referência foi de 200 mm, assim, em cada cimento, foi usado aditivo suficiente e necessário para obter igual espalhamento com variação de ± 20 mm, ou seja, (200 ± 20) mm.

As TAB. 6.3 e 6.4 apresentam, respectivamente, as diferenças da resistência de cada cimento em relação ao de referência, em termos absolutos e em percentuais.

6.1.3 Análise dos resultados

A análise das TAB. 6.4 a 6.4 permite fazer as seguintes observações:

- para a idade de 3 dias, somente 3 cimentos (produzidos com CCA7, em percentuais de substituição de 6 e 10%) registraram resistência à compressão acima do valor de referência;

TABELA 6.2 Médias de resistência individual à compressão e percentual de aditivo usado dos cimentos C1 a C90

		CCA0		fc (MPa)				CCA7		fc (MPa)				CCA9		fc (MPa)				
		Cimento	Aditivo (%)	Idade (dias)				Cimento	Aditivo (%)	Idade (dias)				Cimento	Aditivo (%)	Idade (dias)				
				3	7	28	91			3	7	28	91			3	7	28	91	
Beneficiamento I (moagem, estado natural)	Moinho bolas	C1	0,144	31,9	34,0	46,7	53,9*	C 31	0,144	34,2	43,4	47,5	54,9	C 61	0,043	28,3	41,9	49,2	60,8*	
		C2	0,120	27,3	38,3	52,2	65,8*	C 32	0,163	40,0	40,3	53,9	56,4	C 62	0,091	29,7	43,4	50,8	62,9*	
		C3	0,144	26,9	37,6	52,6	66,4*	C 33	0,168	37,4	41,4	48,8	60,2	C 63	0,108	25,7	38,9	47,8	60,2*	
		C4	0,337	21,9	23,3	47,7	59,4*	C 34	0,240	29,0	32,3	46,5	52,8	C 64	0,192	24,6	33,2	39,8	48,7*	
		C5	1,274	7,8	12,6	38,6	52,8*	C 35	0,481	23,6	26,1	44,3	50,3	C 65	0,337	16,4	23,4	29,1	36,1*	
	Moinho periquito	C6	0,048	25,1	43,4	55,4	62,7	C 36	0,120	40,3	42,2	50,0	52,0	C 66	0,043	35,5	43,5	50,3	58,4*	
		C7	0,108	31,7	48,3	58,7	67,0	C 37	0,120	36,8	40,4	55,2	70,1	C 67	0,108	35,7	44,9	51,8	60,7*	
		C8	0,159	32,3	46,8	58,6	65,1	C 38	0,168	35,6	37,2	55,4	61,8	C 68	0,133	31,0	42,2	49,4	59,9*	
		C9	0,361	24,0	41,3	54,8	74,8	C 39	0,240	29,5	40,6	58,5	55,8	C 69	0,192	22,1	34,8	50,9	66,4*	
		C10	0,810	17,7	36,0	54,6	72,2	C 40	0,481	19,9	32,3	49,7	63,6	C 70	0,392	14,7	27,3	40,9	55,2*	
Beneficiamento II (térmico)	Moinho bolas	C11	0,036	24,7	35,4	47,0	59,4*	C 41	0,096	28,9	40,1	50,2	55,1	C 71	0,041	32,7	35,6	44,8	50,9*	
		C12	0,079	24,4	35,1	46,6	60,9*	C 42	0,096	32,7	40,8	50,8	53,6	C 72	0,077	27,6	34,6	46,0	55,7*	
		C13	0,118	27,7	35,9	48,2	59,1*	C 43	0,096	27,6	38,4	47,1	56,0	C 73	0,096	28,5	34,7	49,5	60,4*	
		C14	0,481	17,2	28,3	38,2	58,7	C 44	0,288	22,7	36,8	46,4	57,8	C 74	0,144	22,1	24,7	43,9	54,9*	
		C15	1,743	6,6	14,4	25,6	35,6*	C 45	0,625	16,5	22,1	38,8	51,1	C 75	0,264	13,7	23,0	34,1	45,0*	
	Moinho periquito	C16	0,036	29,0	43,2	50,7	63,0*	C 46	0,060	39,5	40,2	48,3	47,3	C 76	0,036	28,4	32,3	46,9	50,6	
		C17	0,060	25,5	42,8	52,0	61,2	C 47	0,072	34,8	43,4	46,5	53,4*	C 77	0,084	29,8	35,8	47,6	53,0	
		C18	0,096	33,4	44,3	49,1	49,9	C 48	0,072	36,0	42,6	52,8	62,9	C 78	0,108	28,7	34,3	53,6	66,5*	
		C19	0,137	25,1	39,4	58,1	64,4	C 49	0,180	30,6	32,1	54,1	62,0	C 79	0,161	21,2	31,8	46,1	59,5*	
		C20	0,209	19,8	32,7	49,7	64,8	C 50	0,240	24,8	35,0	36,4	43,5*	C 80	0,216	15,0	28,6	40,8	55,0*	
Beneficiamento III (químico)	Moinho bolas	C21	0,036	33,7	35,9	50,9	55,7	C 51	0,084	30,0	37,2	49,5	56,2	C 81	0,048	32,8	39,8	47,8	50,4	
		C22	0,084	27,9	35,0	45,1	57,2	C 52	0,084	30,9	37,9	49,9	58,7	C 82	0,084	27,7	39,9	47,9	59,5*	
		C23	0,096	32,1	37,0	50,0	53,6	C 53	0,103	29,4	37,4	48,7	57,4	C 83	0,096	29,9	36,6	38,7	50,0	
		C24	0,356	26,0	31,6	47,9	58,9*	C 54	0,250	22,4	34,5	45,9	49,1	C 84	0,168	25,8	31,2	44,7	47,4	
		C25	0,589	17,5	28,9	40,9	53,5*	C 55	0,340	13,3	18,8	39,0	49,9	C 85	0,264	18,2	24,4	36,6	41,1	
	Moinho periquito	C26	0,060	27,1	32,4	50,9	62,8*	C 56	0,048	36,2	41,4	52,0	56,1	C 86	0,048	35,7	43,5	51,4	56,5	
		C27	0,132	28,7	41,4	50,8	63,8	C 57	0,060	34,3	39,2	55,6	52,6	C 87	0,096	37,7	45,5	53,9	60,5	
		C28	0,156	31,4	46,3	55,1	66,9	C 58	0,072	34,4	34,2	54,2	54,2	C 88	0,120	36,3	42,1	53,3	62,0	
		C29	0,212	26,5	45,5	53,4	57,2	C 59	0,156	30,9	36,7	56,5	69,5*	C 89	0,159	28,5	35,1	54,2	61,9	
		C30	0,322	19,3	38,0	53,8	62,9	C 60	0,325	21,2	32,1	51,1	59,9	C 90	0,216	19,6	34,0	47,6	52,9	
REFERÊNCIA			39,4	42,0	48,5	53,6														

* -valor estimado por ajuste de curvas

TABELA 6.3 Diferenças entre a resistência à compressão individual e a resistência do cimento de referência, nas diferentes idades C1 a C90

		CCA0	Diferença $f_c - f_{cR}$ (MPa)				CCA7	Diferença $f_c - f_{cR}$ (MPa)				CCA9	Diferença $f_c - f_{cR}$ (MPa)							
		Cimento	Idade (dias)				Cimento	Idade (dias)				Cimento	Idade (dias)							
			3	7	28	91		3	7	28	91		3	7	28	91				
Beneficiamento I (moagem, estado natural)	Moinho bolas	C1	-7,6	-8,0	-1,6	0,3*	C 31	-5,3	1,4	-0,8	1,3	C 61	-11,1	0,0	0,9	7,2*				
		C2	-12,1	-3,6	3,9	12,2*	C 32	0,6	-1,7	5,6	2,8	C 62	-9,8	1,5	2,5	9,3*				
		C3	-12,6	-4,3	4,3	12,8*	C 33	-2,0	-0,6	0,5	6,5	C 63	-13,8	-3,1	-0,5	6,6*				
		C4	-17,6	-18,6	-0,6	5,8*	C 34	-10,4	-9,7	-1,8	-0,8	C 64	-14,9	-8,8	-8,5	-4,9*				
		C5	-31,6	-29,4	-9,7	-0,8*	C 35	-15,4	-15,9	-4,0	-3,3	C 65	-23,0	-18,5	-19,2	-17,5*				
	Moinho periquito	C6	-14,4	1,5	7,0	9,1	C 36	0,8	0,2	1,7	-1,6	C 66	-3,9	1,5	2,0	4,8*				
		C7	-7,8	6,3	10,4	13,4	C 37	-2,6	-1,6	6,9	16,5	C 67	-3,7	2,9	3,5	7,1*				
		C8	-7,2	4,8	10,3	11,4	C 38	-3,9	-4,8	7,1	8,2	C 68	-8,5	0,2	1,1	6,3*				
		C9	-15,5	-0,6	6,5	21,2	C 39	-9,9	-1,4	10,2	2,2	C 69	-17,4	-7,2	2,6	12,8*				
		C10	-21,8	-6,0	6,3	18,6	C 40	-19,5	-9,7	1,4	10,0	C 70	-24,8	-14,7	-7,4	1,6*				
Beneficiamento II (térmico)	Moinho bolas	C11	-14,7	-6,6	-1,3	5,8*	C 41	-10,6	-1,9	1,9	1,5	C 71	-6,7	-6,3	-3,5	-2,7*				
		C12	-15,0	-6,8	-1,7	7,3*	C 42	-6,7	-1,1	2,4	0,0	C 72	-11,8	-7,4	-2,3	2,1*				
		C13	-11,7	-8,0	-0,1	5,5*	C 43	-11,8	-3,6	-1,2	2,4	C 73	-11,0	-7,2	1,2	6,8*				
		C14	-22,3	-13,6	-10,1	5,1	C 44	-16,7	-5,2	-1,9	4,2	C 74	-17,3	-17,3	-4,4	1,3*				
		C15	-32,9	-27,5	-22,7	-18,0*	C 45	-23,0	-19,9	-9,5	-2,5	C 75	-25,8	-19,0	-14,2	-8,6*				
	Moinho periquito	C16	-10,5	1,2	2,4	9,4*	C 46	0,1	-1,7	0,0	-6,3	C 76	-11,0	-9,7	-1,4	-3,0				
		C17	-14,0	0,9	3,7	7,6	C 47	-4,6	1,4	-1,8	-0,2*	C 77	-9,6	-6,2	-0,7	-0,6				
		C18	-6,1	2,3	0,8	-3,7	C 48	-3,4	0,6	4,5	9,3	C 78	-10,8	-7,6	5,3	12,9*				
		C19	-14,3	-2,5	9,8	10,8	C 49	-8,8	-9,9	5,8	8,4	C 79	-18,3	-10,2	-2,2	5,9*				
		C20	-19,7	-9,3	1,4	11,2	C 50	-14,6	-7,0	-11,9	-10,1*	C 80	-24,4	-13,2	-7,5	1,4*				
Beneficiamento III (químico)	Moinho bolas	C21	-5,7	-6,1	2,6	2,1	C 51	-9,4	-4,7	1,2	2,6	C 81	-8,7	-2,2	-0,5	-3,2				
		C22	-11,6	-7,0	-3,2	3,6	C 52	-8,6	-4,0	1,6	5,1	C 82	-11,7	-2,1	-0,4	5,9*				
		C23	-7,3	-5,0	1,6	0,0	C 53	-10,0	-4,6	0,4	3,8	C 83	-9,5	-5,3	-9,6	-3,6				
		C24	-13,5	-10,4	-0,4	5,3*	C 54	-17,0	-7,5	-2,4	-4,6	C 84	-13,6	-10,8	-3,6	-6,2				
		C25	-22,0	-13,0	-7,4	-0,1*	C 55	-26,1	-23,2	-9,3	-3,7	C 85	-21,3	-17,5	-11,7	-12,5				
	Moinho periquito	C26	-12,4	-9,6	2,6	9,2*	C 56	-3,2	-0,6	3,7	2,5	C 86	-3,7	1,6	3,1	2,9				
		C27	-10,8	-0,5	2,5	10,2	C 57	-5,1	-2,6	7,3	-1,0	C 87	-1,8	3,6	5,6	6,8				
		C28	-8,0	4,4	6,8	13,3	C 58	-5,1	-7,8	5,9	0,6	C 88	-3,2	0,1	5,0	8,4				
		C29	-12,9	3,5	5,1	3,6	C 59	-8,6	-5,3	8,2	15,9*	C 89	-11,0	-6,9	5,9	8,3				
		C30	-20,1	-4,0	5,5	9,3	C 60	-18,3	-9,8	2,8	6,3	C 90	-19,9	-7,9	-0,7	-0,8				
REFERÊNCIA			39,4	42,0	48,5	53,6														

- para a idade de 7 dias, 22,2% dos cimentos com substituição apresentaram resistência igual ou superior ao valor de referência, enquanto para as idades de 28 e 91 dias, os percentuais passaram para 56,7% e 72,2%, respectivamente. Estes percentuais indicam que o desempenho dos cimentos com substituição por CCA, melhora com a idade, tendendo a superar o valor de referência, certamente devido as reações pozolânicas que vão ocorrendo ao longo do tempo;
- quanto ao tipo de beneficiamento, o beneficiamento I foi o que apresentou maior percentual de casos com resistência igual ou superior ao valor de referência – 46,7%, seguido pelos beneficiamentos III e II, com 37,5% e 30,8%, respectivamente;
- em relação aos moinhos, o de bolas apresentou o percentual de 26,1% do total experimentado superior ao valor de referência, enquanto o moinho periquito, registrou percentual de 51,2%, indicando a influência do tamanho das partículas no desempenho da resistência à compressão;
- os valores extremos das diferenças percentuais registradas foram: -83,3%, para a cinza CCA0, submetida ao beneficiamento II e processada no moinho de bolas, e +39,5%, para a mesma cinza, porém submetida ao beneficiamento I e moída no periquito.
- quanto aos percentuais de substituição, os percentuais de 6, 10 e 15% tiveram comportamento semelhante, ou seja, em torno de 50% de suas medições foram igual ou superior ao valor de resistência. Como o aumento do percentual de substituição para 33 e 50%, o percentual de medidas superiores à referência caem, respectivamente, para 32 e 17%.

6.1.4 Análise estatística dos dados

O modelo estatístico aplicado está apresentado no item 3.4.1.2. Os fatores considerados foram: tipo de cinza; tipo de tratamento; tipo de moagem; percentual de substituição e idade. O modelo estatístico foi rodado duas vezes. A primeira versão com o fator idade em três níveis (3, 7 e 28 dias), na qual todos os dados da matriz são experimentais e foram obtidos neste trabalho; a segunda versão inclui a idade de 91 dias, totalizando quatro níveis neste fator, dos quais 36% foram estimados por ajuste de curvas. Esta segunda versão passará a ser referida neste texto como versão 91.

A análise de variância indicou que todos os fatores são significativos em termos de resistência à compressão, bem como as interações entre eles. Os fatores, em ordem decrescente de importância, aparecem como: idade, tipo de moagem; percentual de substituição; tipo de beneficiamento e, por último, tipo de cinza. Na versão 91, também se verificam estes resultados. Os resultados da análise estatística são apresentados na TAB. 6.5 – Tabela resumo da ANOVA. Os fatores passam a ser analisados nesta ordem.

TABELA 6.5 – Análise de variância para os dados de resistência à compressão - ANOVA

ANOVA	Fatores				
Efeito	GL	SQ	QM	F _{calc.}	Valor P
Tipo de cinza	2	466,07	278,12	1,675	0,00000
Tipo de beneficiamento	2	717,08	427,91	1,675	0,00000
Tipo de moagem	1	7871,45	4697,18	1,675	0,00000
Percentual substituição	4	4157,04	2480,66	1,675	0,00000
Idade	3	46737,59	27889,99	1,675	0,00000

GL – graus de liberdade; SQ – soma dos quadrados; QM – quadrado médio

Em função da grande influência do fator idade em relação aos demais, conforme pode ser observado nos valores de SQ da TAB. 6.5, a análise dos outros fatores será feita também para a idade representativa de 28 dias, a fim de diminuir a dispersão dos resultados.

a) Análise estatística para a idade de referência de 28 dias

Para a idade de 28 dias, a análise de variância indicou que todos os fatores são significativos, bem como todas as interações entre eles. Os resultados da análise estatística estão apresentados na TAB. 6.6, onde se observa que o fator mais importante é o tipo de moinho, ou seja, a granulometria. Depois, seguem-se os fatores percentual de substituição, tipo de cinza e tipo de beneficiamento. Comparando com os resultados da análise estatística da totalidade dos dados (com as demais idades), verifica-se uma alternância de entre os dois últimos fatores.

TABELA 6.6 Análise de variância para os dados de resistência à compressão, aos 28 dias

ANOVA	Fatores				
	GL	SQ	QM	F _{calc.}	Valor P
Efeito					
Tipo de cinza	2	347,69	119,15	2,92	0,00000
Tipo de beneficiamento	2	215,01	73,68	2,92	0,00000
Tipo de moagem	1	3042,88	1042,75	2,92	0,00000
Percentual substituição	4	740,35	253,71	2,92	0,00000

GL – grau de liberdade; SQ – soma dos quadrados; QM – quadrado médio

6.1.4.1 Influência isolada da idade na resistência à compressão

A FIG. 6.2 apresenta o comportamento do fator idade nas duas versões do projeto estatístico, cujos valores representam médias da totalidade dos dados. Como elemento de comparação, também é apresentado o comportamento do cimento de referência para as idades avaliadas.

O fator idade é significativo e, no gráfico da FIG. 6.2, constata-se o crescimento da resistência com a idade, o que era esperado. Nas duas versões, as comparações múltiplas de médias indicam que as idades diferem entre si.

Quando comparadas as curvas de comportamento do Fator Idade com a do cimento de referência, fica evidente a influência da presença da CCA e de sua atividade pozolânica, gerando redução da resistência à compressão nas primeiras idades e aumento, ao longo do tempo. Aos 28 dias, as resistências são praticamente iguais, mas aos 91 dias, na média, os cimentos com CCA superariam a referência em aproximadamente 9%. Isto se deve, principalmente, à reação pozolânica que só vai ocorrer após a hidratação do cimento, pois a CCA vai reagir com o CaOH resultante desta hidratação. Enquanto isto não ocorre

nas primeiras idades e como há menos cimento devido à substituição, é natural que nestas idades, a resistência à compressão seja inferior a do cimento de referência.

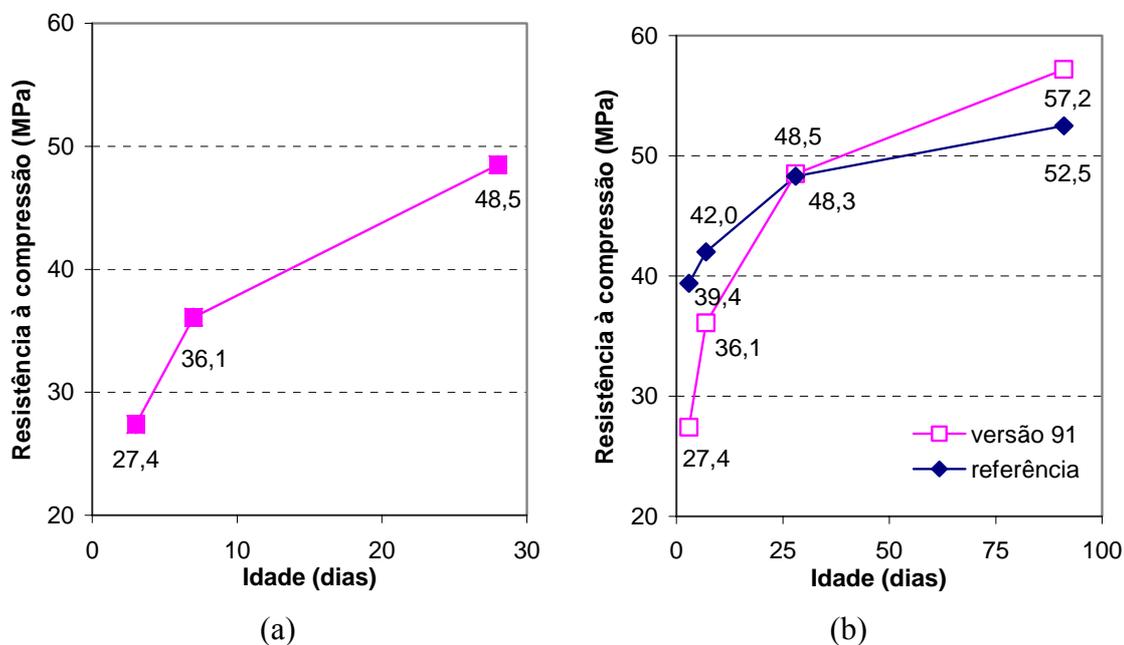


FIGURA 6.2 Influência isolada da idade na resistência à compressão

(a) para idade de 28 dias (b) para idades até 91 dias – versão 91

Este comportamento, em termos de idade, está de acordo com dados da bibliografia, Asavapisit e Ruengrit (2005) estudando cimentos com percentuais de substituição de 10, 20 e 30%, só obtiveram resistência à compressão acima dos valores de referência, aos 28 dias de idade, com percentual de 10% de substituição e, aos 91 dias, com percentuais de 10 e 20%.

Rêgo (2004) trabalhando com CCA amorfa e cristalina conseguiu obter, já aos 7 dias de idade, valores de resistência à compressão próximos aos de referência, até ligeiramente superiores quando empregando CCA amorfa com 5% de substituição.

Weber (2001) estudando CCA modificadas por tratamento térmico também obteve, aos 28 dias de idade, valores de resistência à compressão de argamassas de cimentos próximas aos do cimento de referência, sendo ligeiramente superiores ou inferiores em função do percentual de substituição e da relação água/aglomerante empregados.

6.1.4.2 Influência isolada do tipo de moinho na resistência à compressão

Nas três análises estatísticas realizadas, o fator tipo de moinho é significativo. Para a idade única de 28 dias, é o fator mais importante, enquanto nas outras análises, que consideram mais de uma idade, este fator só menos importante que o fator da própria idade. Seu comportamento, nas três análises estatísticas, é mostrado na FIG. 6.3.

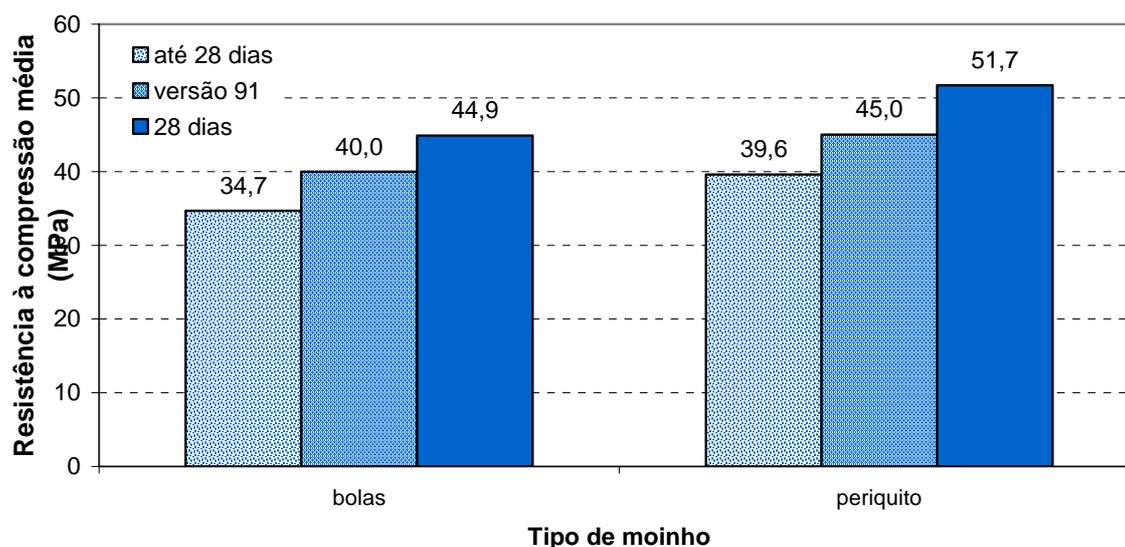


FIGURA 6.3 Influência isolada do tipo de moinho na resistência à compressão

Na verdade, o comportamento deste fator (tipo de moinho) reflete a importância da granulometria da cinza no seu desempenho. Conforme visto no Capítulo 5, a diferença entre as granulometrias das cinzas moídas por um e outro moinho é significativa em termos de pozolanicidade com o cimento. A média dos diâmetros (50% passante) das CCA beneficiadas moídas no moinho de bolas é de 20 μm , enquanto que no periquito, é de 5 μm .

O moinho periquito registrou melhor desempenho do que o moinho de bolas, independente da idade ou idades consideradas. Este comportamento é constatado no gráfico da FIG. 6.3 e ratifica os resultados obtidos no estudo da pozolanicidade das cinzas beneficiadas (Cap. 5).

Os dados do gráfico da FIG. 6.3 mostram a influência das primeiras idades na média total, baixando seus valores o que fica evidente quando comparado com os dados referentes a idade única de 28 dias.

Os dados referentes a idade única de 28 dias quando comparados com o valor de referência (48,5 MPa) mostram a importância da finura da CCA na resistência à compressão obtida nos cimentos com substituição.

6.1.4.3 Influência isolada do percentual de substituição na resistência à compressão

Tal como o tipo de moinho, o percentual de substituição é estatisticamente significativo, nas três análises realizadas. Cinco níveis de substituição foram avaliados neste fator: 6, 10, 15, 33 e 50%, além do valor de referência (0%). O comportamento deste fator, para as diferentes análises estatísticas realizadas, é apresentado na FIG. 6.5.

Considerando a totalidade dos dados, o percentual de 10 % de substituição foi o que teve melhor desempenho em termos de resistência à compressão, inclusive superando o valor de referência, aos 28 dias (percentual de 0% - 48,5 MPa). A comparação múltipla de médias da versão até 28 dias indica que os percentuais de 6 e 15% não diferem entre si, diferindo porém de todos os demais. Já nas versões 91 e idade única de 28 dias, isto não acontece, pois os Testes de Duncan indicam que todos os percentuais diferem entre si.

Estes resultados estão de acordo com resultados encontrados por outros autores, por exemplo, Mohanty (1974) ao avaliar percentuais de substituição de 20, 25 e 30%, encontrou resistência à compressão mais elevada com 20% de CCA, obtendo valores iguais a aproximadamente 80% do valor de referência. Singh *et al* (2002) estudando resistência à compressão com percentuais de 5, 10, 15, 20, 25% de substituição por CCA, registraram melhor desempenho com 10%. Resultado semelhante foi encontrado por Asavapisit e Ruengrit (2005) que avaliaram percentuais de 10, 20 e 30%, sendo que o emprego de 10 % de substituição apresentou maiores resistências à compressão em todas as idades, superando a de referência a partir de 28 dias, conforme pode ser observado no gráfico da FIG. 1.8.

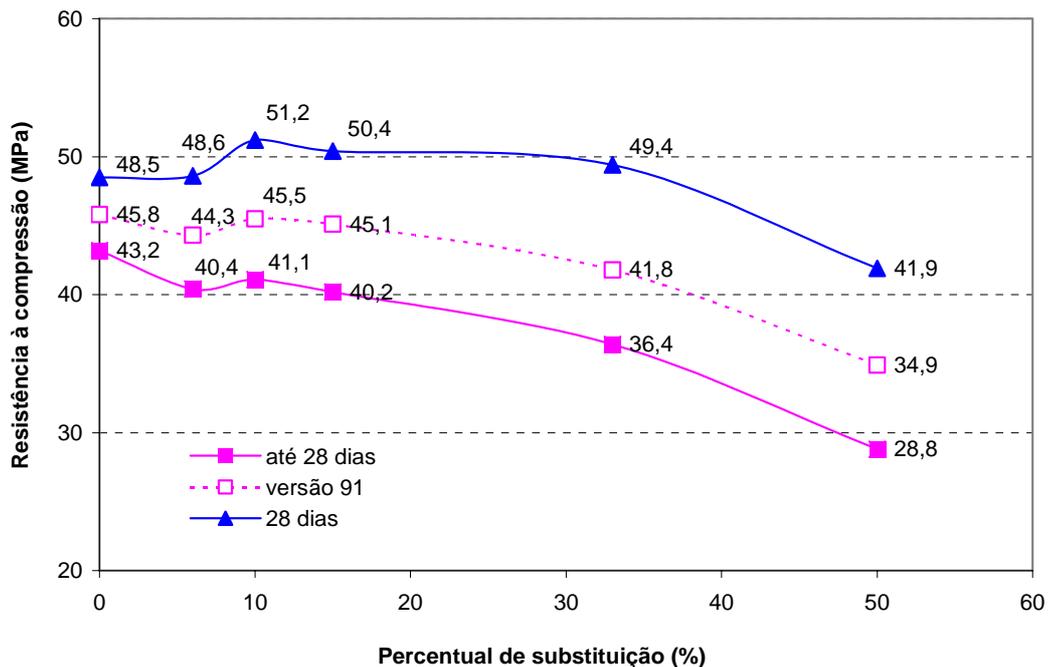


FIGURA 6.4 Influência isolada do percentual de substituição por CCA na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas

Vários autores trabalhando com concreto, também chegaram a conclusão que o percentual de substituição do cimento por CCA que resulta em resistência à compressão mais elevada varia entre de 10% e 20%, dependendo, principalmente da relação água/aglomerante, da granulometria e amorficidade da cinza e do cimento empregado, entre outros fatores (SUGITA *et al.*, 1997; SANTOS, 1997; FERREIRA, 1999; SENSALÉ, 2000; DAFICO, 2001).

Observando-se o comportamento relativo entre as curvas apresentadas na FIG. 6.5, nota-se que as curvas das versões 91 e idade única de 28 dias são menos acentuadas, com menor diferença entre os valores extremos, do que a curva da versão até 28 dias, indicando uma tendência de que, com o passar do tempo, os cimentos com percentuais mais elevados de substituição melhorem seu desempenho.

6.1.4.4 Influência isolada do tipo de beneficiamento na resistência à compressão

O tipo de beneficiamento é também um fator significativo na resistência à compressão. Ele foi avaliado em três níveis: I, II e III. A comparação múltipla de médias (Teste de Duncan) indica que os tratamentos diferem entre si. A FIG. 6.6 mostra o seu comportamento.

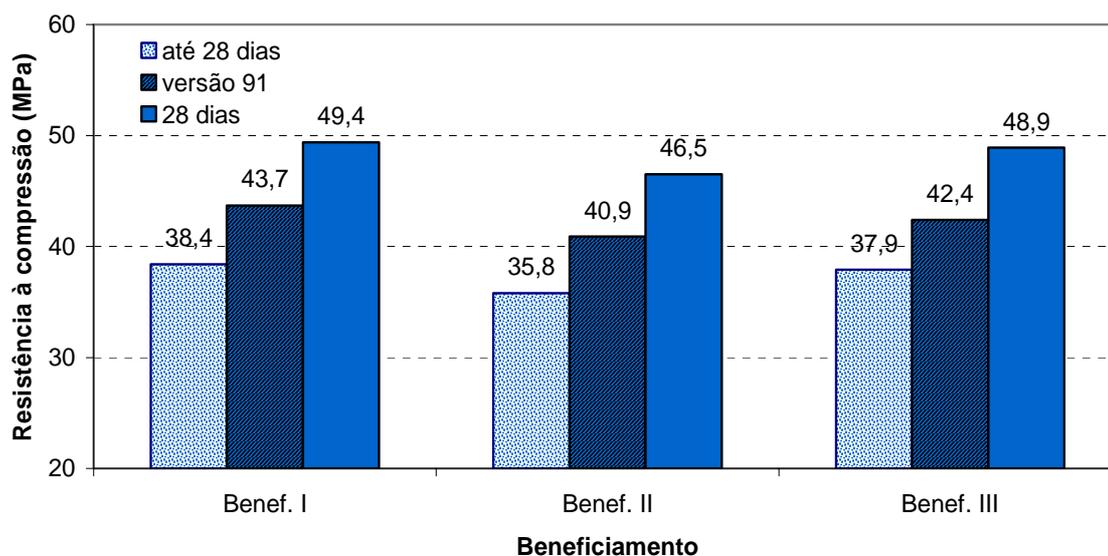


FIGURA 6.5 Influência do tipo de beneficiamento na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas

O gráfico da FIG 6.6 mostra que o beneficiamento I teve melhor desempenho, seguido pelos beneficiamentos III e II. Esta constatação contraria o resultado do estudo da pozolanidade das cinzas beneficiadas (Cap. 5), onde aparece o beneficiamento III como o melhor, seguido pelos beneficiamentos I e II. Em relação ao beneficiamento II, não há contradição de resultados, pois ele aparece sempre em posição mais desfavorável. A alternância verificada entre os beneficiamentos I e III pode ser explicada em função do percentual de substituição, que é um dos fatores diferentes entre os estudos, além da relação água/aglomerante.

Com a intenção de explicar tal alternância de resultados, foi montado o gráfico da FIG. 6.7 que apresenta o comportamento do tipo de beneficiamento em relação aos percentuais de substituição. Realmente, nele constata-se que há alternância de desempenho entre os beneficiamentos I e III com a variação do percentual de substituição, e isto ocorre

independente do tipo de moinho. Nos percentuais de substituição de 6, 10 e 15%, o beneficiamento I se sobrepõe, já nos percentuais mais elevados de 33 e 50%, o beneficiamento III é superior. De acordo com a NBR5752, no estudo da pozolanicidade emprega-se substituição de 30% em volume, o que representa, em massa, percentual variável de acordo com a massa específica da cinza, porém entre 15 e 33%, justificando assim a diferença de resultados e ressaltando a importância da interação entre os fatores tipo de beneficiamento e percentual de substituição.

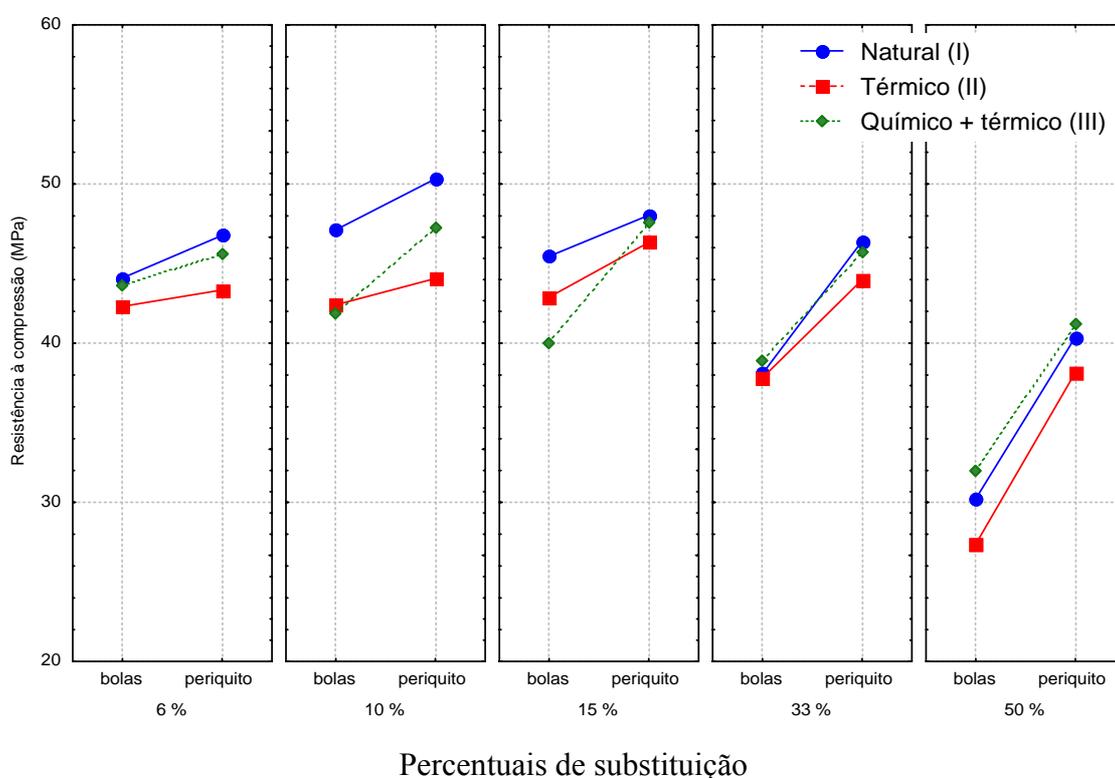


FIGURA 6.6 Comportamento do tipo de beneficiamento em relação aos percentuais de substituição, para os dados da versão 91

Isto indica que o beneficiamento III gerou alteração no comportamento das cinzas, reduzindo a influência do percentual de substituição na resistência à compressão e não só melhorando ou piorando o desempenho, como aconteceu com o beneficiamento II. Isto pode ser observado no gráfico da FIG. 6.8, que apresenta a interação entre os fatores tipo de beneficiamento, tipo de cinza e tipo de moinho. Nele, as linhas dos beneficiamentos I e II são praticamente paralelas, indicando que houve somente redução nas resistências à

compressão determinadas, enquanto a linha do beneficiamento III não manteve paralelismo com as outras, indicando mudança de comportamento.

O beneficiamento III mostrou-se mais eficiente em termos de resistência à compressão do que o beneficiamento II, o que era esperado uma vez que é acrescentada mais uma operação unitária (banho químico) além da requieima. Comparações múltiplas de médias, através do Teste de Duncan, indicam que os tratamentos diferem entre si.

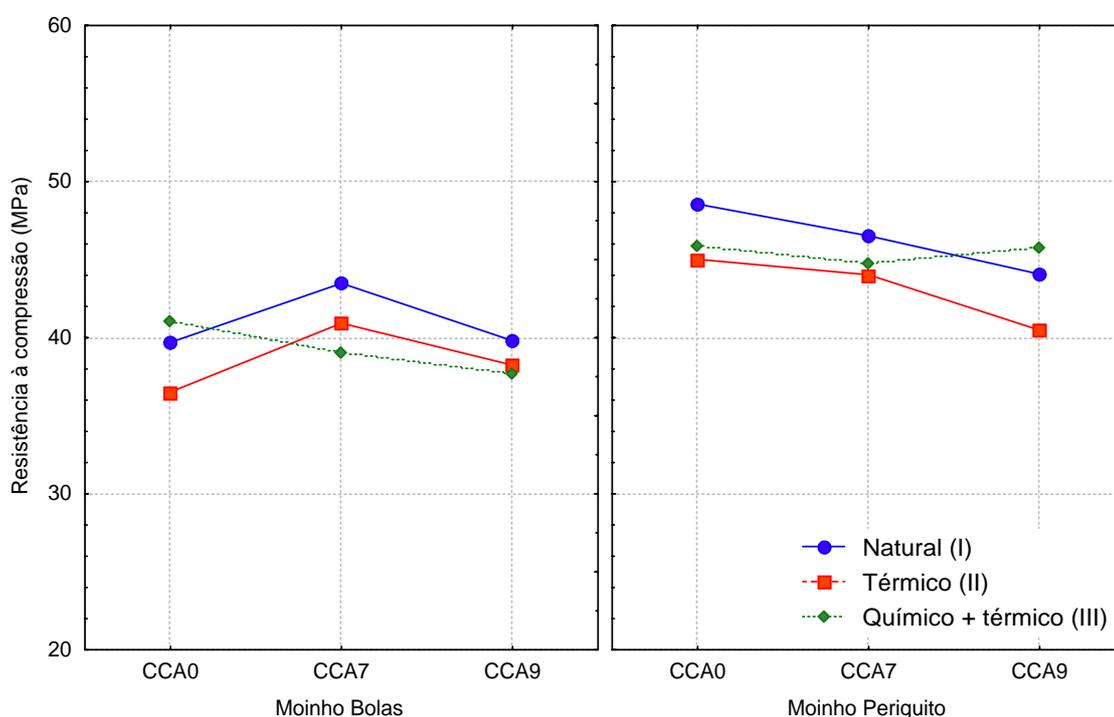


FIGURA 6.7 Comportamento do tipo de beneficiamentos em relação ao tipo de cinza e tipo de moinho

6.1.4.5 Influência do tipo de cinza na resistência à compressão

O fator tipo de cinza, assim como os demais, é significativo, em todas as análises estatísticas realizadas. A FIG. 6.9 apresenta o comportamento do fator tipo de cinza.

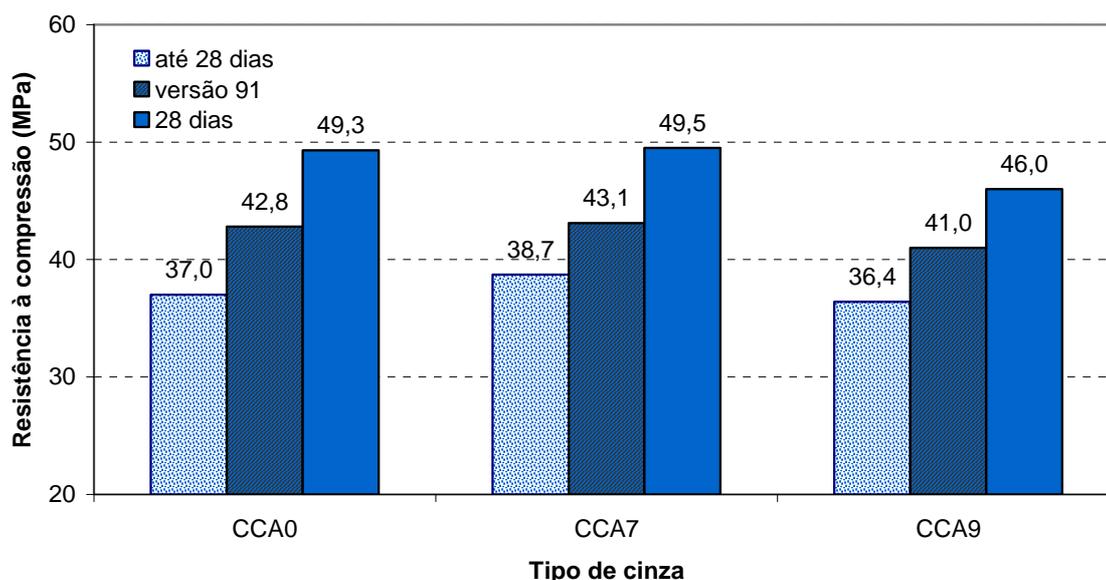


FIGURA 6.8 Influência isolada do tipo de cinza na resistência à compressão, nas diferentes análises estatísticas realizadas

A análise estatística da idade de referência de 28 dias indicou médias das cinzas CCA0 e CCA7 superiores ao valor do cimento de referência (48,5 MPa).

No conjunto dos dados, a cinza residual CCA7 foi a que apresentou melhores resultados em termos de resistência média à compressão, como pode ser observado no gráfico da FIG. 6.9, inclusive, superando a CCA0, cinza de referência, com características mineralógicas de total amorficidade. Este comportamento é semelhante ao obtido no estudo da pozolanicidade. Rêgo (2004) estudando duas CCA, uma amorfa e outra cristalina, também constatou que nem sempre a CCA amorfa foi a que apresentou resistência à compressão mais elevada, os resultados variaram em função do percentual de substituição, da idade e da relação água/aglomerante .

A fim de explicar tal resultado, foram analisadas as interações com outros fatores, tais como idade dos corpos-de-prova e granulometria das cinzas. Para tanto, foi montado o gráfico da FIG. 6.10 , que mostra a interação entre o tipo de cinza, idade e tipo de moinho. Nele, fica evidenciado que a cinza CCA0, predominantemente amorfa, atingiu melhores resultados aos 91 dias, em ambos os moinhos. No moinho periquito, isto ocorre já aos 7 dias de idade, indicando que o seu desempenho melhora com a granulometria mais fina.

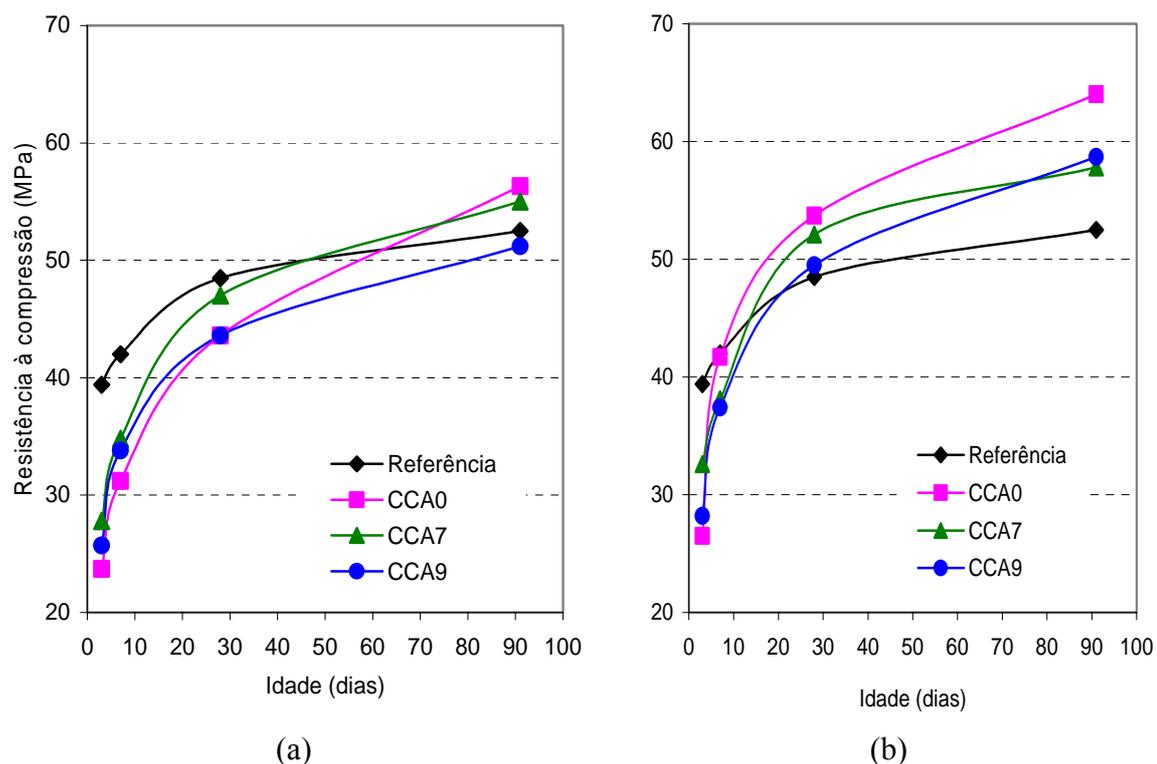


FIGURA 6.9 Interação entre os fatores tipo de cinza, idade e tipo de moinho (a) Moinho de Bolas; (b) Moinho Periquito

6.1.4.6 Interações entre alguns fatores

Aqui são analisadas outras interações entre os fatores, com a intenção de esclarecer comportamentos e/ou melhor discutir os resultados. As FIG. 6.10 a 6.12 apresentam gráficos de algumas interações entre alguns dos fatores referidos anteriormente e considerados estatisticamente significativos.

A FIG. 6.10 mostra o desempenho das cinzas em função dos percentuais de substituição e do tipo de moinho, onde se observa que as cinzas residuais CCA7 e CCA9 atingem a maior resistência com percentual de 10%, independente do tipo de moinho. No entanto, para a cinza de referência, CCA0, este máximo ocorre com 15% de substituição.

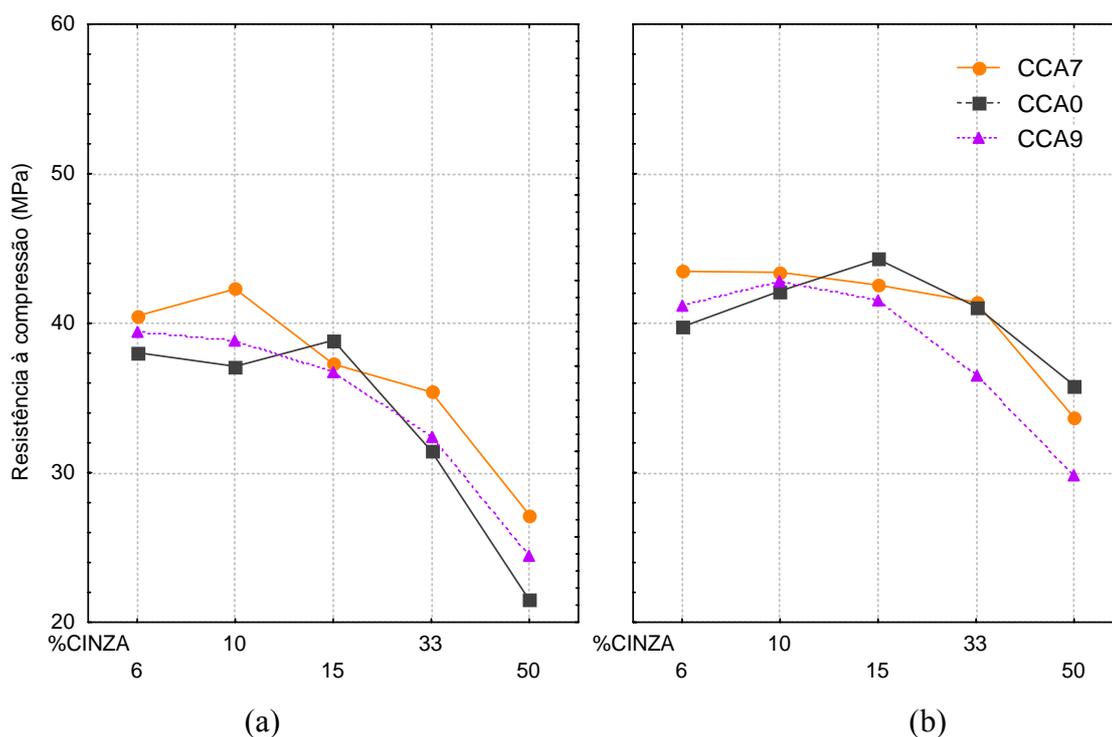


FIGURA 6.10 Comportamento das cinzas em relação aos percentuais de substituição e ao tipo de moinho (a) Moinho de bolas; (b) Moinho periquito

O gráfico da FIG. 6.11 mostra o comportamento dos beneficiamentos em relação aos percentuais de substituição e ao tipo de moinho. Os beneficiamentos I e III têm comportamentos semelhantes em relação ao tipo de moinho, ou seja, em ambos, o beneficiamento I é superior ao II quando os percentuais de substituição são mais baixos (até 15%), invertendo esta situação para os percentuais mais elevados de 33 e 50%, conforme discutido anteriormente no item 6.1.4.4. O beneficiamento II é inferior aos outros dois, seja qual for o percentual de substituição (com exceção do 15%) e o tipo de moinho.

O gráfico da FIG. 6.12 apresenta a interação do tipo de moinho em relação aos percentuais de substituição, onde se constata que a curva de desempenho do moinho periquito é menos acentuada que a do moinho de bolas, indicando que, em elevados percentuais de substituição, as cinzas com menor granulometria têm melhor comportamento, pois quanto mais fina forem as partículas, mais cinza pode ser incorporada e, como consequência, melhor resistência à compressão.

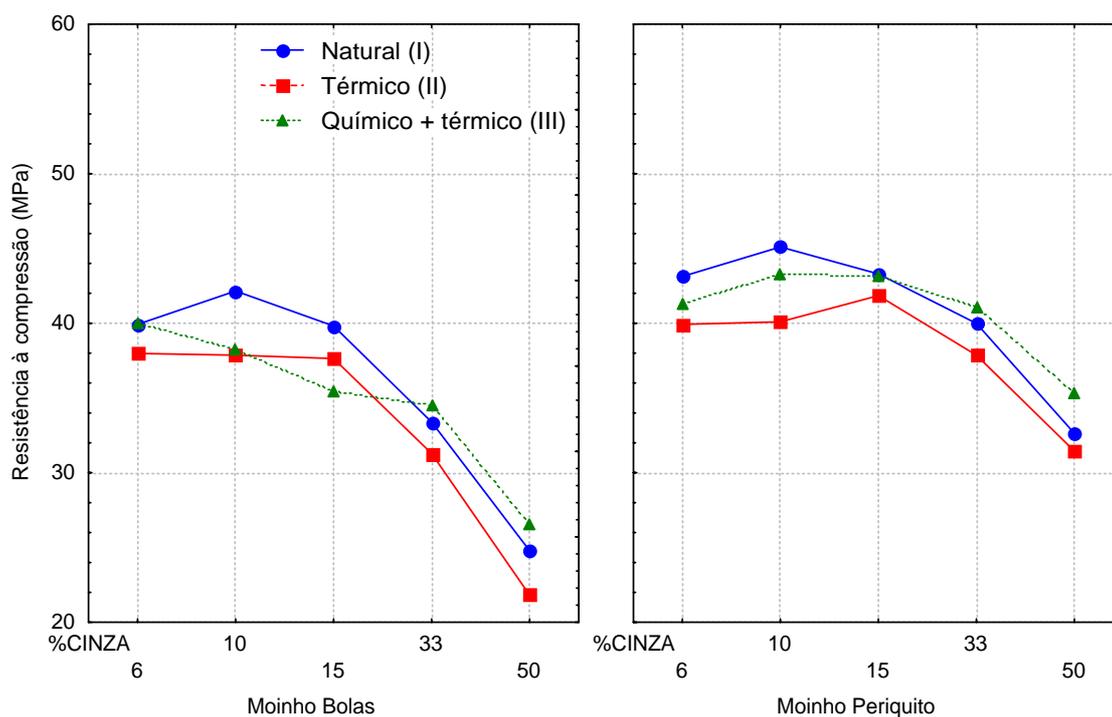


FIGURA 6.11 Comportamento dos beneficiamentos em relação aos percentuais de substituição e ao tipo de moinho

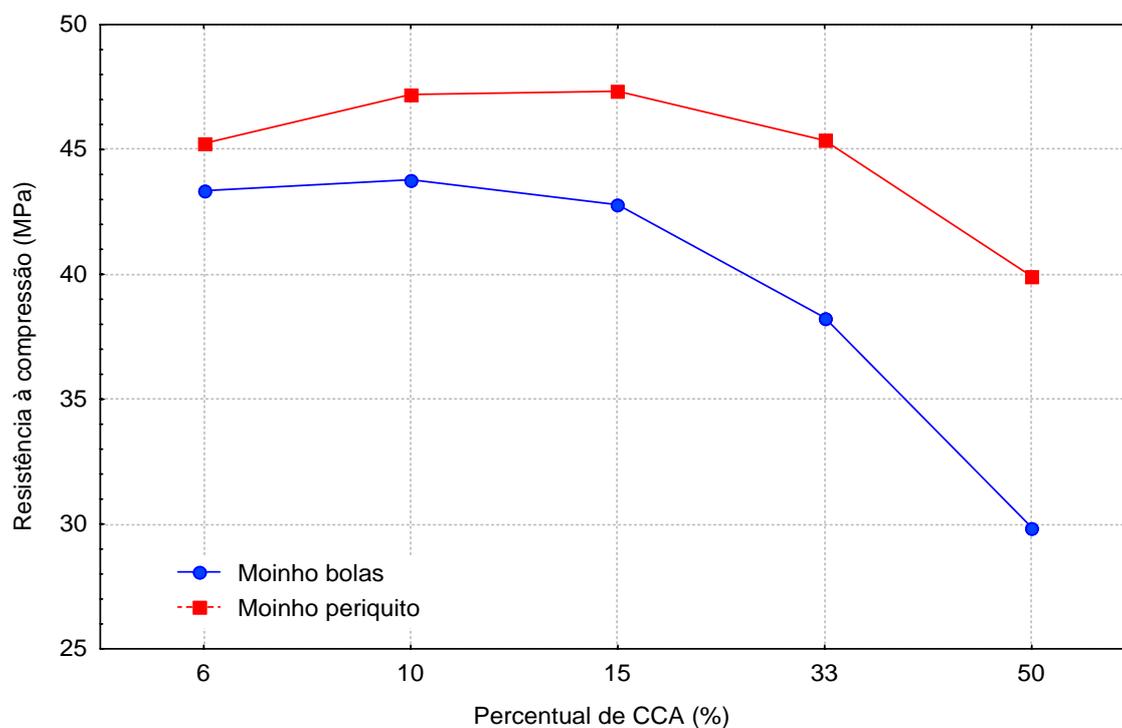


FIGURA 6.12 Comportamento dos moinhos em relação aos percentuais de substituição

6.1.5 Modelagem dos dados

Para tentar explicar a resistência à compressão do cimento produzido com substituição de CCA beneficiada em função dos fatores envolvidos no beneficiamento das cinzas e na produção do cimento, foram realizadas várias regressões múltiplas. Muitas tentativas foram feitas de correlacionar a resistência à compressão com as variáveis independentes, como: tipo de tratamento, tipo de moinho, percentual de substituição, idade e tipo de cinza.

As regressões múltiplas foram feitas empregando os dados experimentais deste trabalho, segundo a seguinte seleção:

- Dados totais - ou seja, todos os fatores, em todos os níveis, totalizando 1080 observações;
- Por tratamento - os dados foram isolados por tipo de tratamento, isto é, natural; térmico ou químico, tornando a variabilidade dos dados menor. Para cada tipo de tratamento, têm-se 360 observações.

6.1.5.1 Dados totais

A regressão múltipla foi realizada para a variável dependente resistência à compressão com as cinco variáveis independentes: tipo de cinza, tipo de tratamento, tipo de moinho, percentual de substituição e idade.

Para todas estas variáveis nos seus diversos níveis, foi feita primeiramente uma regressão múltipla linear, encontrado um fator de determinação $R^2 = 0,704$. Considerou-se um índice de correlação aceitável em função da variabilidade dos resultados devido ao elevado número de níveis e variáveis envolvidas.

A TAB. 6.7 apresenta exemplos de estimativas de resistência à compressão, comparados com valores de dados experimentais e, também, valores projetados para as idades de 180 e 365 dias. Os dados de prospecção para idades mais avançadas mostram que o modelo linear não é o mais indicado, já que os valores projetados são absurdamente elevados. Portanto, pode-se concluir que este modelo tem aceitação razoável somente dentro dos limites dos dados experimentais.

TABELA 6.7 Exemplos de valores estimados de acordo com a regressão múltipla linear

Exemplo 1	
Dados: CCA0; Natural; bolas; 10% ; 7 dias	Codificação: 101; 101; 101; 10, 7
Valor estimado: 36,7	Intervalo 95%: 35,6 – 37,8
Valores experimentais: 39,3 - 38,2 - 39,3	Média dos valores experimentais: 38,93
(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)	
Valores projetados: p/ 180 dias – 86,8	p/ 365 dias – 140,4
Exemplo 2	
Dados: CCA7; Natural; bolas; 15% ; 91 dias	Codificação: 102; 101; 101; 15, 91
Valor estimado: 59,0	Intervalo 95%: 57,9 - - 60,1
Valores experimentais: 60,8- 60,5 – 60,1	Média dos valores experimentais: 60,5
(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)	
Valores projetados: p/ 180 dias – 84,8	p/ 365 dias – 138,4
Exemplo 3	
Dados: CCA9;químico; periquito; 6%; 7 dias	Codificação: 103; 103; 102; 6; 7
Valor estimado: 39,9	Intervalo 95%: 38,8 – 41,02
Valores experimentais: 44,1; 45,9; 42,9	Média dos valores experimentais: 44,3
(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)	
Valores projetados: p/ 180 dias – 90,0	p/ 365 dias – 143,6

Assim, foi feita uma regressão múltipla não linear considerando somente as três variáveis independentes: tipo de moinho, percentual de substituição e idade. Esta escolha se deu devido a que na análise estatística dos dados (item 6.1.4) e na regressão múltipla linear, os fatores tipo de cinza e tipo de tratamento aparecem como menor importância, mesmo sendo significativos.

Para determinar a função que melhor representa o comportamento das variáveis independentes, foram considerados os gráficos da análise fatorial (item 6.1.4) e adotadas as seguintes funções: tipo de moinho – linear; percentual de substituição – x^2 ; idade – $\ln(x)$.

As TAB. 6.8 e 6.9 apresentam dados das regressões linear e não linear, enquanto a TAB. 6.10 apresenta as variáveis e seus respectivos níveis e códigos.

TABELA 6.8 Dados de regressão múltipla linear entre a Resistência à Compressão com tipo de cinza, tipo de tratamento, tipo de moinho, percentual de substituição e idade

Estatística de regressão			Coefficientes	Erro Padrão	Valor P
R múltiplo	0,84004851	Interseção	-352,013	59,46454	0,000000
R-Quadrado	0,70568150	Tipo de cinza	-0,888	0,27062	0,001065
R-Quadrado ajustado	0,70431130	Tipo de tratamento	-0,660	0,27062	0,014830
Erro Padrão	7,2615	Tipo de moinho	5,399	0,44192	0,000000
Observações	1080	Percentual de substituição	-0,224	0,01344	0,000000
		Idade	0,290	0,00627	0,000000

TABELA 6.9 Dados de regressão múltipla não-linear entre a Resistência à Compressão com tipo de moinho, percentual de substituição e idade

Estatística de regressão			Coefficientes	Erro Padrão	Valor P
R múltiplo	0,92210367	Interseção	-526,18	31,96514	0,000000
R-Quadrado	0,85027519	Tipo de moinho	5,399	0,31490	0,000000
R-Quadrado ajustado	0,84985774	Percentual de substituição – x2	-0,004	0,00017	0,000000
Erro Padrão	5,1744	Idade – ln(x)	8,713	0,12067	0,000000
Observações	1080				

TABELA 6.10 Variáveis, níveis e códigos empregados nas regressões múltiplas linear e não linear

	Variável	Níveis	Codificação	
Regressão múltipla linear	Tipo de cinza (3)	CCA0	101	Regressão múltipla não linear
		CCA7	102	
		CCA9	103	
	Tipo de beneficiamento (3)	Natural	101	
		Térmico	102	
		Químico	103	
	Tipo de moinho (2)	Bolas	101	
		Periquito	102	
	Percentual de substituição (5) (%)	6	6	
		10	10	
15		15		
33		33		
50		50		
Idade (4) (dias)	3	3		
	7	7		
	28	28		
		91	91	

A TAB. 6.11 apresenta exemplos de estimativa de resistência à compressão pela regressão múltipla não linear dos mesmos dados de entrada da TAB. 6.7, comparados com valores experimentais e, também, valores projetados para as idades de 180 e 365 dias.

TABELA 6.11 Exemplos de valores estimados de acordo com a regressão múltipla não linear

Exemplo 1	
Dados: Bolas; 10% ; 7 dias	Codificação: 101; 10^2 ; $\ln(7)$
Valor estimado: 35,7	Intervalo 95%: 35,2 – 36,3
Valores experimentais: 39,3 - 38,2 - 39,3 – 34,8 – 35,4 – 35,7 – 36,2 – 34,7 – 35,6 – 39,5 – 41,7 – 40,6 – 40,7 – 41,8 – 41,3 – 38,8 – 37,4 – 37,6 – 42,9 – 45,4 – 42,9 – 32,6 – 36,6 – 34,6 – 41,0 – 38,4 – 40,2	Média dos valores experimentais: 38,5
<i>(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)</i>	
Valores projetados: p/ 180 dias – 63,9	p/ 365 dias – 70,15
Exemplo 2	
Dados: Bolas; 15% ; 91 dias	Codificação: 101; 15^2 , $\ln(91)$
Valor estimado: 57,5	Intervalo 95%: 56,9 - - 58,2
Valores experimentais: 60,8- 60,5 – 60,1- 66,4 – 59,1 – 51,6 – 55,5 – 53,7 – 57,1 – 55,8 – 56,7 – 58,8 – 57,4 – 56,4 – 60,2 – 60,4 – 48,5 – 51,5 – 50,0	Média dos valores experimentais: 54,2
<i>(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)</i>	
Valores projetados: p/ 180 dias – 63,5	p/ 365 dias – 69,6
Exemplo 3	
Dados:Periquito; 6%; 7 dias	Codificação: 102; 6^2 ; $\ln(7)$
Valor estimado: 41,4	Intervalo 95%: 40,8 – 41,9
Valores experimentais: 44,1 – 45,9 – 42,9 – 43,5 – 42,8 – 45,2 – 40,7 – 44,8 – 44,1 - 33,9 – 32,2 – 30,9 – 42,2 – 44,1 – 40,2 – 40,6 – 39,2 – 40,9 – 40,6 – 40,8 – 42,8 – 43,8 – 42,9 – 45,7 – 32,3 – 33,2 – 32,6	Média dos valores experimentais: 40,5
<i>(diferença entre os valores estimado e média experimental menor do que erro padrão)</i>	
Valores projetados: p/ 180 dias – 69,6	p/ 365 dias – 75,8

Os dados da TAB. 6.11 indicam que há boa proximidade entre os valores estimados e os experimentais. Além disto, os valores projetados para idades mais avançadas são mais compatíveis com o esperado.

6.1.5.2 Dos tratamentos isoladamente

Para modelar o comportamento dos tratamentos isoladamente foram usadas regressões múltiplas não lineares, a exemplo do que foi feito com a totalidade dos dados no item anterior, cujo modelo mostrou-se mais adequado.

A TAB. 6.12 apresenta os dados das regressões para cada um dos tratamentos, onde se constata que os índices de determinação se mantiveram em torno de 0,85, embora a variabilidade dos valores experimentais tenha diminuído em função da restrição dos dados.

TABELA 6.12 Dados de regressão múltipla não-linear entre a Resistência à Compressão com tipo de moinho, percentual de substituição e idade, para os diferentes tratamentos

NATURAL					
Estatística de regressão		Coefficientes	Erro Padrão	Valor P	
R múltiplo	0,92484530	Interseção	-521,495	57,80665	0,000000
R-Quadrado	0,85533883	Tipo de moinho	5,361	0,56948	0,000000
R-Quadrado ajustado	0,85411977	Percentual de substituição – x2	-0,005	0,00030	0,000000
Erro Padrão	5,4026	Idade – ln(x)	9,150	0,21822	0,000000
Observações	360	Codificação do tipo demoinho: Bolas (101); Periquito (102)			
TÉRMICO					
Estatística de regressão		Coefficientes	Erro Padrão	Valor P	
R múltiplo	0,91944922	Interseção	-641,427	53,80721	0,000000
R-Quadrado	0,84538687	Tipo de moinho	6,549	0,53008	0,000000
R-Quadrado ajustado	0,84408395	Percentual de substituição – x2	-0,004	0,00028	0,000000
Erro Padrão	5,0288	Idade – ln(x)	8,022	0,20313	0,000000
Observações	360	Codificação do tipo demoinho: Bolas (101); Periquito (102)			
QUÍMICO					
Estatística de regressão		Coefficientes	Erro Padrão	Valor P	
R múltiplo	0,93388022	Interseção	-606,261	47,56268	0,000000
R-Quadrado	0,87213227	Tipo de moinho	6,195	0,46856	0,000000
R-Quadrado ajustado	0,87105473	Percentual de substituição – x2	-0,003	0,00025	0,000000
Erro Padrão	4,4452	Idade – ln(x)	8,213	0,17955	0,000000
Observações	360	Codificação do tipo demoinho: Bolas (101); Periquito (102)			

6.2 POZOLANICIDADE QUÍMICA DO CIMENTO

Os ensaios químicos de pozolonicidade dos cimentos foram feitos de acordo com a NBR 5753/92, cujos resultados estão apresentados na TAB. 6.13. Também constam na tabela, a classificação de cada cimento de acordo com os resultados obtidos e o índice de atividade pozolânica, proposto por Isaia (1985) – IAP*. Tal índice quantifica o ensaio químico de pozolanicidade, conforme comentado no item 3.4.4.

Pelos dados da TAB. 6.13 se constata o seguinte:

- todos os cimentos com 6% de substituição foram classificados como “não pozolânico”, independente da CCA e do tipo de moinho usados;
- para os cimentos com 10% de substituição, o comportamento entre as cinzas se diferenciou:
 - CCA0 - os cimentos produzidos com cinza submetidas aos beneficiamentos I e II foram classificados como “pozolânico”, enquanto para aqueles produzidos com CCA0 com beneficiamento III, o resultado foi função da granulometria. O C22 (CCA c/ maior granulometria - moinho de bolas) foi “não pozolânico” e o C27 (CCA c/ menor granulometria – moinho periquito) foi pozolânico;
 - CCA7 – os resultados variaram em função do tipo de moagem, ou seja, da granulometria da cinza, isto é, para diâmetros maiores (moinho de bolas) o resultado foi “não pozolânico” e para diâmetros menores (moinho periquito), foi “pozolânico”;
 - CCA9 – com beneficiamento I foi não pozolânico; com beneficiamento II, foi pozolânico e com beneficiamento III, o comportamento dependeu da granulometria: o C82 (CCA c/ maior granulometria - moinho de bolas) foi “não pozolânicos” e o C87 (CCA c/ menor granulometria – moinho periquito) foi pozolânico.
- para os percentuais de 15, 33 e 50% de substituição, todos os cimentos foram considerados como “pozolânicos”, independente da CCA e do moinho empregados, o que se justifica em função da maior quantidade de CCA;

TABELA 6.13 Resultados do ensaio de pozolanicidade química para os cimentos C1 a C90, por CCA

CCA 0					CCA 7					CCA 9				
Cimento	OH ⁻ (milimol/L)	CaO (milimol/L)	Resposta	IAP*	Cimento	OH ⁻ (milimol/L)	CaO (milimol/L)	Resposta	IAP*	Cimento	OH ⁻ (milimol/L)	CaO (milimol/L)	Resposta	IAP*
C1	62,01	7,82	NP	13,3	C31	63,21	8,71	NP	13,2	C61	61,80	7,46	NP	13,5
C2	59,26	6,65	P	13,8	C32	61,05	8,28	NP	13,7	C62	60,32	6,45	P	13,7
C3	53,54	5,24	P	15,4	C33	56,84	7,51	P	14,9	C63	57,14	6,05	P	14,3
C4	44,87	4,8	P	18,5	C34	44,42	5,56	P	18,9	C64	46,56	5,16	P	17,9
C5	33,86	1,81	P	23,6	C35	26,32	0,61	P	27,8	C65	37,67	3,10	P	21,7
C6	67,00	9,59	NP	12,3	C36	63,37	8,24	NP	13,2	C66	66,30	7,72	NP	12,3
C7	62,22	7,13	P	13,5	C37	58,74	5,28	P	13,5	C67	51,62	5,37	P	13,3
C8	56,88	6,57	P	14,7	C38	54,10	4,75	P	14,9	C68	50,00	2,43	P	14,9
C9	48,78	5,05	P	16,9	C39	42,10	2,03	P	18,5	C69	43,93	1,47	P	15,2
C10	14,57	0,00	P	50,0	C40	11,58	0,00	P	66,7	C70	26,11	0,00	P	17,2
C11	62,86	8,22	NP	13,3	C41	63,16	8,69	NP	13,0	C71	61,13	9,15	NP	13,5
C12	59,26	6,93	P	13,9	C42	61,68	8,41	NP	13,7	C72	59,51	8,56	NP	14,1
C13	54,81	5,32	P	14,7	C43	57,47	7,72	P	14,3	C73	56,68	7,56	P	14,9
C14	49,95	5,12	P	16,4	C44	46,52	6,33	P	18,2	C74	44,53	7,16	P	18,9
C15	43,17	4,31	P	18,9	C45	39,37	5,44	P	20,8	C75	39,07	6,88	P	20,8
C16	63,28	7,98	NP	13,2	C46	64,00	7,84	NP	12,8	C76	61,54	8,28	NP	13,5
C17	60,95	6,69	P	13,5	C47	58,31	5,60	P	13,9	C77	59,31	8,12	NP	14,1
C18	58,70	6,48	P	14,1	C48	54,10	4,91	P	15,2	C78	53,44	6,17	P	15,6
C19	41,69	3,99	P	20,0	C49	45,26	3,41	P	17,9	C79	43,32	4,78	P	19,2
C20	17,35	0,00	P	41,7	C50	21,68	0,00	P	32,3	C80	18,22	0,00	P	38,5
C21	61,59	8,62	NP	13,5	C51	62,31	8,41	NP	13,3	C81	66,19	8,64	NP	12,5
C22	59,05	8,26	NP	13,9	C52	58,74	8,49	NP	14,1	C82	61,74	8,36	NP	13,5
C23	50,65	6,23	P	16,4	C53	52,84	7,31	P	16,1	C83	59,11	7,68	P	13,9
C24	41,90	6,21	P	20,0	C54	41,27	5,48	P	20,0	C84	47,97	5,29	P	17,2
C25	27,94	3,63	P	29,4	C55	29,68	4,14	P	27,8	C85	36,44	2,79	P	21,7
C26	65,0	8,04	NP	12,7	C56	62,65	8,06	NP	13,3	C86	63,56	8,08	NP	13,0
C27	60,87	6,95	P	13,5	C57	58,62	7,50	P	14,1	C87	55,87	7,20	P	14,9
C28	51,74	5,35	P	14,7	C58	52,49	5,76	P	15,6	C88	54,25	6,97	P	15,4
C29	42,39	4,46	P	20,0	C59	39,37	5,44	P	20,8	C89	45,54	6,17	P	18,2
C30	17,83	0,00	P	41,7	C60	9,10	0,00	P	83,3	C90	32,79	5,21	P	26,3
REF.	67,5	7,5	NP											

IAP* - Índice de atividade pozolânica, segundo Isaia (1995)

- a combinação de percentual de 50% de substituição com emprego do moinho periquito (menor granulometria) gerou um resultado especial, qual seja, o teor de CaO foi zerado, para as cinzas mais amorfas, CCA0 e CCA7;
- quanto ao IAP*, nota-se que este índice cresceu com o percentual de substituição por CCA, tal como era esperado;
- O menor IAP* foi obtido pelos cimentos C6 (CCA 0, natural, periquito - 10%) e C66 (CCA9, natural, periquito – 10%) e correspondeu a um valor de 12,3;
- O maior IAP* foi de 83,3 e foi obtido pelo cimento C60 (CCA7, químico, periquito, 50%);

Pelos resultados, pode-se constatar que a reatividade da cinza está diretamente ligada à sua granulometria. Isto se verifica no comportamento das cinzas residuais CCA 7 e CCA9 que, num mesmo percentual de 10% de substituição, os cimentos são ora “não pozolânicos”, ora “pozolânicos”, de acordo com o moinho empregado ou, indiretamente, com a granulometria resultante da CCA. Outro resultado que comprova tal relação é o fato dos cimentos confeccionados com cinzas menos cristalinas (CCA0 e CCA7) e com 50% de substituição por CCA moída no periquito, portanto, com pequenos diâmetros, zerarem o teor de CaO.

Os gráficos das FIG. 6.13 a 6.15 apresentam os resultados dos ensaios plotados de acordo com o tipo de tratamento das cinzas. Tais gráficos não evidenciam mudanças entre o comportamento das CCA em função dos tratamentos.

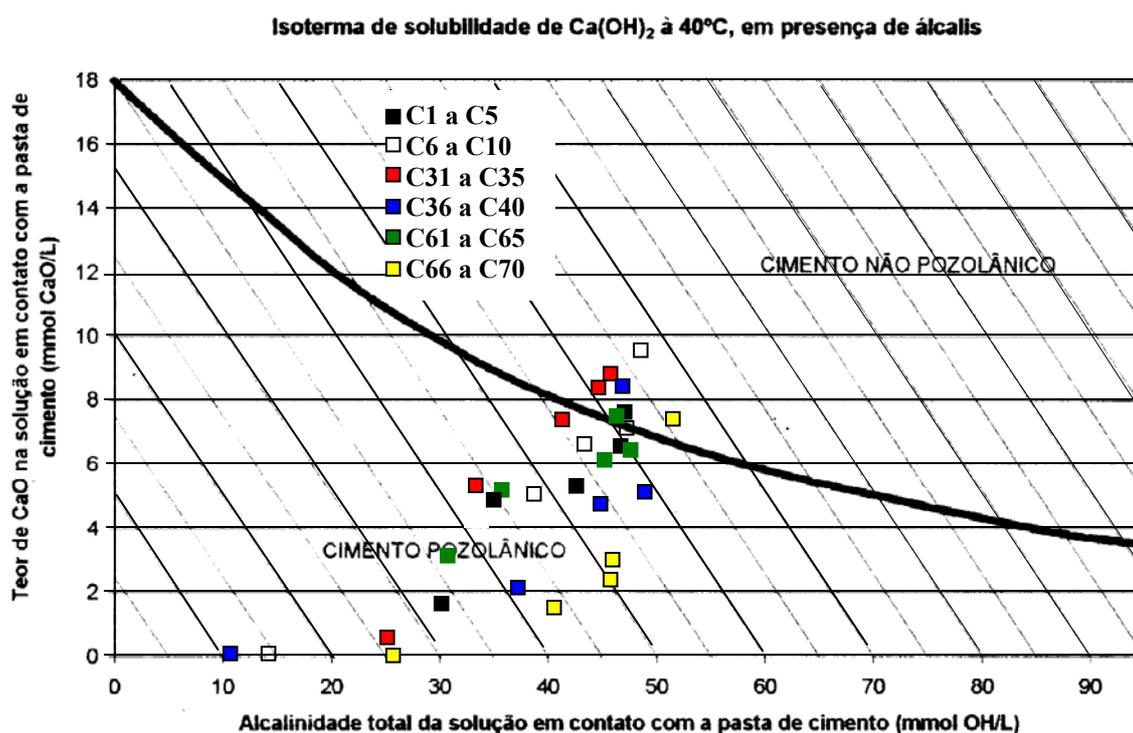


FIGURA 6.13 Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C1 a C30; C31 a C40 e C61 a C70, separados em função do beneficiamento I

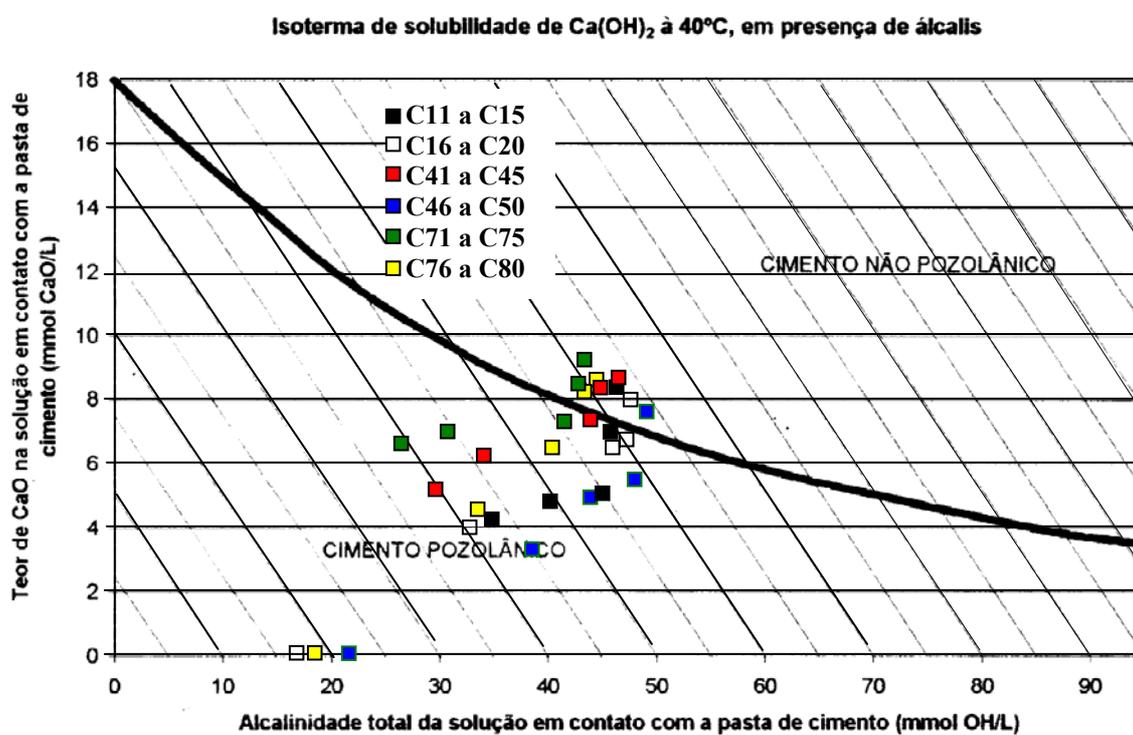


FIGURA 6.14 Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C11 a C20; C41 a C50 e C71 a C80, separados em função do beneficiamento II

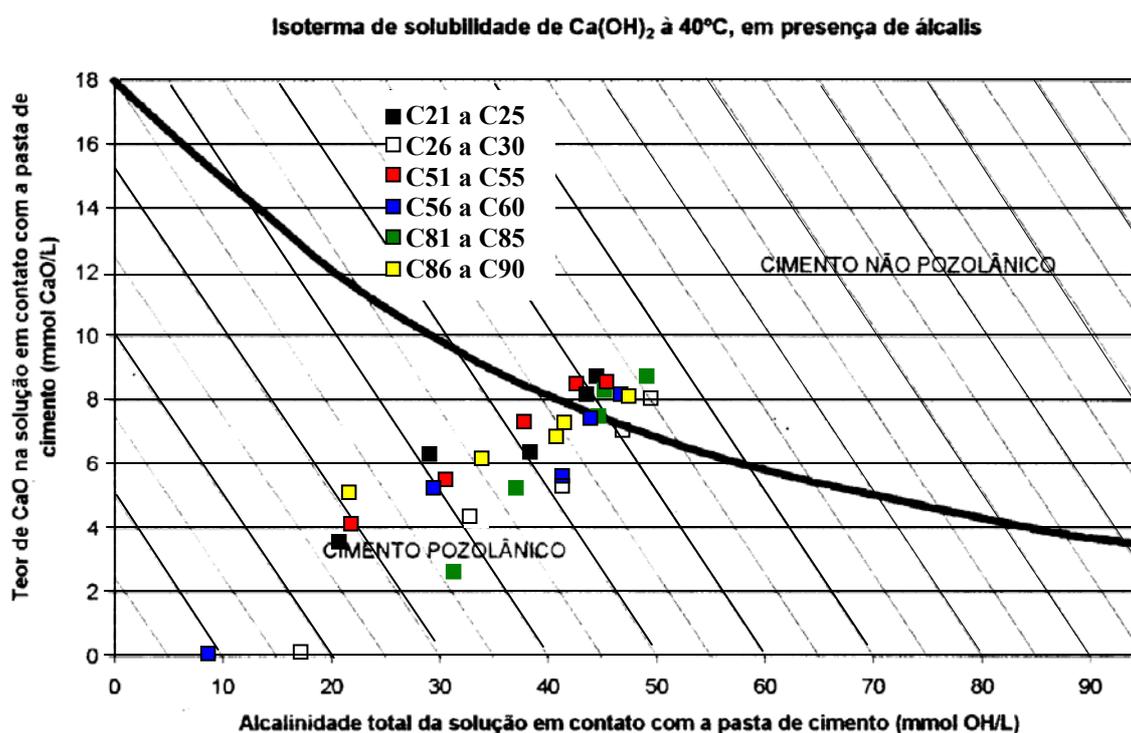


FIGURA 6.15 Resultados do ensaio de pozolanicidade química dos cimentos C1 a C30; C31 a C40 e C61 a C70, separados em função do beneficiamento III

Uma vez quantificado o ensaio químico de pozolanicidade pelo IAP* proposto por Isaia (1985), foi possível fazer uma avaliação estatística dos resultados a fim de confrontar os comportamentos dos fatores influentes na pozolanicidade com os dos resultados obtidos no ensaio do IAP pela NBR 5753.

Realizada uma análise de variância dos resultados do IAP*, considerando como variáveis independentes o tipo de cinza, tipo de tratamento, tipo de moinho e percentual de substituição, foi constatado que todos os fatores são significativos e as interações entre eles também o são. Este resultado é semelhante ao obtido na análise de variância com os resultados do IAP, determinado pela NBR 5752 (item 6.2.5.2).

A análise estatística indica que o percentual de substituição é o fator mais importante na pozolanicidade, o que era esperado, pois quanto mais pozolana presente na mistura, maior a pozolanicidade. Isaia (1995) também concluiu que os melhores desempenhos da cinza de casca de arroz quanto à durabilidade foram obtidos com os maiores teores dessa pozolana na mistura.

O tipo de moinho é o segundo fator mais influente, seguido pelo tipo de cinza e pelo tipo de beneficiamento, tal como nos resultados da análise estatística do IAP. A FIG. 6.16 apresenta um gráfico da variação do IAP* em função do percentual de substituição.

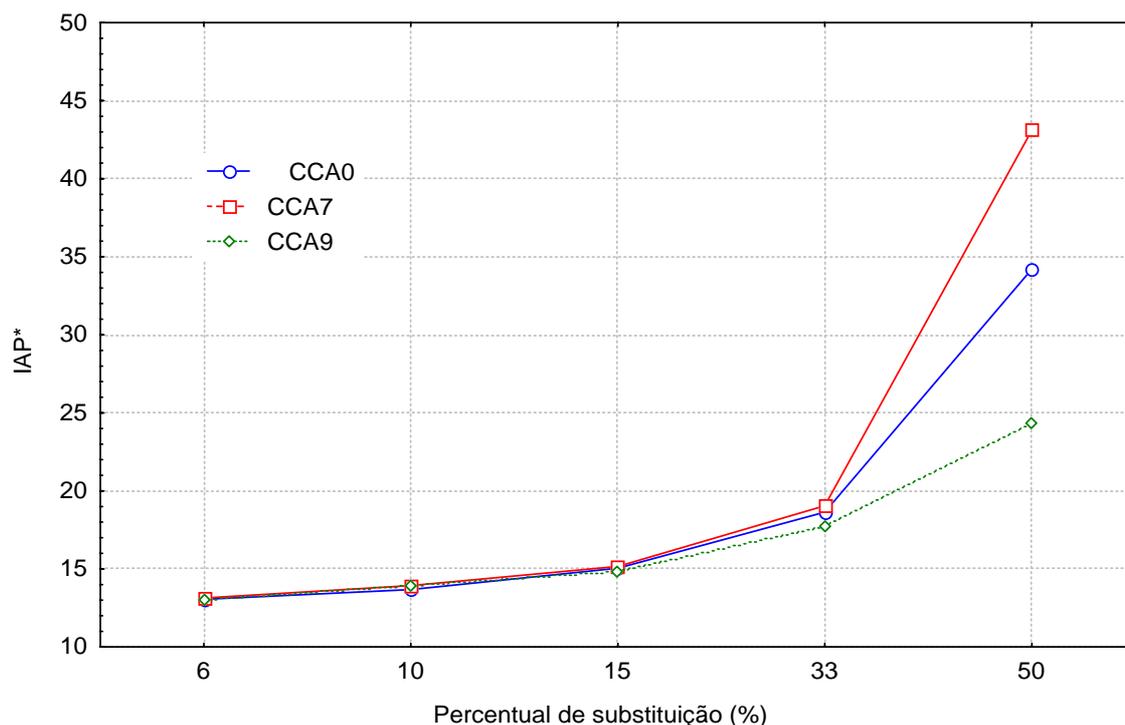


FIGURA 6.16 Variação do IAP* em função do percentual de substituição, para cada cinza.

A FIG. 6.16 mostra que, para baixos percentuais de substituição, até 15%, o comportamento das cinzas é semelhante. A partir deste valor, os tipos de cinza se distinguem, em termos de IAP*. Segundo este critério, a CCA9 é a cinza menos pozolânica, e a CCA7, a mais pozolânica. Este comportamento repete os resultados obtidos pelo IAP, no Cap. 5, conforme pode ser constatado na TAB. 6.14, onde constata-se que o índice determinado pela “NBR Alterada” altera o comportamento entre as cinzas CCA7 e CCA9.

TABELA 6.14 Comparação de valores médios de IAP determinados segundo a NBR 5752, “NBR 5752 Alterada” e Isaia (1995)

Índice de atividade pozolânica	Cinzas		
	CCA0	CCA7	CCA9
NBR 5752	89,6	99,7 - >	84,3 - <
“NBR 5752 Alterada”	108,6 >	106,8	91,3 - <
Isaia (1995)	18,9	20,9 >	16,8 - <

6.3 PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

A pasta de consistência normal foi determinada para viabilizar os ensaios de tempos de pega e de expansibilidade de Le Chatelier que são realizados com pasta com tal consistência. O ensaio foi realizado de acordo com as prescrições da NBR NM 43/2003. Os resultados obtidos como quantidade de água empregada e o respectivo percentual e espalhamento estão apresentados na TAB. 6.15, cujos dados indicam que:

- o cimento de referência exigiu 155,5 g de água no ensaio padronizado, gerando uma relação de água/cimento da pasta de 0,311;
- todos os cimentos, do C1 ao C90, apresentaram relação água/cimento superior à do cimento de referência, ou seja, maior que 0,311 para produzir pasta de consistência normal;
- o menor valor obtido foi de 0,312 para o cimento C6 e o maior, de 0,518 para o C15, ambos produzidos com CCA0, porém com diferentes tratamentos;
- o percentual da relação a/c aumentou com o aumento do percentual de substituição;
- a análise fatorial dos dados do percentual da relação água/cimentos das pastas indica que todos os fatores são significativos, bem como as interações entre eles. Os fatores aparecem na seguinte ordem de significância: percentual de substituição, tipo de moinho, tipo de beneficiamento e tipo de cinza;
- considerando valores médios, a cinza CCA0, o tratamento térmico e o moinho de bolas foram os que apresentaram maiores percentuais da relação a/c, enquanto a CCA9, o tratamento químico e o moinho periquito, os menores.

TABELA 6.15 Consistência normal da pasta de cimento

CCA0				CCA7				CCA9			
Cimento	Água (g)	Percentual (%)	Espalhamento (mm)	Cimento	Água (g)	Percentual (%)	Espalhamento (mm)	Cimento	Água (g)	Percentual (%)	Espalhamento (mm)
C1	163,0	32,6	5,0	C31	162,0	32,4	5,5	C61	163,2	32,6	5,5
C2	167,5	33,5	5,5	C32	167,0	33,4	5,5	C62	166,0	33,2	5,0
C3	176,8	35,4	6,0	C33	172,5	34,5	5,0	C63	176,0	35,2	5,5
C4	206,5	41,3	nr	C34	195,8	39,2	5,5	C64	194,0	38,8	7,0
C5	245,0	49,0	nr	C35	228,0	45,6	5,5	C65	220,0	44,0	5,0
C6	156,0	31,2	5,0	C36	163,8	32,8	5,5	C66	162,8	32,6	5,0
C7	163,0	32,6	5,0	C37	173,5	34,7	6,5	C67	166,0	33,2	5,0
C8	167,0	33,4	5,0	C38	175,0	35,0	6,0	C68	180,0	36,0	6,5
C9	183,0	36,6	7,0	C39	189,5	37,9	7,0	C69	201,5	40,3	6,0
C10	201,5	40,3	7,0	C40	205,0	41,0	7,0	C70	218,5	43,7	5,5
C11	166,3	33,3	7,0	C41	158,0	31,6	6,5	C71	162,0	32,4	7,0
C12	179,0	35,8	nr	C42	163,8	32,8	6,0	C72	168,0	33,6	nr
C13	186,8	37,4	6,0	C43	170,0	34,0	7,0	C73	174,5	34,9	5,0
C14	226,2	45,2	7,0	C44	199,0	39,8	7,0	C74	199,5	39,9	nr
C15	259,0	51,8	7,0	C45	234,0	46,8	7,0	C75	230,0	46,0	nr
C16	156,5	31,3	5,0	C46	160,3	32,1	6,0	C76	161,8	32,4	7,0
C17	162,0	32,4	7,0	C47	166,5	33,3	5,0	C77	166,0	33,2	5,0
C18	165,3	33,1	6,0	C48	169,5	33,9	5,0	C78	174,5	34,9	7,0
C19	191,0	38,2	6,0	C49	191,2	38,2	6,0	C79	198,0	39,6	5,5
C20	214,0	42,8	7,0	C50	205,8	41,2	6,5	C80	214,0	42,8	5,5
C21	165,0	33,0	7,0	C51	160,0	32,0	6,5	C81	162,4	32,5	7,0
C22	168,0	33,6	5,0	C52	165,0	33,0	6,0	C82	164,0	32,8	5,5
C23	156,0	31,2	6,5	C53	188,0	37,6	6,0	C83	172,2	34,4	5,0
C24	215,0	43,0	6,0	C54	199,5	39,9	5,0	C84	189,0	37,8	5,0
C25				C55	237,0	47,4	5,5	C85	209,5	41,9	7,0
C26	156,0	31,2	7,0	C56	157,8	31,6	6,5	C86	160,2	32,0	5,0
C27	163,5	32,7	7,0	C57	163,0	32,6	5,5	C87	163,8	32,8	7,0
C28	169,0	33,8	5,0	C58	170,0	34,0	6,0	C88	169,8	34,0	6,0
C29	184,0	36,8	6,0	C59	199,0	39,8	7,0	C89	192,0	38,4	5,0
C30				C60	227,0	45,4	6,0	C90	205,0	41,0	5,0
REF.	155,5	31,1	6,0								

OBS: nr – valor não registrado, por esquecimento.

Os gráficos das FIG. 6.17 e 6.18 foram montados com o propósito de visualizar a influência do tipo de cinza em relação aos demais fatores que estão sendo avaliados (tipo de beneficiamento, percentual de substituição e tipo de moinho) na demanda de água para pasta de consistência normal.

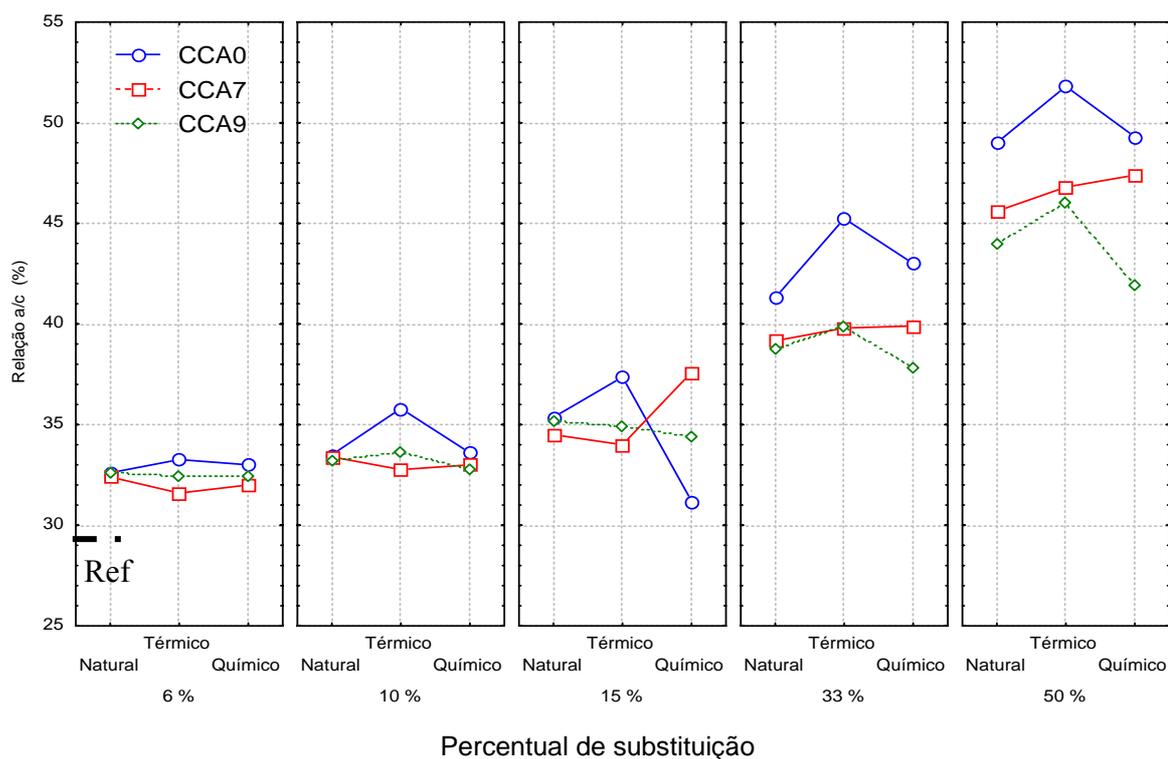


FIGURA 6.17 Comportamento da relação a/c das pastas de cimento em função do tipo de cinza, tipo de beneficiamento e percentual de substituição para CCA moídas no moinho de bolas

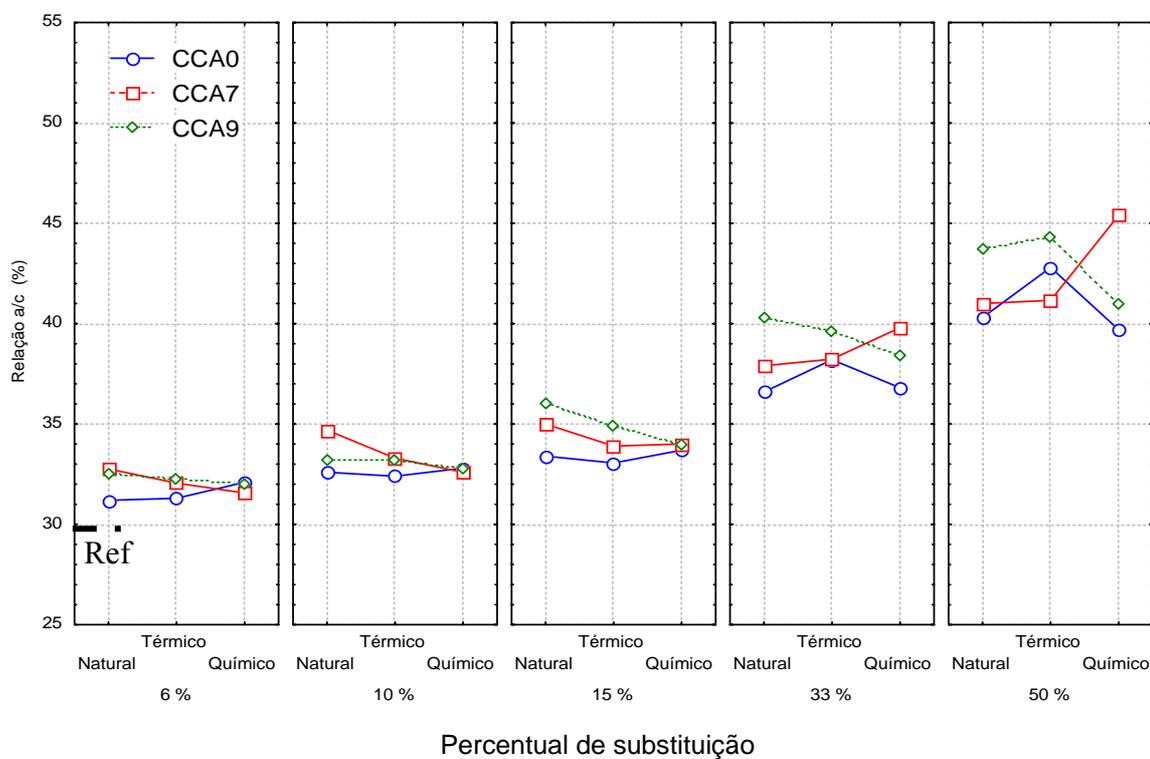


FIGURA 6.18 Comportamento da relação a/c das pastas de cimento em função do tipo de cinza, tipo de beneficiamento e percentual de substituição para CCA moídas no moinho periquito

Os gráficos das FIG. 6.17 e 6.18 mostram um comportamento diferenciado da cinza CCA0 em relação ao tipo de moinho. Com maior granulometria, decorrente do processamento no moinho de bolas, ela é a cinza que apresentou maiores percentuais da relação a/c para a pasta de consistência normal, enquanto no moinho periquito ocorre o contrário, ou seja, exigiu menos água. Tais resultados estão de acordo com os encontrados por Guedert (1989).

Nestes gráficos também fica evidente o acréscimo da relação a/c em função do aumento do percentual de substituição, independente do tipo de cinza, tipo de tratamento e tipo de moinho.

6.4 TEMPOS DE PEGA

Os ensaios de tempos de pega foram realizados conforme a NBRNM 65/2003.

6.4.1 Resultados obtidos

Os resultados obtidos estão apresentados na TAB. 6.16, onde constam os tempos de início e fim de pega e a diferença entre eles, em horas e minutos. Os dados mostram que:

- dos 54 cimentos avaliados, somente um registrou tempo de início de pega inferior ao do cimento de referência, um apresentou valor igual e os demais, superior;
- o menor tempo de início de pega registrado foi de uma hora e quarenta e quatro minutos, do C29. O C40 se igualou ao de referência e o maior tempo de início de pega foi de seis horas e trinta minutos, dos cimentos C70 e C75, ambos produzidos com a CCA9;
- em relação ao tempo de fim de pega, três cimentos, o C23 e C29 e C54 registraram valores menores do que o de referência, de quatro horas e trinta e oito minutos;

TABELA 6.16 Tempos de pega: início, fim e diferença entre eles.

CCA0				CCA7				CCA9			
Cimento	Tempos de pega			Cimento	Tempos de pega			Cimento	Tempos de pega		
	Início	Fim	diferença		Início	Fim	diferença		Início	Fim	diferença
C2	3:48	5:29	1:43	C32	3:38	5:13	1:35	C62	2:45	6:00	3:15
C4	5:08	7:49	2:41	C34	4:45	6:10	1:25	C64	4:30	6:00	2:30
C5	4:37	6:45	2:08	C35	4:47	6:27	1:40	C65	4:40	6:40	2:00
C7	3:01	4:46	1:45	C37	3:45	5:35	1:50	C67	4:31	6:46	2:15
C9	2:57	5:02	2:05	C39	3:15	5:45	2:30	C69	4:36	7:36	3:00
C10	3:46	6:04	2:18	C40	2:10	6:00	3:50	C70	6:30	7:30	1:00
C12	4:02	5:47	1:45	C42	2:43	5:28	2:45	C72	3:56	5:31	1:35
C14	3:16	5:26	2:10	C44	3:53	5:58	2:05	C74	5:16	8:01	2:45
C15	3:56	6:06	2:10	C45	4:04	6:09	2:05	C75	6:30	9:50	3:20
C17	2:31	4:55	2:24	C47	3:13	5:58	2:45	C77	2:57	5:14	2:17
C19	3:18	6:54	3:36	C49	3:46	5:31	1:45	C79	4:12	6:42	2:30
C20	3:50	8:32	4:42	C50	3:09	5:48	2:39	C80	3:12	5:30	2:18
C22	3:45	6:00	2:15	C52	3:42	6:12	2:30	C82	2:34	4:43	2:09
C23	3:02	4:23	1:21	C54	3:00	4:35	1:35	C84	2:37	5:25	2:48
C24	3:15	5:33	2:18	C55	4:23	5:03	0:40	C85	2:35	5:35	3:00
C27	2:45	5:50	3:05	C57	2:43	5:08	2:25	C87	2:54	4:39	1:45
C28	2:40	5:25	2:45	C59	3:05	5:18	2:15	C89	3:10	4:45	1:35
C29	1:44	4:00	2:16	C60	4:10	6:35	2:25	C90	3:20	4:55	1:35
REF.	2:10	4:38	2:28								

- o maior tempo de fim de pega obtido foi de nove horas e cinquenta minutos, do C75, confeccionado com CCA9, submetida ao beneficiamento II e moída em moinho de bolas;
- quanto à diferença entre o início e o fim de pega, o cimento de referência registrou duas horas e vinte e oito minutos. Aproximadamente, 70% dos cimentos avaliados registraram valor inferior a este e os restantes 30 %, superior.
- considerando valores médios, a CCA9 foi a que teve tempo de início de pega maior e a CCA0, menor;
- os beneficiamentos II e III reduziram o início de tempo de pega em relação ao do cimento de referência, sendo que o III registrou os valores mais baixos;
- quanto à granulometria das cinzas, as mais finas, oriundas do processo de moagem no periquito, registraram um tendência de redução do início de tempo de pega em relação ao do cimento de referência;
- o início do tempo de pega cresceu com o percentual de substituição por CCA empregado;

Os gráficos das FIG. 6.19 a 6.21 ilustram o comportamento dos fatores intervenientes no início de tempo de pega.

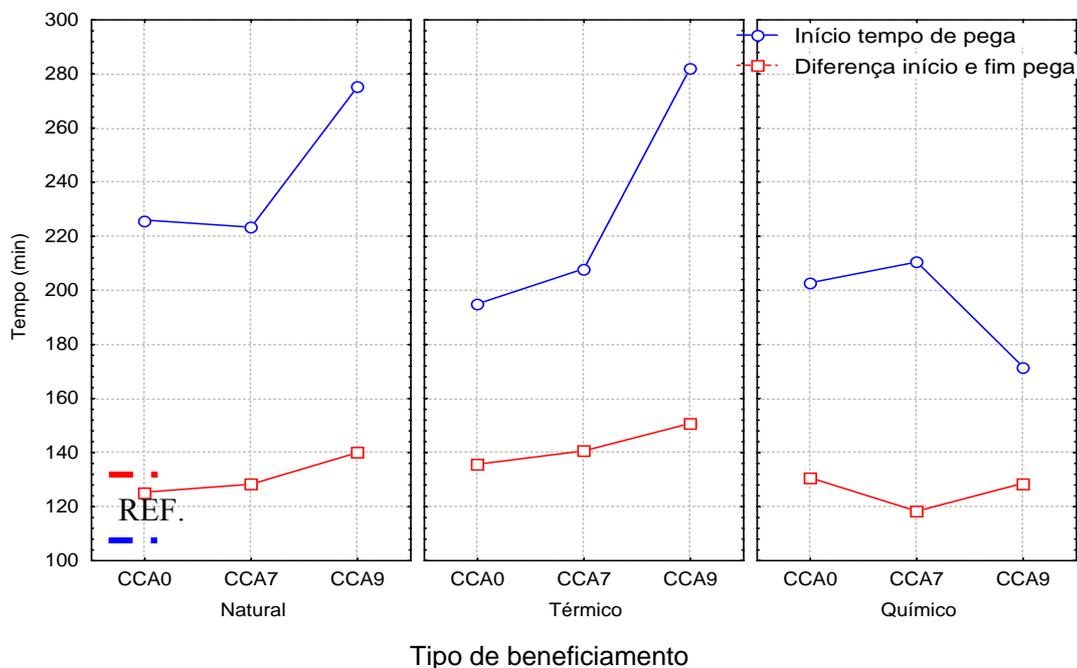


FIGURA 6.19 Início do tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao tipo de beneficiamento

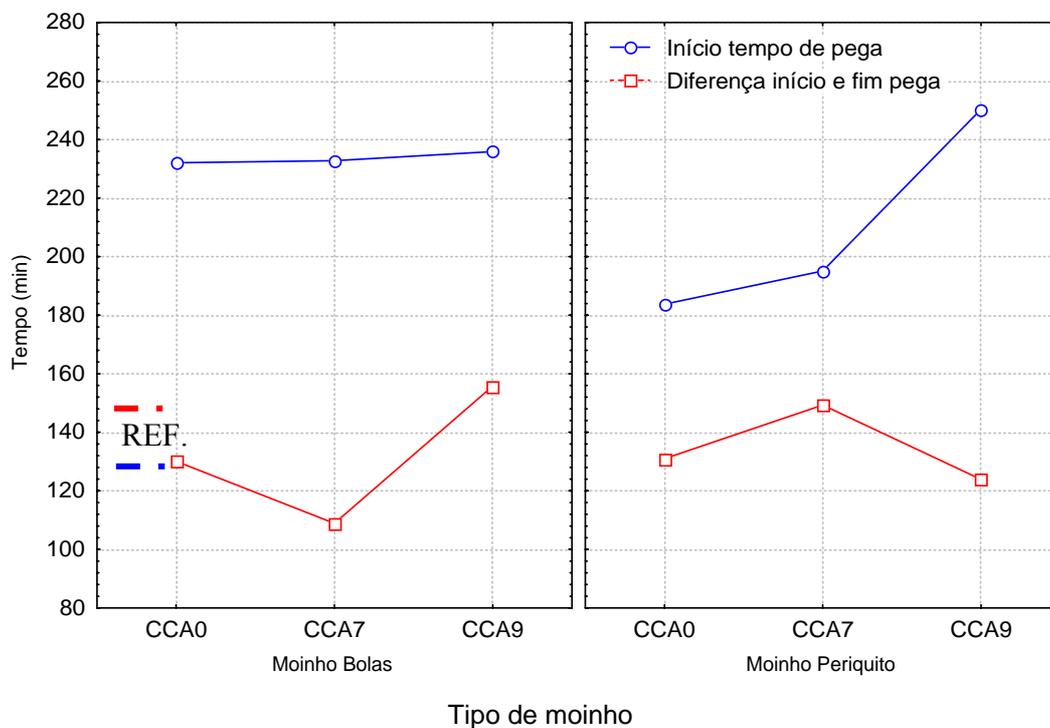


FIGURA 6.20 Início de tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao tipo de moinho

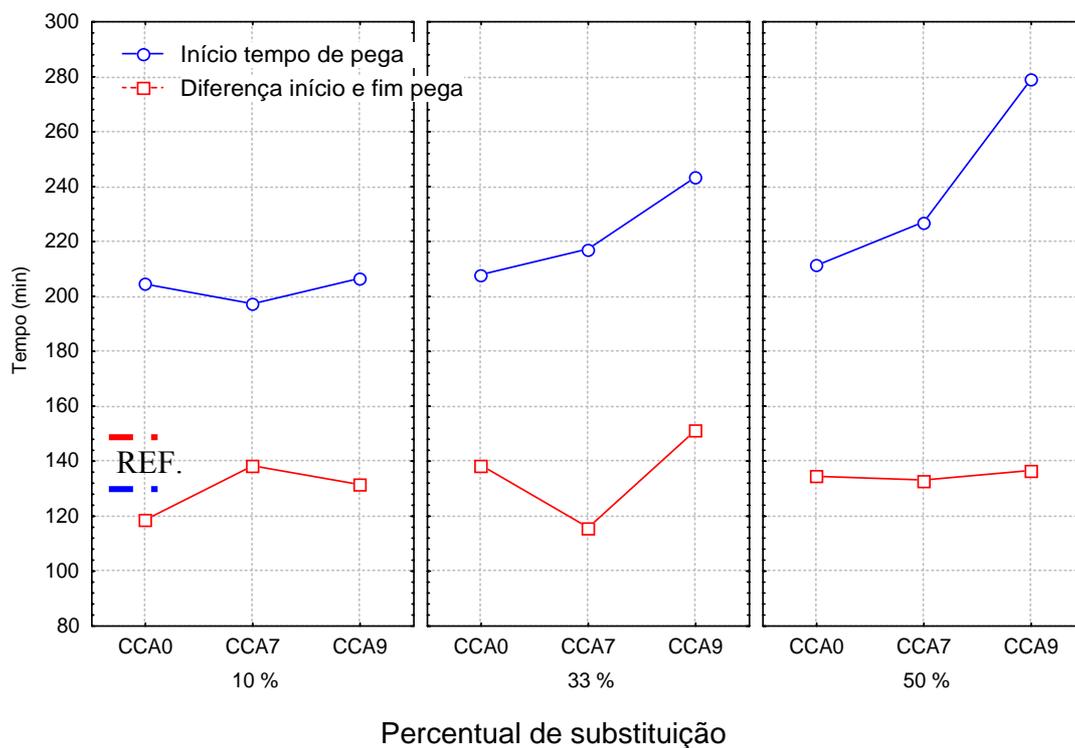


FIGURA 6.21 Início de tempo de pega: comportamento do fator tipo de cinza em relação ao percentual de substituição

No gráfico da FIG. 6.19 fica evidente o efeito do tipo de tratamento na redução de tempo de pega, principalmente para a CCA9 com tratamento químico. Nota-se também que os intervalos entre o início e o fim de pega são menores que o de referência; o tratamento térmico é o que tem menores reduções.

Observa-se na FIG. 6.20 que os cimentos produzidos com as cinzas moídas no moinho de bolas obtiveram, praticamente, o mesmo tempo de início de pega, enquanto no moinho periquito, há uma redução deste tempo, com exceção dos cimentos confeccionados com CCA9. Quanto ao intervalo entre o início e final de pega, somente os cimentos produzidos com CCA9 processada no moinho de bolas supera o valor de referência.

O gráfico da FIG. 6.21 evidencia o crescimento do início do tempo de pega com o percentual de substituição, assim como com as cinzas da CCA0 para a CCA7 e CCA9.

6.5 EXPANSIBILIDADE DE LE CHATELIER

Os ensaios de expansibilidade a quente com as agulhas de Le Chatelier foram executados de acordo com a NBR 11582/91. Foram avaliados os 90 cimentos produzidos com CCA beneficiada e mais o cimento de referência. Os resultados obtidos correspondem à média de três determinações, sendo expressos em milímetros, com aproximação de 0,5 mm e estão apresentados na TAB. 6.17

Os resultados de expansibilidade a quente obtidos para todos os cimentos, inclusive o de referência, são inferiores a 5 mm, limite máximo determinado nas normas NBR 5736/91 (Cimento Portland pozolânico) e NBR 11578/91 (Cimento Portland composto). Portanto, todos os cimentos avaliados atendem este requisito.

Os resultados mostrados na TAB. 6.17 indicam três tendências, quais sejam:

- cinzas em estado natural tendem a gerar maior valor de expansibilidade do que as cinzas tratadas (C1 a C10, CC31 a 40 e C61 a C70);
- cinzas com granulometria mais fina tendem a reduzir a expansibilidade, o que fica evidente pelos menores valores obtidos pelo cimentos produzidos com cinzas processadas em moinho periquito (C6 a C10, C16 a C20, C26 a C30, C36 a C40, C46 a C50, C56 a C60, C66 a C70, C76 a C80 e C86 a C90);
- os menores percentuais de substituição, de até 15%, tendem a gerar maiores valores de expansibilidade do que os percentuais mais elevados de 33 e 50%.

Cabe salientar que estas observações são apenas tendências, já que, estatisticamente, nada ficou provado e que os valores de expansibilidade registrados são muito baixos e dentro do limite máximo aceitável pelas normas brasileiras.

TABELA 6.17 Resultados obtidos no ensaio de expansibilidade de Le Chatelier, a quente

CCA 0		CCA 7		CCA 9	
Cimento	Expansibilidade (mm)	Cimento	Expansibilidade (mm)	Cimento	Expansibilidade (mm)
C1	1,0	C31	0,5	C61	1,0
C2	0,5	C32	1,5	C62	1,0
C3	0,5	C33	1,0	C63	1,0
C4	0,5	C34	1,0	C64	0,5
C5	0,5	C35	0,5	C65	0,0
C6	0,0	C36	0,0	C66	0,5
C7	0,5	C37	0,0	C67	0,5
C8	0,0	C38	0,5	C68	1,5
C9	0,0	C39	0,0	C69	0,5
C10	0,0	C40	0,0	C70	0,5
C11	0,0	C41	1,0	C71	0,0
C12	1,0	C42	0,0	C72	0,5
C13	0,0	C43	0,5	C73	0,5
C14	0,0	C44	0,0	C74	0,0
C15	0,5	C45	0,0	C75	0,0
C16	0,0	C46	0,0	C76	0,5
C17	0,5	C47	0,5	C77	0,5
C18	0,0	C48	0,0	C78	1,0
C19	0,0	C49	1,0	C79	0,0
C20	0,0	C50	0,5	C80	0,0
C21	0,0	C51	0,5	C81	1,0
C22	0,0	C52	0,0	C82	0,5
C23	0,0	C53	0,5	C83	0,0
C24	0,5	C54	0,0	C84	0,5
C25		C55	0,0	C85	1,0
C26	1,0	C56	1,5	C86	0,0
C27	0,5	C57	0,0	C87	0,0
C28	0,0	C58	0,5	C88	0,0
C29	0,0	C59	0,0	C89	0,5
C30		C60	0,0	C90	1,0
REF.	1,0				

6.6 QUADRO RESUMO DAS PROPRIEDADES DOS CIMENTOS

Para cada um dos 90 cimentos, foi elaborada uma ficha-resumo contendo os resultados das propriedades avaliadas, onde consta:

- na parte superior: identificação do cimento e características da cinza beneficiada constituinte;
- na parte central: dados quanto à resistência à compressão, com tabela com médias de resistência para cada idade avaliada e o respectivo desvio padrão relativo, além do gráfico em função da idade, com plotagem dos dados, curva de ajuste e o coeficiente de determinação, respectivos. Os valores com * são estimados pela curva de ajuste, os demais são experimentais;
- na parte inferior: resultados dos ensaios de pozolanicidade química, consistência normal, expansibilidade a quente e tempos de pega;
- na parte lateral esquerda (horizontal): classificação do cimento quanto a estas exigências avaliadas.

A fim de facilitar a identificação das fichas-resumo, os cimentos produzidos com cinza com tratamento natural são apresentados em quadros com detalhes em cor amarela e aqueles com tratamento térmico e químico, respectivamente nas cores cinza e azul. As fichas-resumo estão apresentadas no Anexo V.

A TAB. 6.18 apresenta um quadro-resumo com dados relativos ao IAP das cinzas e dos cimentos, em termos de pozolanicidade e de diferença percentual entre a resistência à compressão individual e a do cimento de referência aos 28 dias.

TABELA 6.18 – Tabela-resumo de classificação dos cimentos produzidos com cinza de casca de arroz

Beneficiamento		Percentual Substituição	Cinza de casca de arroz – CCA											
Tratamento	Moinho		CCA 0 (amorfa)				CCA 7 (residual menos cristalina)				CCA 9 (residual mais cristalina)			
			IAP	Cimento	POZ	Δ fc28 (%)	IAP	Cimento	POZ	Δ fc28 (%)	IAP	cimento	POZ	Δ fc28 (%)
I Natural	Bolas	6	$\geq 75\%$	C 1	NP	-3,3	$\geq 75\%$	C 31	NP	-1,7	$< 75\%$	C 61	NP	1,9
		10		C 2	P	8,1		C 32	NP	11,6		C 62	P	5,1
		15		C 3	P	8,9		C 33	P	1,1		C 63	P	-1,1
		33		C 4	P	-1,3		C 34	P	-3,7		C 64	P	-17,5
		50		C 5	P	-20,1		C 35	P	-8,2		C 65	P	-39,8
	Periquito $\phi_{50\%} < 6 \mu\text{m}$	6	$\geq 75\%$	C 6	NP	14,6	$\geq 75\%$	C 36	NP	3,5	$\geq 75\%$	C 66	NP	4,1
		10		C 7	P	21,4		C 37	P	14,2		C 67	P	7,1
		15		C 8	P	21,2		C 38	P	14,6		C 68	P	2,3
		33		C 9	P	13,5		C 39	P	21,2		C 69	P	5,4
		50		C 10	P	13,0		C 40	P	2,9		C 70	P	-15,4
II Térmico	Bolas	6	$< 75\%$	C 11	NP	-2,7	$\geq 75\%$	C 41	NP	4,0	$\geq 75\%$	C 71	NP	-7,3
		10		C 12	P	-3,5		C 42	NP	5,1		C 72	NP	-4,8
		15		C 13	P	-0,3		C 43	P	-2,6		C 73	P	2,4
		33		C 14	P	-20,9		C 44	P	-3,9		C 74	P	-9,2
		50		C 15	P	-47,0		C 45	P	-19,6		C 75	P	-29,4
	Periquito $\phi_{50\%} < 6 \mu\text{m}$	6	$\geq 75\%$	C 16	NP	4,9	$\geq 75\%$	C 46	NP	0,0	$\geq 75\%$	C 76	NP	-2,8
		10		C 17	P	7,7		C 47	P	-3,7		C 77	NP	-1,4
		15		C 18	P	1,6		C 48	P	9,2		C 78	P	11,0
		33		C 19	P	20,3		C 49	P	12,0		C 79	P	-4,5
		50		C 20	P	2,8		C 50	P	-24,6		C 80	P	-15,5
III Químico	Bolas	6	$< 75\%$	C 21	NP	5,4	$\geq 75\%$	C 51	NP	2,5	$\geq 75\%$	C 81	NP	-1,0
		10		C 22	NP	-6,7		C 52	NP	3,2		C 82	NP	-0,9
		15		C 23	P	3,4		C 53	P	0,8		C 83	P	-20,0
		33		C 24	P	-0,9		C 54	P	-4,9		C 84	P	-7,5
		50		C 25	P	-15,3		C 55	P	-19,2		C 85	P	-24,3
	Periquito $\phi_{50\%} < 6 \mu\text{m}$	6	$\geq 75\%$	C 26	NP	5,3	$\geq 75\%$	C 56	NP	7,6	$\geq 75\%$	C 86	NP	6,3
		10		C 27	P	5,1		C 57	P	15,1		C 87	P	11,6
		15		C 28	P	14,0		C 58	P	12,2		C 88	P	10,3
		33		C 29	P	10,6		C 59	P	17,0		C 89	P	12,2
		50		C 30	P	11,3		C 60	P	5,8		C 90	P	-1,4

CAPÍTULO 7

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, além das conclusões do trabalho, também são apresentadas sugestões para futuras pesquisas que venham a complementar o estudo sobre a aplicação da cinza de casca de arroz na produção de cimento e outras aplicações na construção civil.

7.1 CONCLUSÕES PARCIAIS

As conclusões apresentadas neste capítulo são baseadas nos resultados do programa experimental desenvolvido e nas análises feitas ao longo do trabalho. Tais conclusões são válidas para os materiais empregados e nas condições experimentais realizadas.

7.1.1 Do levantamento da quantidade e características da cinza de casca de arroz residual produzida na região de Pelotas/RS

- Pelotas/RS é realmente um pólo beneficiador de arroz, industrializando cerca de 650 mil toneladas por ano, resultando aproximadamente 150 mil toneladas de casca de arroz;
- a casca de arroz é largamente empregada como fonte de energia, nos engenhos e em outras indústrias da região, resultando aproximadamente 35 mil toneladas de cinza de casca de arroz, por ano;
- do total de CCA produzida na região, 25% é incorporado ao produto fabricado na indústria e o restante é um resíduo sem outra destinação que não o descarte no meio ambiente. Isto dá a dimensão do problema ambiental, afinal são cerca de 26 mil toneladas por ano;

- a grelha é o sistema de queima mais empregado, totalizando 71% do volume de casca queimada. A grelha fixa, que representa 39% do total, é a mais empregada;
- a maior parte da cinza (53%) é escoada por via úmida, o que minimiza a poluição dos ambientes de trabalho, mas encarece a reciclagem futura;

7.1.2 Dos tratamentos físicos propostos

- entre os cinco diferentes equipamentos de moagem testados, quatro deles (moinhos periquito, agitador e planetário e a micronização), possibilitaram a obtenção de diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm , em tempo igual ou inferior a duas horas;
- o moinho de bolas apresentou comportamento diferenciado dos demais equipamentos testados, exigindo quatro vezes mais tempo do que o moinho planetário ou o micronizador, para obter diâmetros (50% passante) entre 5 e 8 μm ;
- embora tenham sido realizadas várias e diferentes tentativas, a moagem a úmido não se mostrou viável, devido à dificuldade em encontrar a quantidade ideal de água para executar o processo de forma adequada.

7.1.3 Dos tratamentos térmicos propostos

- os tratamentos TT0 (calcinação a 400°C, por períodos de 6, 9 e 12 horas) e TT1 (calcinação a 600°C, por 3 horas), se mostraram viáveis, pois tornaram as cinzas mais claras, sem tornar cristalinas as cinzas amorfas;
- os tratamentos TT2 e TT3, ambos com temperatura de 1100°C, foram os que tornaram as cinzas mais claras, porém também as tornaram cristalinas;
- o tratamento TT4, choque térmico com emprego de uma pistola Metco 5P, não se mostrou adequado para o emprego de qualquer tipo de cinza. As cinzas cristalinas não apresentaram fluidez suficiente para serem aspergida pela pistola, inviabilizando o processo;
- resumidamente, tratamentos térmicos testados com temperaturas inferiores a 600°C se mostraram indicados para clarear a CCA, sem cristalinizar as partículas amorfas.

7.1.4 Dos tratamentos químicos propostos

- entre os tratamentos químicos testados, os banhos com HCl resultaram em cinzas mais claras;
- as diferentes concentrações testadas (5,6N; 3N; 1N) da solução de HCl não produziram diferenças significativas na coloração das cinzas;
- a lavagem das cinzas após banho químico é importante na eliminação de resíduos de ácido nas amostras;
- o tratamento químico selecionado foi o banho com solução de 1N HCl, por uma hora, seguido de várias lavagens (até pH = 7) e secagem em estufa a 100°C.

7.1.5 Do Experimento preliminar I

- embora com composições granulométricas semelhantes, as cinzas CCA0 (amorfa) e CCA8 (cristalina) apresentaram comportamentos distintos quanto à resistência à compressão e, portanto, em relação ao IAP. Certamente, tal diferença está associada às suas diferentes composições mineralógicas;
- a cinza CCA0 foi considerada uma pozolana, segundo critério da NBR12653, por apresentar IAP superior a 75%, chegando, inclusive, a ultrapassar o valor de referência;
- a cinza CCA8 não pode ser considerada uma pozolana, segundo o critério de NBR 12653, pois seu IAP não atingiu o limite mínimo de 75%;
- a micronização e a moagem em moinho periquito são processos cujos desempenhos não diferem entre si, quando comparados pelo critério do IAP de cinzas de casca de arroz com composições granulométricas semelhantes.

7.1.6 Do Experimento preliminar II

- entre os três moinhos empregados – de bolas, agitador e periquito – o moinho de bolas tem comportamento diferenciado dos outros dois, considerando o IAP das cinzas testadas como resposta;
- os moinhos agitador e periquito não se diferenciam entre si, quando o critério de comparação é o IAP. Ambos produziram diâmetros (50% passante) inferiores a 10 μm , independente das cinzas e dos tempos de moagem empregados;
- no moinho de bolas, o tempo de moagem de 120 minutos correspondeu aos valores mais elevados de resistência à compressão.

7.1.7 Das cinzas tratadas e suas pozolanicidades

- em termos de características físicas das cinzas, os tratamentos aplicados resultaram nos seguintes comportamentos:
 - não alteram a composição mineralógica das cinzas;
 - alteram a área superficial das cinzas de maneira significativa, sendo que o tratamento térmico resultou em maior redução;
 - as cinzas tratadas tornaram-se mais claras; sendo o tratamento químico o mais eficiente;
 - no moinho periquito, a energia aplicada pela rotação e os tempos adotados eliminaram as diferenças entre os tipos de cinzas e tipos de tratamentos;
 - no moinho de bolas, os tipos de cinzas e tratamentos se refletem no resultado dos diâmetros obtidos;
- quanto à composição química das cinzas:
 - o tratamento químico registrou aumento do teor de sílica, atingindo percentual máximo de 98,05%, e redução dos percentuais de impurezas como potássio e fósforo;
 - o tratamento térmico também registrou aumento nos teores de sílica e redução de impurezas, porém inferiores aos do tratamento químico;

- todas as diferentes amostras beneficiadas de CCA (18 amostras) registraram percentual de água requerida dentro do limite estabelecido pela NBR 12653/92, sendo, portanto, consideradas pozolanas em relação a este requisito;
- quando considerando o IAP pela NBR 5752, somente três das cinzas beneficiadas não atingiram valor superior a 75%: CCA0, beneficiamento II, moinho de bolas; CCA0, beneficiamento III, moinho de bolas; CCA9, beneficiamento I, moinho de bolas;
- quando considerado o IAP pela “NBR 5752/92 Alterada”, todas as cinzas beneficiadas atingiram $IAP \geq 75\%$, portanto, todas seriam consideradas pozolanas;
- quando considerando o IAP pela NBR 5752, os fatores tipo de cinza, tipo de tratamento e tipo de moinho são significativos em relação à resistência à compressão e ao percentual de água requerida, bem como a interação entre eles. Todos os níveis destes fatores, em relação à resistência à compressão, diferem entre si.
- quando considerado o IAP pela “NBR 5752/92 Alterada”, o fator tipo de beneficiamento não é significativo em relação à resistência à compressão, assim como a interação entre ele e o fator tipo de moinho. Os fatores tipo de cinza e tipo de moinho são significativos e seus respectivos níveis diferem entre si;
- quando considerando o IAP, pela NBR 5752:
 - a cinza CCA7 foi a que registrou maior resistência à compressão e, portanto maior IAP, seguida pela CCA0 e pela CCA9;
 - o tratamento III foi o que assinalou maior resistência à compressão, seguido pelo II e com menores valores, o I;
 - o moinho periquito registrou melhor desempenho do que o moinho de bolas, evidenciando a importância da granulometria da CCA em sua pozolanidade;
- quando considerado o IAP pela “NBR 5752/92 Alterada”:
 - a cinza CCA0 foi a que registrou maior resistência à compressão e, portanto maior IAP, seguida pela CCA7 e pela CCA9, porém, estatisticamente, não há diferença entre as cinzas CCA 0 e CCA7;

- estatisticamente, o tipo de beneficiamento não é significativo, portanto, os beneficiamentos I, II e III não se diferenciam;
- o moinho periquito registrou melhor desempenho do que o moinho de bolas, evidenciando a importância da granulometria da CCA em sua pozolanicidade;
- o IAP determinado pela NBR 5752 é influenciado pela variação da relação água/aglomerante, refletindo-se nos resultados, já que esta relação é determinante na resistência à compressão;
- o IAP determinado pela “NBR 5752 Alterada” torna os resultados mais justos, quando o objetivo é comparar comportamentos, pois é eliminada a importante influência da variação da relação água/aglomerante com o emprego de aditivo superplastificante, cuja utilização já vem sendo largamente empregada.

7.1.8 Da resistência à compressão dos cimentos

- todos os fatores considerados – tipo de cinza, tipo de beneficiamento, tipo de moinho, percentual de substituição e idade – influenciam de forma significativa na resistência à compressão;
- nas primeiras idades de 3 e 7 dias, o cimento de referência supera a média dos cimentos com CCA, praticamente se igualando aos 28 dias. Em idades mais avançadas, como 91 dias, os cimentos com CCA superam o de referência, evidenciando a ação pozolânica;
- a granulometria das cinzas influencia na resistência à compressão dos cimentos, ficando evidente que diâmetros menores, obtidos pelo moinho periquito, resultaram em resistência mais elevada que aquelas pelas cinzas moídas no moinho de bolas
- o percentual de substituição por CCA é um fator também significativo. Os valores mais elevados de resistência à compressão foram obtidos com o percentual de 10 % de substituição para as cinzas residuais, CCA& e CCA9 e, ‘15% para a CCA0;
- entre os beneficiamentos, o I (físico – noagem) foi o que resultou em valores mais elevados de resistência à compressão, enquanto o beneficiamento II (térmico), os mais baixos.

- a interação tipo de beneficiamento e percentual de substituição mostra que percentuais baixos de até 15 %, o beneficiamento I resulta em resistência à compressão mais elevada. Já para percentuais maiores, como 50%, o beneficiamento III se mostra mais eficiente;
- entre os tipos de CCA avaliadas, a CCA0 (amorfa) apresenta os melhores resultados quanto consideradas idades mais avançadas, como 91 dias e quanto menor for a granulometria (moinho periquito). A CCA7 (residual, menos cristalina) apresenta melhores resultados nas primeiras idades (até 28 dias) e com granulometria maiores (moinho de bolas). A cinza CCA9 (residual, mais cristalina), na média, tem desempenho inferior as demais;

7.1.9 Da pozolanicidade química do cimento

- todos os cimentos com 6% de substituição foram classificados como não pozolânicos;
- todos os cimentos com 15, 33 e 50% de substituição foram classificados pozolânicos;
- a classificação dos cimentos com 10% de substituição variou em função do tipo de cinza, tipo de tratamento e granulometria;
- o índice de atividade pozolânica proposto por Isaia (IAP*) possibilita quantificar o ensaio de pozolanicidade química.

7.1.10 Dos tempos de pega

- todos os cimentos avaliados registraram início do tempo de pega superior ou igual ao do cimento de referência, indicando que a presença de CCA retarda o início da pega;
- o maior tempo de início de pega foi três vezes maior que o de referência;
- a maioria dos cimentos avaliados registrou tempo de fim de pega superior ao de referência, somente dois valores inferiores;
- quanto à diferença entre o início e o fim dos tempos de pega, a maioria dos cimentos (70%) registrou valor inferior ao de referência, indicando que a presença da CCA encurta este intervalo;

- quanto ao tipo de cinza, na média, a CCA9 (residual, mais cristalina) foi a que registrou maiores tempos de início de pega e a CCA0 (amorfa), menores;
- quanto ao tipo de tratamento, o químico e térmico reduziram o início do tempo de pega, sendo o químico o que registrou valores mais baixos;
- o início de tempo de pega cresceu com o percentual de substituição;
- as cinzas com menor granulometria, resultantes do processo no moinho periquito, registraram menor tempo de pega que as cinzas moídas no moinho de bolas que apresentaram maior granulometria.

7.1.11 Da expansibilidade a quente de Le Chatelier

- todos os cimentos testados, inclusive o de referência, apresentaram expansibilidade a quente inferior a 5 mm, limite máximo estabelecido nas normas brasileiras NBR 573/91 e NBR 11578/91, independente de qualquer um dos fatores avaliados.

7.2 CONCLUSÕES GERAIS

Os tratamentos selecionados e aplicados resultaram de alguma forma, em benefícios para as CCA empregadas no trabalho e também para os cimentos produzidos com elas, por substituição em diferentes percentuais.

Em termos de resistência à compressão, o tratamento físico (redução da granulometria) foi o que produziu maiores benefícios. Com os resultados obtidos, fica clara a influência da granulometria das CCA no seu desempenho, ou seja, até o limite de 4,55 μm testado, quanto menor a granulometria, maior a pozolanicidade da CCA e, por consequência, a resistência à compressão dos cimentos. Para diâmetros 50% passante inferiores a 6 μm , obtidos pelo moinho periquito, parece haver um padronização de comportamento, quando, independente do tipo de CCA e tipo de tratamento empregados, todas as cinzas atingem IAP acima do limite mínimo estabelecido nas Normas brasileiras e os cimentos atingiram bom desempenho.

Os tratamentos térmico e químico resultaram em benefícios quanto à cor, clareando as CCA e, portanto, não produzindo cimentos escuros. Também foram responsáveis por CCA mais puras, ou seja, com maior percentual de SiO_2 e menos impurezas.

A presente pesquisa permite concluir que as CCA residuais têm potencial para serem empregadas na produção de cimentos, tanto aquelas menos cristalinas, quanto as mais cristalinas. Para tanto, devem ser beneficiadas, sendo pelo menos submetidas a tratamento físico para redução de sua granulometria. Se outros objetivos forem pretendidos, como coloração clara, os tratamentos térmico ou químico podem ser empregados.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS PESQUISAS

Com a intenção de complementar esta pesquisa e desenvolver o estudo sobre a viabilidade do emprego da cinza de casca de arroz residual em várias áreas da construção civil, são apresentadas algumas sugestões de tema para futuras pesquisas, tais como:

- estudo da micro estrutura de pastas de cimentos produzidos com CCA beneficiadas, incluindo entre outros, o estudo da porosimetria, da água combinada e da relação entre efeito físico x efeito químico na ação como pozolana;
- estudo da viabilidade econômica da aplicação dos beneficiamentos apresentados neste trabalho;
- acompanhamento da resistência à compressão dos cimentos produzidos com CCA beneficiadas, em idades superiores a 91 dias;
- avaliação de resultados de experimento similar desenvolvido com outros tipos de cimento que não CPV –ARI;
- avaliação dos cimentos produzidos com CCA beneficiadas quanto à corrosão de armadura, principalmente aqueles em que foram empregadas CCA com tratamento químico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOPYAN, Vahan. **Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil nos Países em Desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. São Paulo, 1991. 99 p. Tese de Livre-docência. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.
- AÏTCIN, P. **Concreto de Alto Desempenho**. Ed. PINI: São Paulo, SP. 2000. 667p. Tradução de Geraldo G. Serra.
- AJIWE, V.I.E.; OKEKE, C. A.; AKIGWE, F. C. *A Preliminary Study of Manufacture of Cement from Rice Husk Ash*. **Bioresource Technology**. n73, 2000. p.37-39.
- AMICK, James A. *Purification of Rice Hulls as a Source of Solar Grade Silicon for Solar Cells*. **J. Electrochem Soc.** v129. n4., 1982. p.864-866.
- ASAVAPISIT, S.; RUENGRIT, N. *The role RHA-blended cement in stalilizing metal-containing wastes*. **Cement & Concrete Composites**. v.27, 2005. p.782-787.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto**: NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Comum**: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação da água de pasta de consistência normal**: NBR NM43 . Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**: NBR 11582 (MB-3435). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**: NBR NM65. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico – Determinação da pozolanicidade**: NBR 5753. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimentos Portland pozolânico**: NBR 5736 (EB-758). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **Materiais pozolânicos**: NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal**: NBR 5751. Rio de Janeiro, 1992.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento: NBR 5752.** Rio de Janeiro, 1992.
- AZEVEDO, Ângela A.; MARTINS, Maria Luisa C.; MOLIN, Denise C. Dal. *Study of the Penetration of Chloride Ions in Rice Husk Ash Concrete.* In: **Three-Day International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology**, 2001. San Francisco, 2001.
- AZEVEDO, Ângela A.; MARTINS, Maria Luisa C.; SILVEIRA, Adriana A. *Effect of Combustion Conditions of Rice Husk Ash on Durability of Concrete.* In: **III International Conference on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures**, 2002. Recife, 2002.
- BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A.. *Incineration of Rice Hull for use as a Cementitious Material: The Guyana Experience.* **Cement and Concrete Research.** v.20, p.795-802, 1990.
- CASADO, C. E. F.; ZANOTTO E. D.; PRADO, M. O. *Sílica Glass Sintered form Rice Hull Ash.* **46º Congresso Brasileiro de Cerâmica.** São Paulo, 2002. p396-407.
- CERÂMICA. **Moagem com Moinho de Esferas (MORI, Cláudio).** São Paulo: Ano XXXVIII – Nº 257. p.28-35. Set/Out 1992.
- CHAKRAVERTY A.; MISHRA, P.; BANERJEE H. D. *Investigation of Thermal Decomposition of Rice Husk.* **Thermochimica Acta.** v.94, 1985. p267-275.
- CHAKRAVERTY A.; MISHRA, P.; BANERJEE H. D. *Investigation of combustion of raw and acid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica.* **Journal of Materials Science.** v.23, 1988. p21-24.
- COOK, David; PAMA; Ricardo P.; PAUL, Bishwendu K. *Rice Husk Ash-Lime-Cement Mixes for use in Masonry Units.* **Building and Environment.** v.12, p. 281-288, 1977.
- CORRÊA, É. K.. **Avaliação de Diferentes Tipos de Cama na Criação de Suínos em Crescimento e Terminação.** Pelotas-RS, 1998. 91p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Curso de Pós-Graduação em Zootecnia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas.
- DAFICO, Dario de Araújo. **Estudo da Dosagem do Concreto de Alto Desempenho Utilizando Pozolanas Provenientes da Casca de Arroz.** Florianópolis, 2001. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. *Um Estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca.* **IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.** Foz do Iguaçu, PR: 2002. p. 1671-1680.
- DELLA, Viviana P. **Processamento e Caracterização de Sílica Ativa Obtida a partir de Cinza de Casca de Arroz.** Florianópolis, 2001. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.

- DIRIGENTE CONSTRUTOR. **Cimento - Produção Doméstica**. São Paulo, mar 1987. p.26-34:
- FARIAS, Jacira dos S. A.. **Cimento para Alvenaria Utilizando Cinza de Casca de Arroz**. Porto Alegre, 1990. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FERREIRA, Ângela A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Porto Alegre, 1999. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FONSECA, Margarete R. G. **Isolantes Térmicos Fabricados a partir da Cinza da Casca de Arroz: Obtenção, caracterização de Propriedades e sua Relação com a Microestrutura**. Porto Alegre, 1999. 120p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. Florianópolis, 1999. 118p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- GUEDERT, L. O. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica do aproveitamento da Cinza de Casca de Arroz como Material Pozolânico**. Florianópolis, 1989. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.
- HAMAD, M. A.; KHATTAB, I. A. *Effect of the combustion process on the structure of rice hull silica*. **Thermochimica Acta**. v.48. p. 343-349. 1981.
- HANAFI, S. *et al. Surface Properties of Silicas Produced by Thermal Treatment of Rice Husk Ash*. **Thermochimica Acta**. v.37, 1980. p.137-143.
- HANNA, S. B.; FARAG, L. M.; MANSOUR, N. A. *Pyrolysis and Combustion of Treated and Untreated Rice Hulls*. **Thermochimica Acta**. v.81, 1984. p.77-86.
- HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Ed. Pini: São Paulo, SP. 1992. 349p.
- HOPPE, T. F. *et al. Influência do Teor de Cinza de casca de Arroz na Resistividade Elétrica do Concreto*. **47º Congresso Brasileiro do Concreto**. Anais: Recife, 2005. p.933-944.
- HUNT, L. P.; DISMUKES, J. P.; AMICK, J. A. *Rice Hulls as a Raw Material for Producing Silicon*. **J. Electrochem Soc.**v. 131. p.1683-1686. 1984.
- ISAIA, Geraldo Cechella. *Dosagem de concreto com casca de arroz para produtos pré-moldados*. **XXIV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, II Simpósio do Grupo Latino-Americano da RILEM sobre Tecnologia dos Materiais e VIII Simpósio Panamericano de Estruturas**. Porto Alegre, RS: 1987. p. 206-216.
- ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil e Urbana, Universidade de São Paulo.

- ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G., MORAES, R.. *Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. Cement & concrete composites.* 25, 2003, p.69-76.
- JAMES, Jose; RAO, M. Subba. *Characterization of Silica in Rice Husk Ash. American Ceramic Soc. Bull.*, 65. 1986 p.1177-80.
- JAMES, Jose; RAO, M. Subba. *Reactivity of Rice Husk Ash. Cement and Concrete Research.* v. 16, p.296-302, 1986.
- JAMES, Jose; RAO, M. Subba. *Reaction Product of Lime and Silica from Rice Husk Ash. Cement and Concrete Research.* v. 16, p.67-73, 1986.
- JAMES, Jose; RAO, M. Subba. *Silica from Rice Husk Through Thermal Decompositin Thermochimica Acta.* Amsterdam:1986 p.329-336
- KAPUR, P. C. *Production of reactive bio-silica from the combustion of rice husk in a tube-in-basket (TIB) burner. Powder Technology,* 44:p.63-67, 1985.
- KHAN, M. H.; MOHAN; TAYLOR, H. F. W. *Pastes of Tricalcium Silicate with Rice Husk Ash. Cement and Concrete Reserch.* v.15, p.89-92. 1985.
- KIHARA, Yushiro e ESPER, Mario William. *Perfil dos Cimentos Portland Pozolânicos Brasileiros. Associação Brasileira de Cimento Portland.* São paulo:1986. 31p.
- KINGERY, W. D.; UHLMANN, D. R.; BOWEN, H. K. **Introduction to Ceramics.** 2 ed. John Wiley & Sons: USA, 1976. Cap. 1,2 e3. 1032p.
- KRISHNARAO, R.V.; GODKHINDI, M. M.. *Distribution of Silica in Rice Husks and its Effect on the Formation of Silicon Carbide. Ceramics International.* 18. 1992. p. 243-49.
- KRISHNARAO, R.V.; SUBRAHMANYAM, J.; JAGADISH KUMAR, T. *Studies os the Formation of Black Particles in Rice Husk Silica Ash. Journal of the European Ceramic Society.* 2001. p.99-104.
- LUXAN, M. P. *Rapide evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. Cement and Concrete Research,* v.19, p.63-68. 1989.
- MEHTA, P. K.; PITT. *A New Process of Rice Husk Utilization In: Rice By-products Utilization – International Conference.* Valencia, Espanha, 1974. p.46-58.
- METHA, P. K.. *Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash. ACI Journal.* Set, 1977. p.440-442.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** Ed. Pini. São Paulo, 1994. 1º ed. 573p.
- MISHRA P.; CHAKRAVERTY A.; BANERJEE H. D. *Production and purification of silicon by calcium reduction of rice-husk white ash. Journal of Materials Science.* v.20. 1985. p.4387-4391.
- MOHANTY, T. K.. *Use of Rice Husk Ash in Manufacture of Protland Cement. Cement.* n.1, v.8, 1974. p13-15.

- MORÉS, Nelson. *Produção de Suínos em Cama Sobreposta (Deep Bedding): Aspectos Sanitários*. In: **5º Seminários Internacional de Suinocultura**. São Paulo: 2000. p.101-107.
- NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini. 2º Edição. 1997.
- PATEL, M.; KARERA, A.; PRASANNA P. *Effect of thermal and chemical treatments on carbon and sílica conténs in rice husk*. **Journal of Materials Science**. 22. 1987. p. 2457 – 2464.
- PAYÁ, J. *et al. Determination of amorphous sílica in rice husk ash a rapid analytical method*. **Cement and Concrete Cement and Concrete Research**. v. 31, 2001. p.277-231.
- POUEY, Maria Tereza. **Estudo do comportamento de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições mineralógicas, quanto à resistência à compressão**. Porto Alegre, 2001. 35p. Relatório Final da Disciplina de Seminário de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- QINGGE F.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M. e SUGITA, S. *Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment*. **Cement and Concrete Research**. v.34, 2004. p.521-526.
- REAL, Concha; ALCALÁ, Maria D.; CRIADO, José M. *Preparation os Silica from Rice Husks*. **Journal American Ceramic Society**. 79. 1996. 2012-16p.
- RÊGO, João Henrique S. **Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de Arroz Produzida sem Controle de Temperatura como Adição Mineral ao Cimento**. Goiânia, 2001. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.
- RÊGO, João Henrique S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas**. Brasília, 2004. 274p. Tese (Doutorado em Eng. Civil). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília.
- RIBEIRO, F. H.; ARANTE, J.; CASSOL, V. *Avaliação da Influência da Cinza de Casca de Arroz produzida no Estado do Tocantins nas Propriedades do Concreto nos Estados Plástico e Endurecido*. . **47º Congresso Brasileiro do Concreto**. Anais: Recife, 2005. p.206-217.
- SANTOS, Sílvia. **Estudo da Viabilidade de utilização de Cinza de Casca de Arroz Residual em Argamassas e Concretos**. Florianópolis, 1997. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANTOS, Sílvia; PRUDÊNCIO JR. *Estudo comparativo da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz residual*. **VII Encontro Nacional do Ambiente Construído**. Anais: Florianópolis, 1998. p.933-939.
- SENSALE, Gema Rodriguez B. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz**. Porto Alegre, 2000. 181p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SENSALE, Gema Rodriguez de; DAL MOLIN, D. C. C. *Study of Influence of Rice-husk Ash on compressive Strength of concrete at Different Ages*. In: **High-Performance Concrete – Performance and Quality of Concrete Structures**. Gramado, RS, 1999. 213-230p. proceedings

- SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVEIRA, A. A. e DAL MOLIN, D. C. **A Influência do Tratamento Térmico da Cinza de Casca de Arroz na pozolanicidade e na Resistência à Compressão de Argamassas. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.** Goiânia, 1995. p.15-24.
- SINGH, N. B.; RAI, Sarita. *Effect of popyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash.* **Cement and Concrete Research**, 31, 2001. p.239-243.
- SINGH, N. B.; SINGH, V. D.;RAI, Sarita; CHATURVEDI, Shivani *Effect of lignosulfonate, calcium chloride and their mixture on the hydration of RHA-blended Portland cement.* **Cement and Concrete Research**, 32, 2002. p.387-392.
- SOUZA, M. F. *et al.* **Rice Hull-Derived Silica: Applications in Portland Cement and Mullite Whiskers.** **Material Research**. V.3 N.2. 2000. p.25-30.
- SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** Porto Alegre, 2003. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VIEIRA, F. L. *et al.* **Comparativo da Determinação do Teor de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz (CCA) através de Difração de Raios X e Método Químico.** **47º Congresso Brasileiro do Concreto.** Anais: Recife, 2005. p.372-381.
- WEBER, Silvana Leonita. **Metodologia para Obtenção de Sílica de Elevada Reatividade para Uso em Concreto de Alto Desempenho a Partir do Processamento de Cinza de Casca de Arroz.** Florianópolis, 2001. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- WOLF, Jairo. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica.** Porto Alegre, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- YALÇIN, N.; SERVİNÇ, V. *Studies on silica obtained from rice husk.* **Ceramics International** 27. 2001 p.219-224.
- Konica Minolta Sensing, INC.** 1998. *Precise Color Communication – Color Control from perception to instrumentation* (Material de Divulgação)

Sites visitados, em 27/11/05:

www.abiap.com.br
www.irga.rs.gov.br
www.conab.gov.br
www.agricultura.gov.br
www.cimentoitambe.com.br
www.abcp.org.br

Anexo I

QUESTIONÁRIOS DO LEVANTAMENTO DE DADOS EM PELOTAS / RS – Cap. 2

Pesquisa:

Levantamento das quantidades de casca e cinza de casca de arroz na região de Pelotas/ RS

Documento:

QUESTIONÁRIO PARA ENGENHO

Nº :

Nome:

Local/Unidade:

Nome e função do informante:

1. Qual a quantidade de arroz beneficiado por ano (2003 e/ou 2002)? O beneficiamento é feito ao longo de todo o ano? Em caso negativo, em que período?

.....

a) Qual a procedência do arroz?

2. Qual a quantidade de casca obtida por ano?

.....

3. Qual o destino da casca? (queimada, vendida, doada, outro)

4. No caso de ser queimada:

a) qual a quantidade de casca queimada?

b) qual o período de queima (meses ou todo o ano)?

c) qual a temperatura e qual o tempo de queima?

d) qual o sistema de queima (grelha fixa, grelha deslizante, leito fluidizado, outro)?

e) qual a quantidade de cinza obtida?

f) qual o sistema de escoamento da cinza (seco ou úmido)?

g) qual o destino da cinza?

5. No caso da casca ser vendida ou doada:

a) qual a quantidade?

b) para quem?

c) para que uso?

6. No caso de outra alternativa, favor especificar destino e destinatário.

.....

Pesquisa:

Levantamento das quantidades de casca e cinza de casca de arroz na região de Pelotas/ RS

Documento:

QUESTIONÁRIO PARA INDÚSTRIA QUE QUEIMA CASCA DE ARROZ

Nº :

Nome:

Local/Unidade:

Nome e função do informante:

1. Qual a procedência da casca de arroz?
2. Qual a quantidade de casca queimada? (por dia, mês ou ano)
3. Qual o período de queima (meses ou todo o ano)?
4. Qual a temperatura e qual o tempo de queima?
5. Qual o sistema de queima (grelha fixa, grelha deslizante, leito fluidizado, outro)?
.....
6. Qual a quantidade de cinza obtida?
7. Qual o sistema de escoamento da cinza (seco ou úmido)?
8. Qual o destino da cinza?

Anexo II

RELATÓRIOS DE ENSAIOS



CIENTEC
FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **13977/42012**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIOS EM CINZA

Cliente: UFRGS – CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 3º Andar
90035-190 – Porto Alegre, RS

Itens ensaiados: (03) três amostras entregues à CIENTEC, coletadas e identificadas pelo Cliente como Cinza de Casca de Arroz descritas como "CCA 0", "CCA 7" e "CCA 9".

Data do recebimento dos itens: 22 de dezembro de 2004.

Data da realização dos ensaios: 27 de dezembro de 2004.

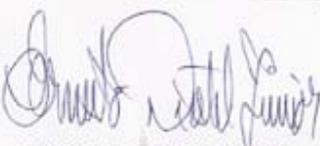
Método: ASTM D-5373: carbono, hidrogênio, nitrogênio (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo CHN - 600.

RESULTADOS:

AMOSTRA	CCA 0	CCA 7	CCA 9
Carbono _(b.s.) , %	4,21	4,63	6,38
Hidrogênio _(b.s.) , %	0,14	0,10	0,08
Nitrogênio _(b.s.) , %	0,10	0,08	0,09

Abreviatura: (b.s.) = base seca.

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2004.



Eng.º Quim.º Ernesto Diestel Júnior
Gerente do Departamento de Química



Quim.º Iolanda Dill Fernandes
Responsável Técnico CRQ 05200044 – 5.ª Região
Coordenadora do Laboratório de Ensaios em Combustíveis

1/1

Rua Washington Luiz, 675 CEP 90010-460 Porto Alegre RS Brasil caixa postal 1864 CGC 92.816.685/0001-67
tel (51) 3287.2000 fax (51) 3226.0207 e-mail cientec@cientec.rs.gov.br homepage www.cientec.rs.gov.br

Mod. 06

Anexo III

Dados de Resultados Obtidos – Cap. 4

TRATAMENTO FÍSICO – MOAGEM E MICRONIZAÇÃO:**Distribuição granulométrica das cinzas moídas a seco, em moinho de bolas - ITEM 4.2.1.1**

G	Cinza	Tempo de moagem (h)	Diâmetro (μm)			
			10%	50%	90%	médio
G1	CCA0	0	10,7	39,2	67,2	
		2	2,2	13,1	36,8	16,5
		4	1,6	9,1	28,4	12,3
		8	1,40	6,8	21,5	9,5
	CCA1	0	13,0	53,6	94,2	
		2	1,6	11,4	37,4	15,7
		4	1,3	8,4	28,6	11,9
		8	1,1	6,2	22,3	9,3
	CCA3	0	23,8	60,3	94,1	
		2	2,3	15,9	40,0	19,0
		4	1,7	11,9	32,3	14,5
		8	1,4	7,4	22,2	9,9
G2	CCA0	1	5,03	33,27	64,62	34,22
		2	4,37	28,71	58,78	30,41
	CCA7	1	9,01	48,43	93,16	50,37
		2	3,53	29,13	64,94	32,12
	CCA9	1	8,79	51,63	141,67	67,81
		2	5,28	32,63	79,02	38,38
G3	CCA0	1	5,62	33,13	62,07	33,73
		2	4,80	28,49	57,41	29,98
	CCA7	1	8,08	43,41	78,01	43,82
		2	6,06	33,60	67,40	35,54
	CCA9	1	9,45	40,82	82,65	44,09
		2	6,76	32,77	66,39	35,17

Resultados de moagem a úmido, moinho de bolas – Pré teste 1 – ITEM 4.2.1.2

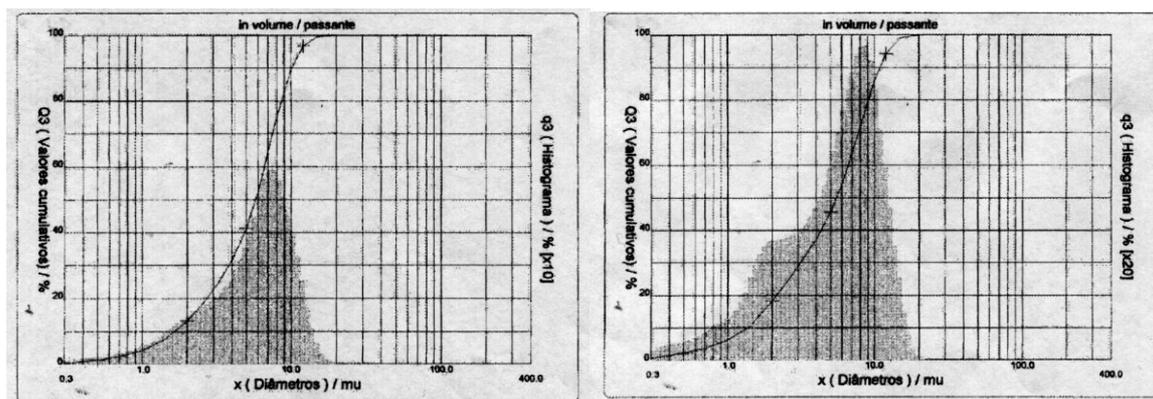
Cinzas / tempo de moagem (h)	Diâmetro 50% (μm)
CCA0 - natural	39,2
CCA0 – 1 h	22,6
CCA1- natural	53,6
CCA1 – 1 h	33,3
CCA3 - natural	60,3
CCA 3 – 1 h	31,9
CCA 3 – 2 h	14,3
CCA6 - natural	57,7
CCA 6 – 10 h	3,0

Distribuição granulométrica de cinzas moídas no moinho planetário, via úmida – **ITEM 4.2.2.2**

Combinações Rotação x Tempo		Cinzas	Diâmetro (μm)		
			10%	50%	90%
natural		CCA 0	10,74	39,18	67,18
		CCA 3	23,77	60,28	94,10
PRÉ-TESTE 1 200 rpm	15	CCA 3	3,01	18,28	42,14
	30		2,85	16,49	36,35
	45		2,01	12,14	33,96
	60	CCA 0	4,17	21,83	50,15
	90	CCA 3	1,68	9,03	24,91
PRÉ-TESTE 2 100 rpm	10	CCA 0	8,36	36,95	68,71
		CCA 3	17,72	50,09	100,48
	40	CCA 0	4,66	22,69	50,11
		CCA 3	7,02	32,33	62,51
	80	CCA 0	2,31	11,98	31,72
		CCA 3	2,70	16,32	40,08
PRÉ-TESTE 3 200 rpm	Natural	CCA 3	23,65	63,68	106,19
	30		2,76	19,21	48,98
	60		1,22	7,02	20,97

Pré-teste 1 e 2 - água em excesso, com bolas de carbetto de tungstênio

Pré-teste 3 - com pré moagem a seco e % de água de 70% massa de cinza, conforme indicado na bibliografia, com bolas de cerâmica.

Cinzas Micronizadas - ITEM 4.2.5

(a) CCA0

(b) CCA8

Distribuição granulométrica das cinzas micronizadas: (a) CCA0 e (b) CCA8

TRATAMENTOS TÉRMICOS:**Parâmetros cromáticos obtidos durante as leituras de amostras com TT0 – ITEM 4.3.2.1**

Tempo	Cinza	L*	a*	b*	Tempo	Cinza	L*	a*	b*		
Natural 0 h	CCA 0	21,94	0,26	0,64	9 h	CCA 0	44,89	0,14	0,58		
		21,79	0,28	0,68			44,88	0,14	0,53		
	CCA 1	19,87	0,23	0,66		CCA 1	57,40	0,26	1,61		
		20,31	0,22	0,63			57,41	0,27	1,59		
	CCA 3	29,76	0,14	0,17		CCA 3	38,96	0,13	0,39		
		30,87	0,10	0,20			39,31	0,16	0,36		
	CCA 7	26,5	0,19	0,35		CCA 7	49,33	0,27	0,74		
		27,0	0,16	0,34			49,31	0,25	0,69		
	6 h	CCA 0	44,63	0,18		0,71	12 h	CCA 0	44,47	0,23	0,85
			44,43	0,2		0,71			44,46	0,24	0,85
		CCA 1	57,97	0,32		1,86		CCA 1	58,34	0,45	2,41
			57,97	0,32		1,87			58,34	0,45	2,41
CCA 3		41,39	0,12	0,35	CCA 3	39,22		0,18	0,55		
		41,41	0,12	0,35		39,3		0,23	0,49		
CCA 7		48,06	0,25	0,67	CCA 7	48,4		0,36	1,13		
		48,06	0,21	0,68		48,43		0,35	1,20		

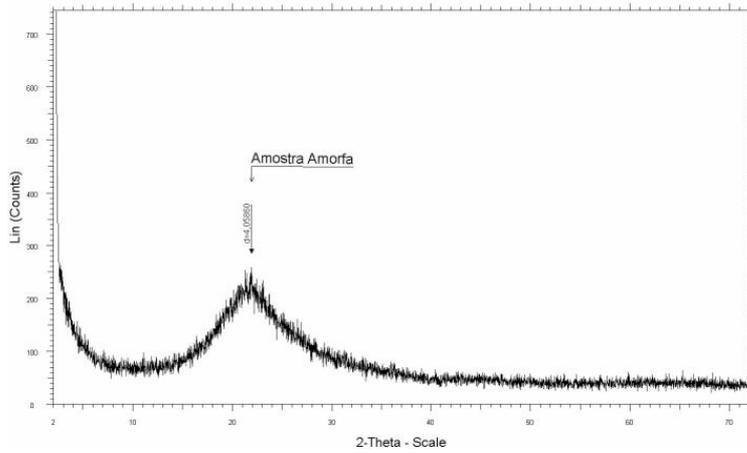
Parâmetros cromáticos obtidos nas leituras de amostras com e sem TT1 – ITEM 4.3.2.2

Tempo	Cinza	L*	a*	b*	Tempo	Cinza	L*	a*	b*
Natural	CCA 0	21,94	0,26	0,64	TT1	CCA 0	42,03	-0,02	-0,45
		21,79	0,28	0,68			42,03	-0,1	-0,46
	CCA 1	19,87	0,23	0,66		CCA 1	31,73	0,06	-0,13
		20,31	0,22	0,63			31,76	0,05	-0,10
	CCA 3	29,76	0,14	0,17		CCA 3	37,65	0,35	0,17
		30,87	0,10	0,20			38,41	0,34	0,17
	M1	21,20	0,21	0,52		M1	28,46	0,07	0,21
		21,38	0,19	0,52			28,47	0,07	-0,24
	M2	25,95	0,16	0,37		M2	42,96	0,15	-0,30
		26,59	0,13	0,47			42,96	0,16	-0,33

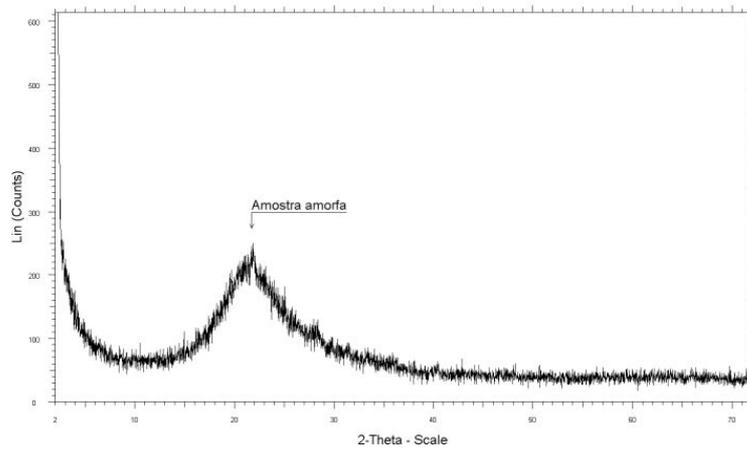
Parâmetros cromáticos obtidos nas leituras de amostras com e sem TT2 - ITEM 4.3.2.3

Tempo	Cinza	L*	a*	b*	Tempo	Cinza	L*	a*	b*
Natural	CCA 0	21,94	0,26	0,64	TT2	CCA 0	68,95	1,05	0,17
		21,79	0,28	0,68			68,96	1,07	0,18
	CCA 3	29,76	0,14	0,17		CCA 3	49,75	0,57	0,32
		30,87	0,10	0,20			50,32	0,58	0,32
	M2	25,95	0,16	0,37		M2	37,45	0,28	0,08
		26,59	0,13	0,47			37,86	0,31	0,10

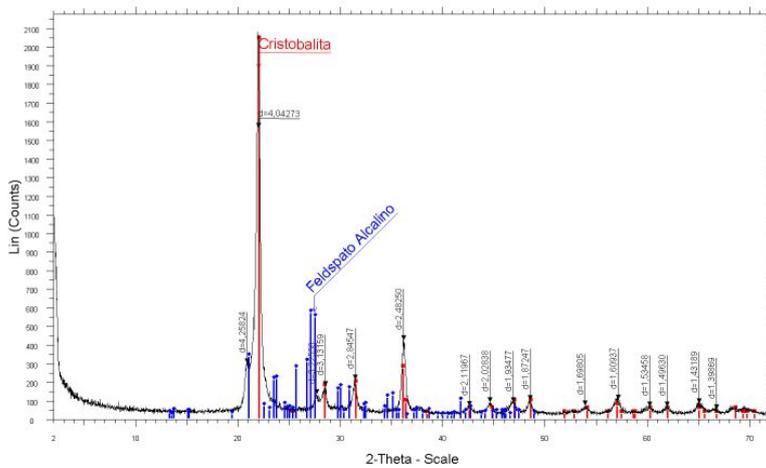
Difratogramas de difração de raios-X das cinzas submetidas aos Tratamentos Térmicos – ITEM 4.3.3



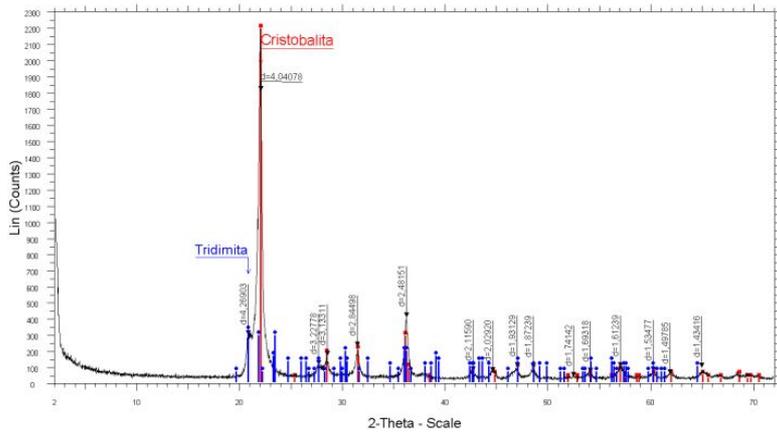
(a) CCA0 – natural



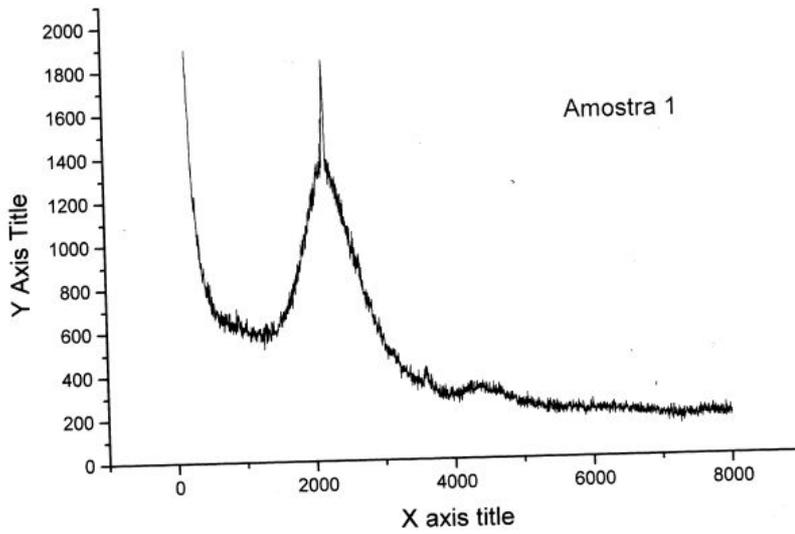
(a1) CCA0 - tratada – TT1



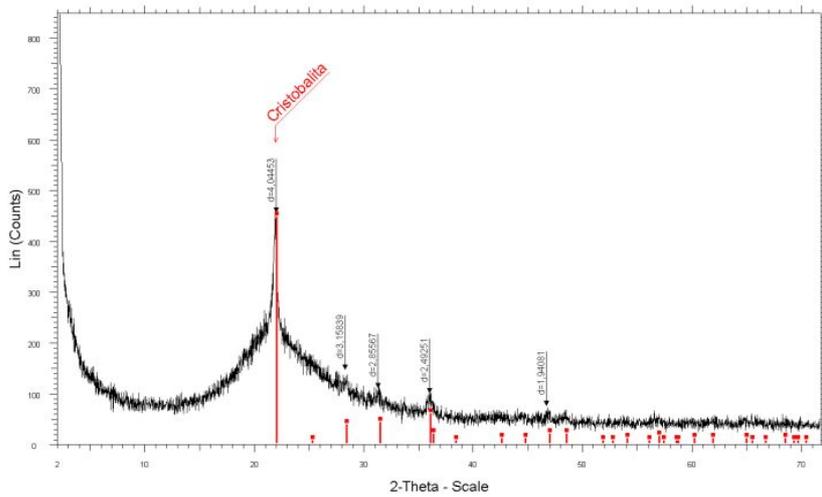
(a2) CCA0 - tratada – TT2



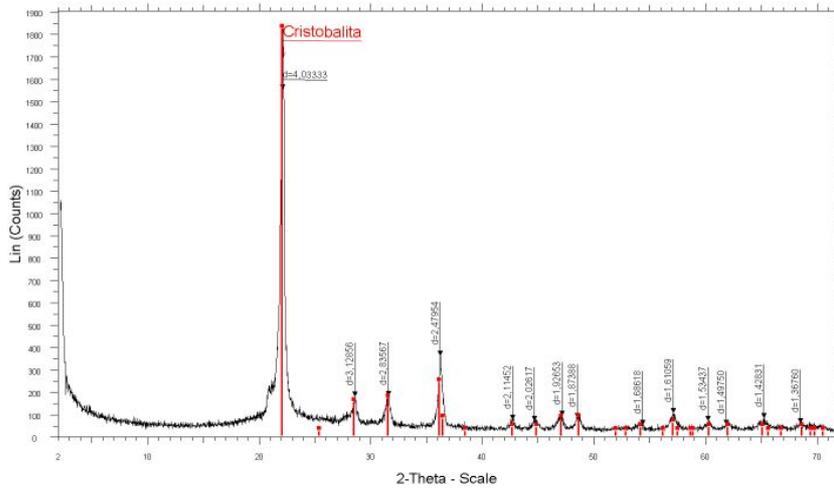
(a3) – CCA0 tratada – TT3



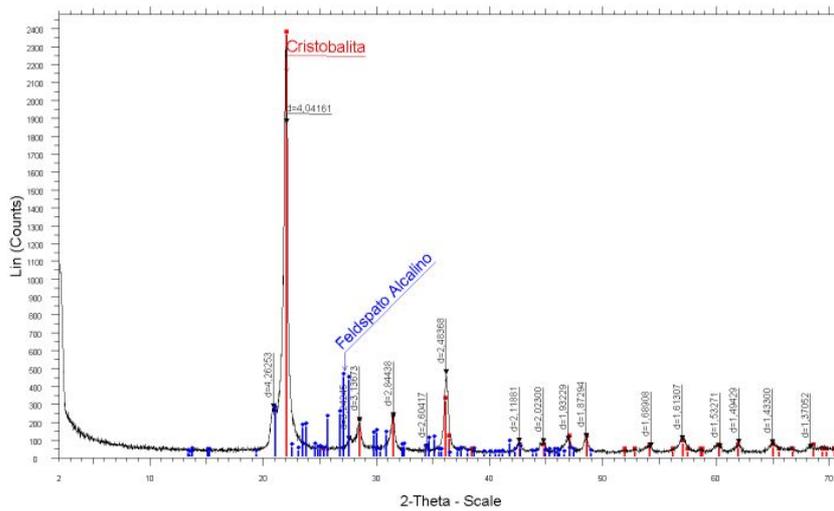
(b) CCA1 - natural



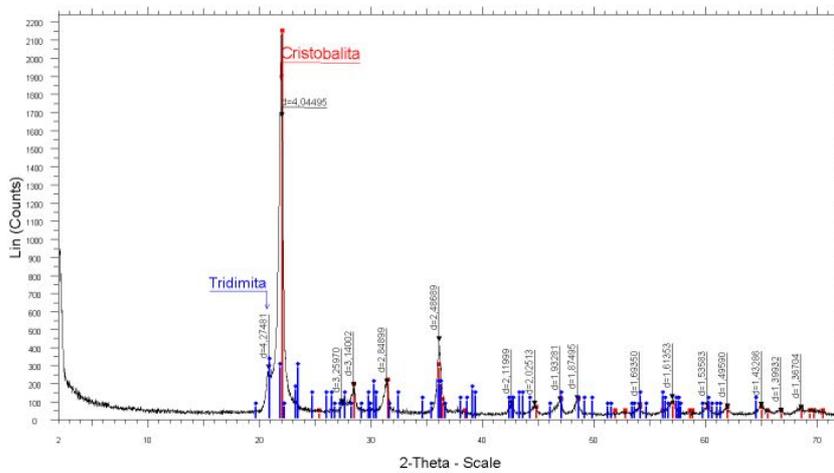
(b1) CCA1 - tratada – TT1



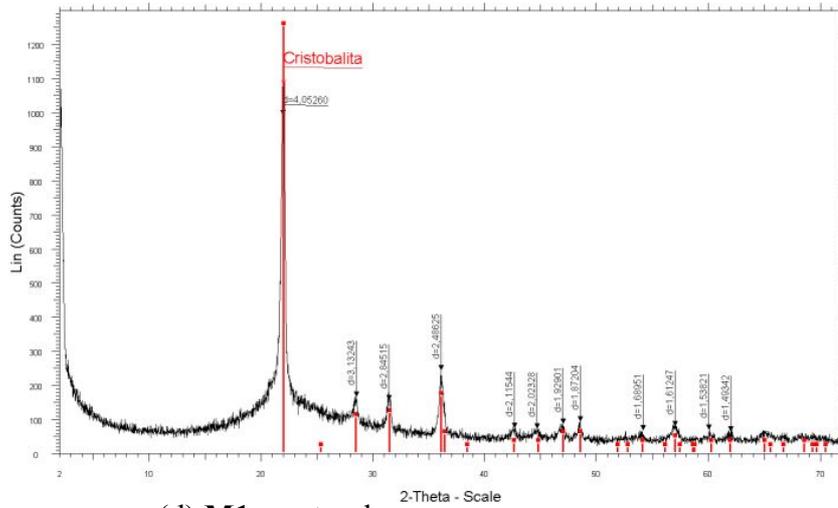
(c1) CCA3 - tratada – TT1



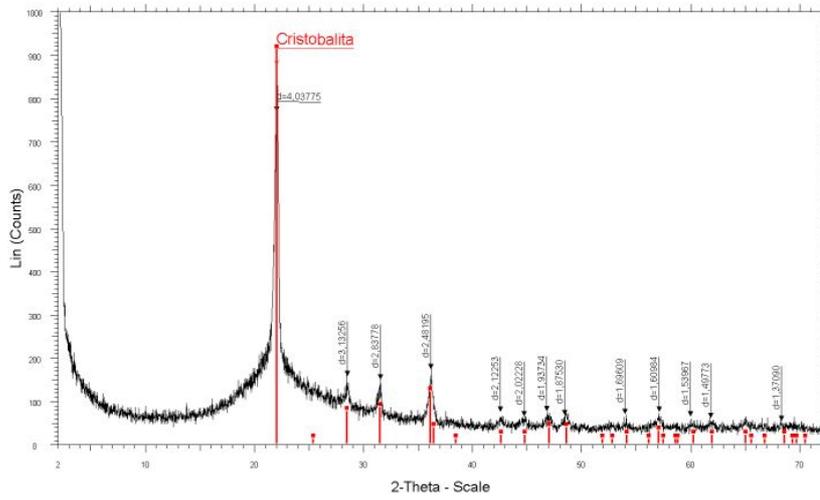
(c2) CCA3 - tratada – TT2



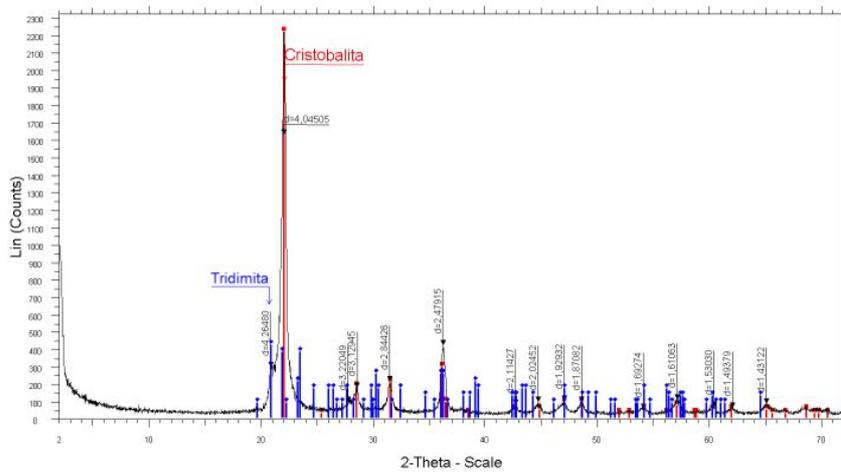
(c3) CCA3 tratada – TT3



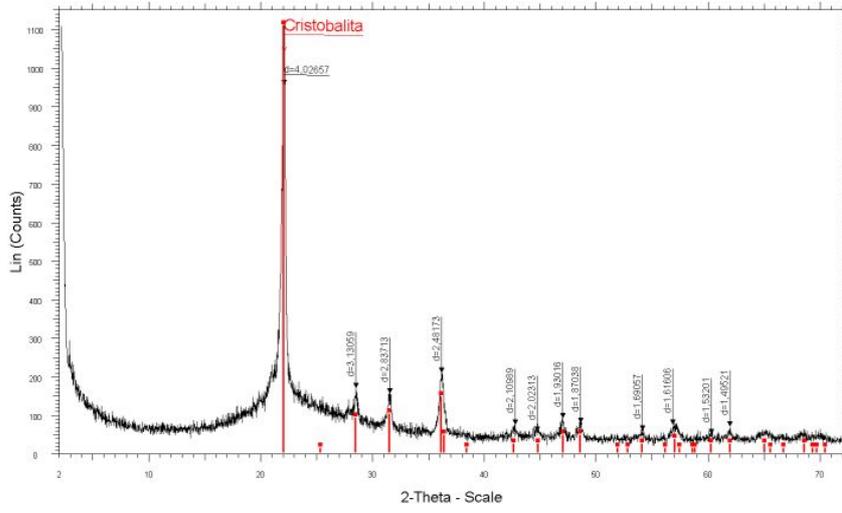
(d) M1 – natural



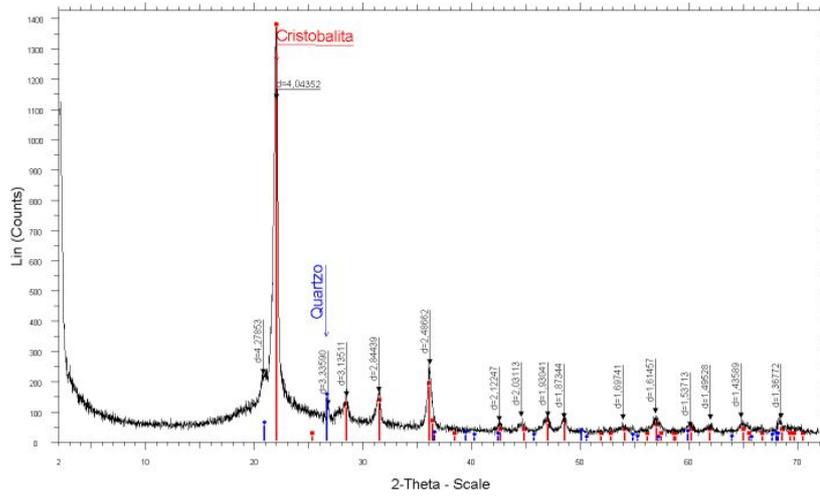
(d1) M1 tratada - TT1



(d2) M1 tratada – TT3



(e) M2 – natural



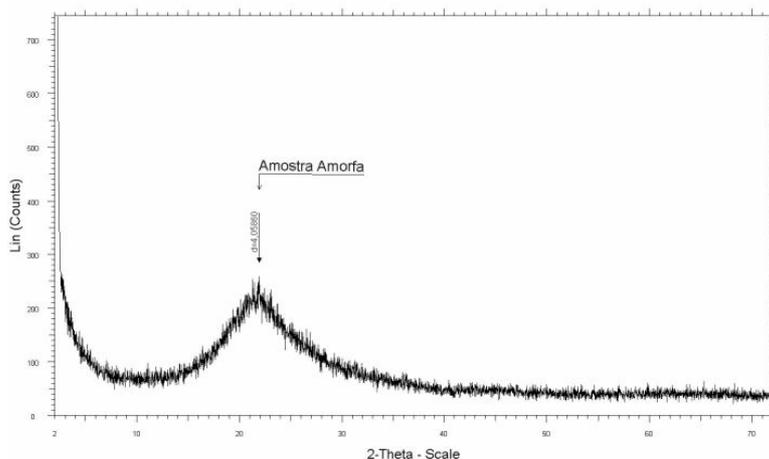
(e1) M2 tratada - TT1

TRATAMENTO QUÍMICO:

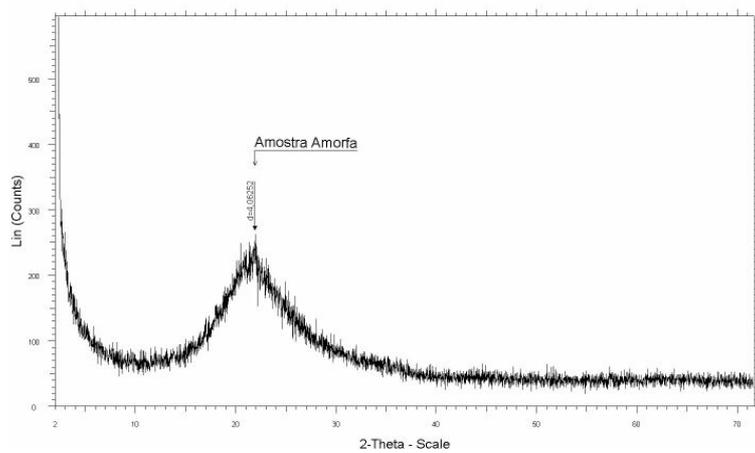
Parâmetros cromáticos das amostras submetidas aos tratamentos químicos – ITEM 4.4.4.1

Tempo	Cinza	L*	a*	b*	Tempo	Cinza	L*	a*	b*
Natural S/T	CCA 0	21,94	0,26	0,64	TQ2	CCA 0	45,88	0,37	1,07
		21,79	0,28	0,68			45,92	0,34	1,08
	CCA 1	19,87	0,23	0,66		CCA 1	59,41	0,17	2,22
		20,31	0,22	0,63			59,58	0,15	2,23
	CCA 3	29,76	0,14	0,17		CCA 3	41,64	0,32	0,64
30,87		0,10	0,20	41,83			0,31	0,66	
M1	21,20	0,21	0,52	M1		54,33	0,13	0,11	
	21,38	0,19	0,52			54,34	0,12	0,13	
M2	25,95	0,16	0,37	M2		49,18	0,23	0,54	
	26,59	0,13	0,47			49,22	0,24	0,54	
TQ1	CCA 0	49,87	0,24	0,45	TQ3	CCA 0	49,42	0,21	0,39
		48,66	0,29	0,59			49,46	0,16	0,39
	CCA 1	60,96	-0,13	0,09		CCA 1	57,57	-0,28	-0,37
		61,65	-0,13	0,11			57,69	-0,15	-0,30
	CCA 3	40,33	0,41	0,71		CCA 3	39,67	0,25	1,01
41,50		0,37	0,67	39,85			0,23	1,00	
M1	54,41	0,18	0,03	M1		46,63	0,16	1,02	
	54,43	0,18	0,03			46,64	0,15	0,98	
M2	47,43	0,32	0,36	M2		47,23	0,20	0,54	
	47,44	0,26	0,45			47,20	0,22	0,52	
TQ4	M1	39,83	0,22	-0,03	TQ5	M1	51,10	0,08	0,33
		39,85	0,22	0,00			51,11	0,06	0,35
	M2	43,73	0,30	0,19					
43,87		0,32	0,22						

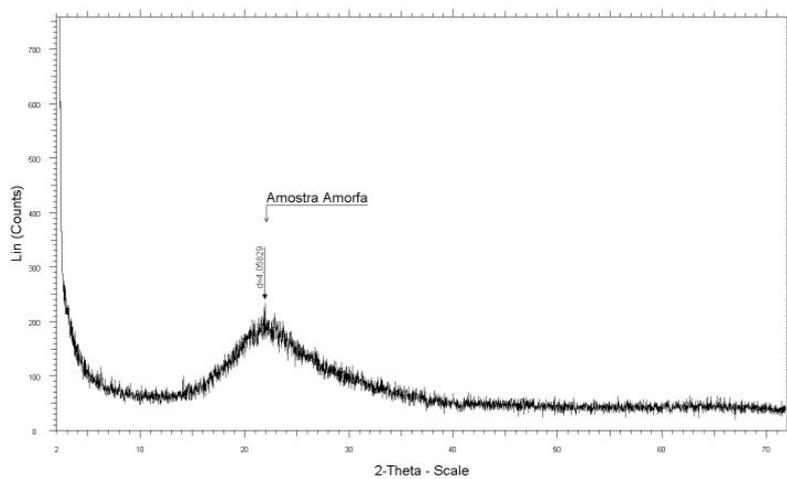
Difratogramas de raios X das cinzas submetidas aos tratamentos químico –ITEM 4.4.5



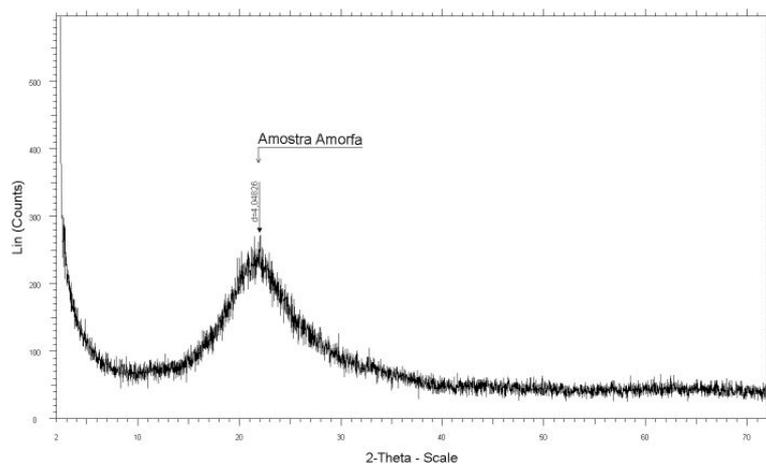
(a) CCA0 – natural



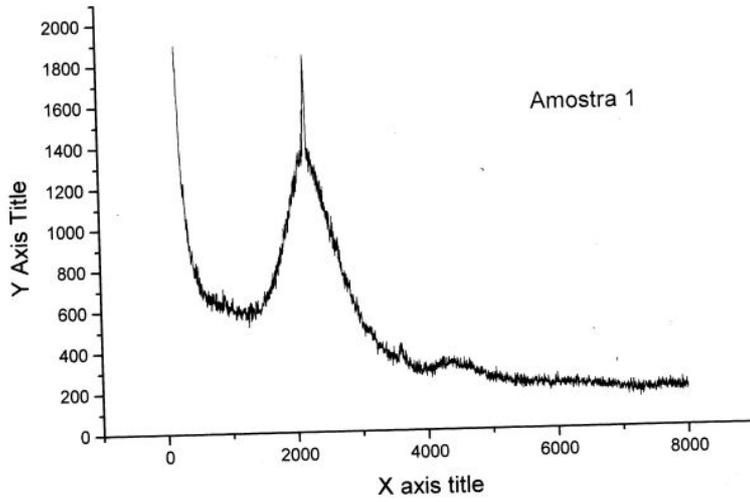
(a1) CCA0 tratada - TQ1



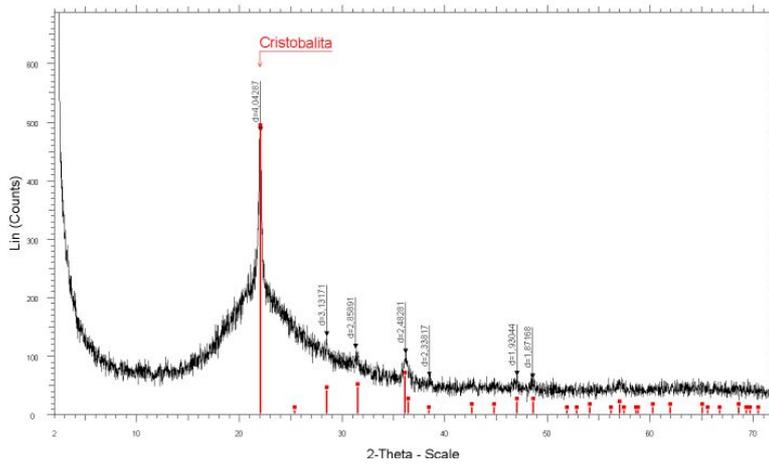
(a2) CCA0 tratada - TQ2



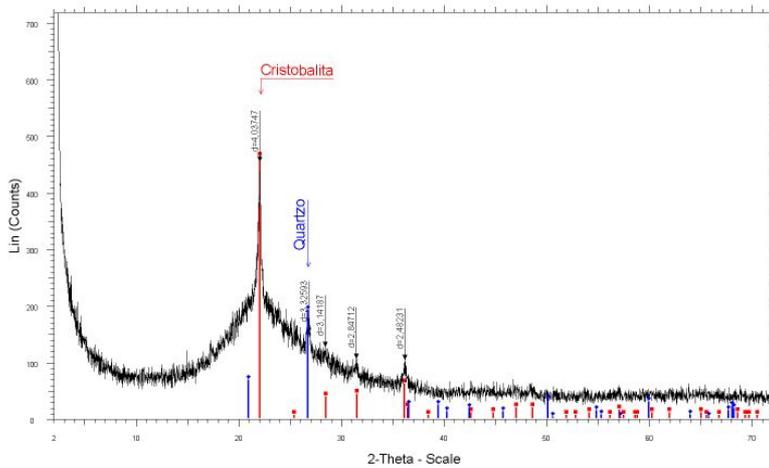
(a3) CCA0 tratada - TQ3



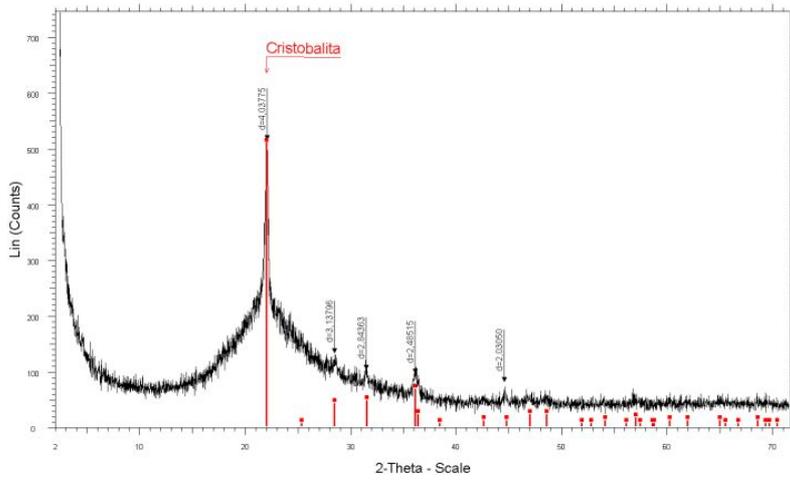
(b) CCA1 - natural



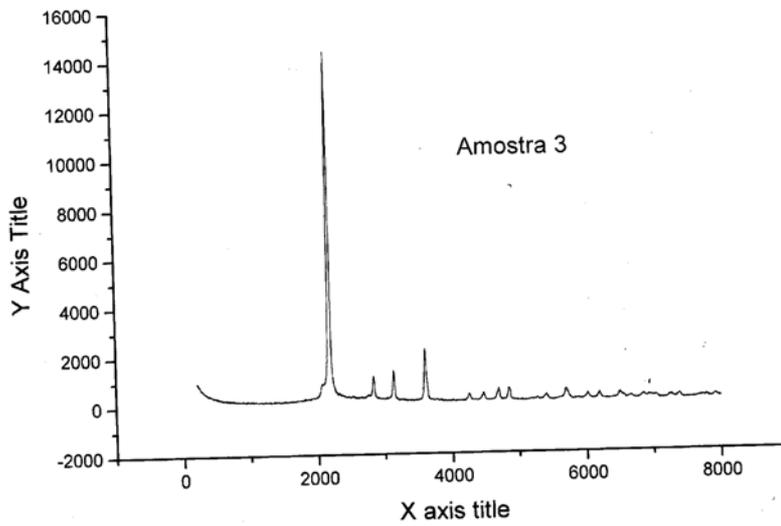
(b1) CCA1 tratada - TQ1



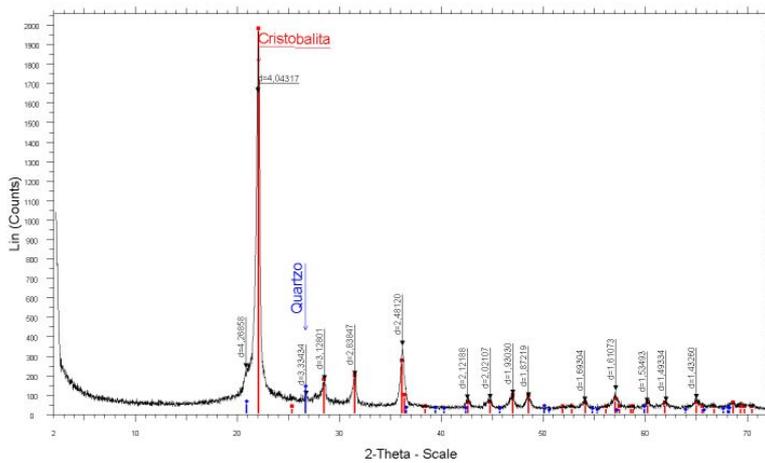
(b2) CCA1 tratada - TQ2



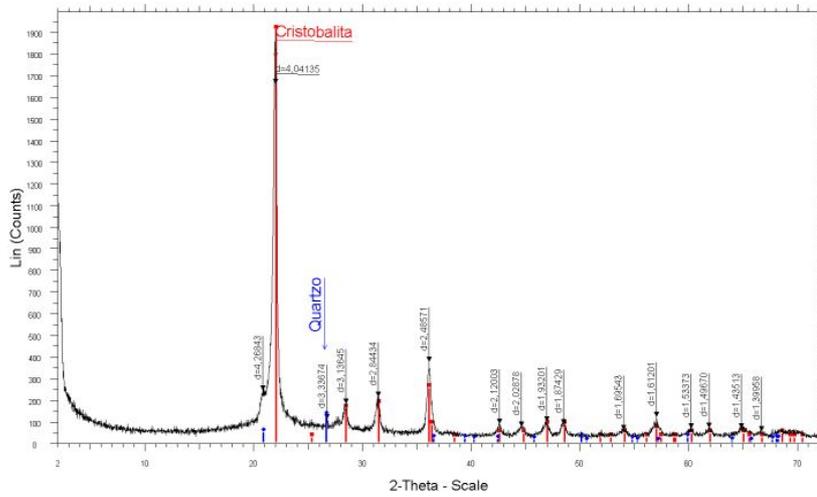
(b3) CCA1 Tratada - TQ3



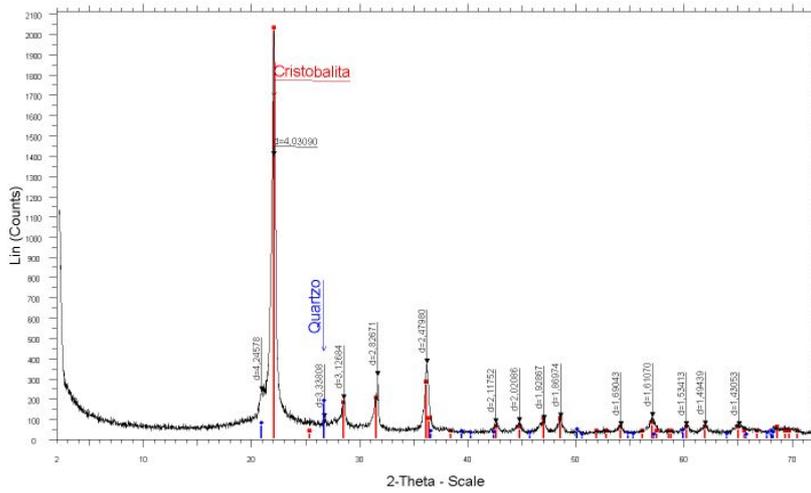
(c) CCA3 – natural



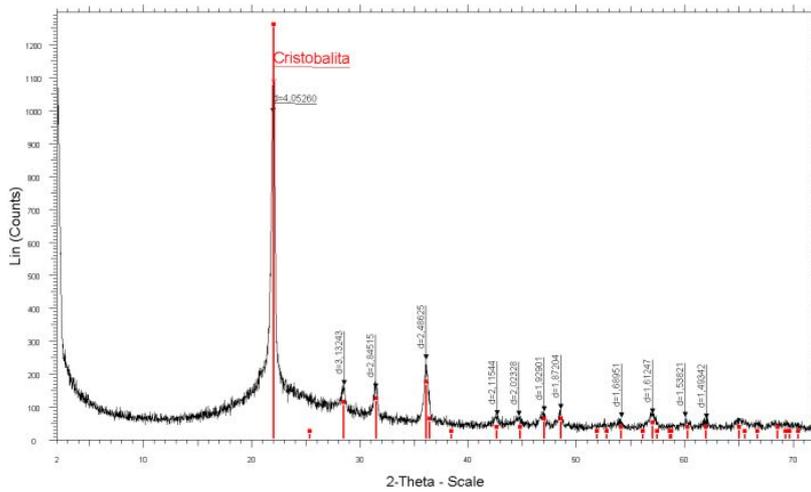
(c1) CCA3 tratada - TQ1



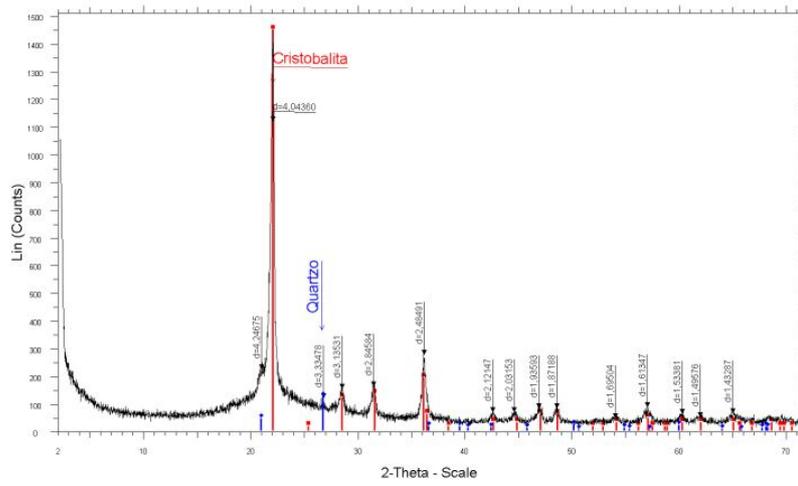
(c2) CCA3 tratada - TQ2



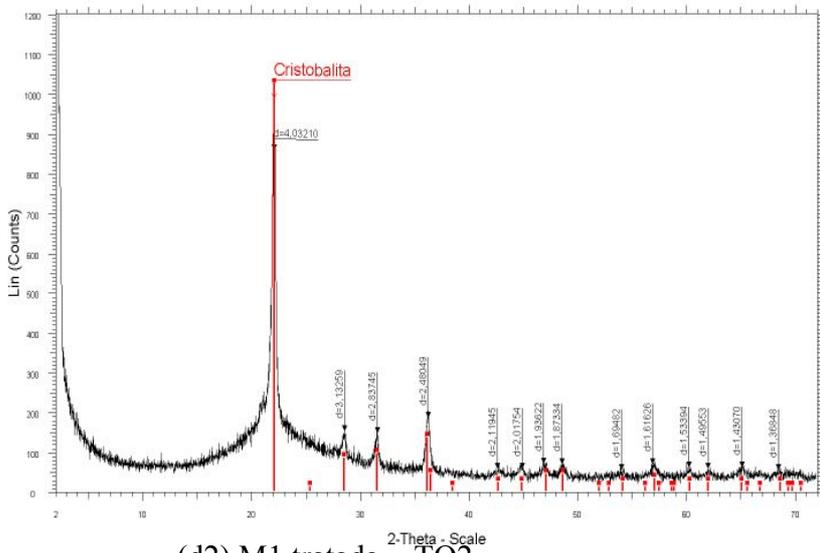
(c3) CCA3 tratada - TQ3



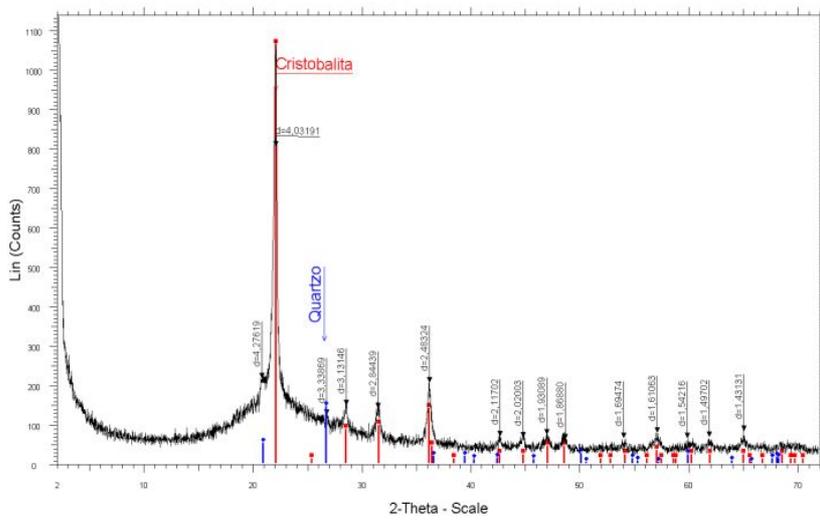
(d) M1 - natural



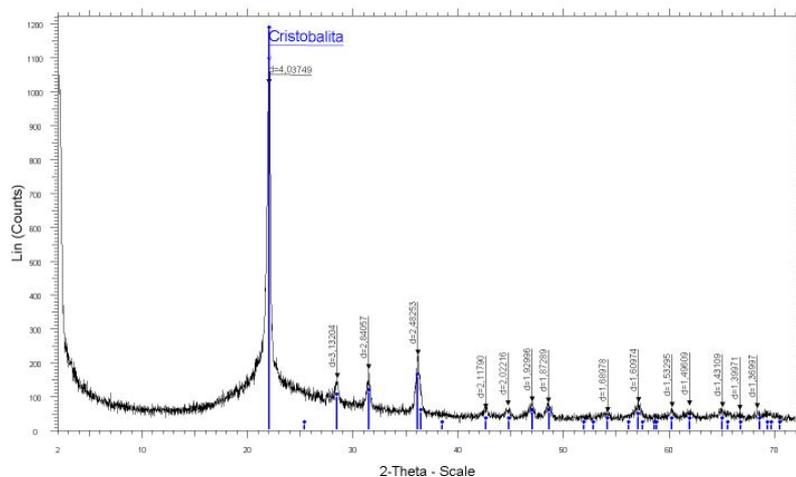
(d1) M1 tratada - TQ1



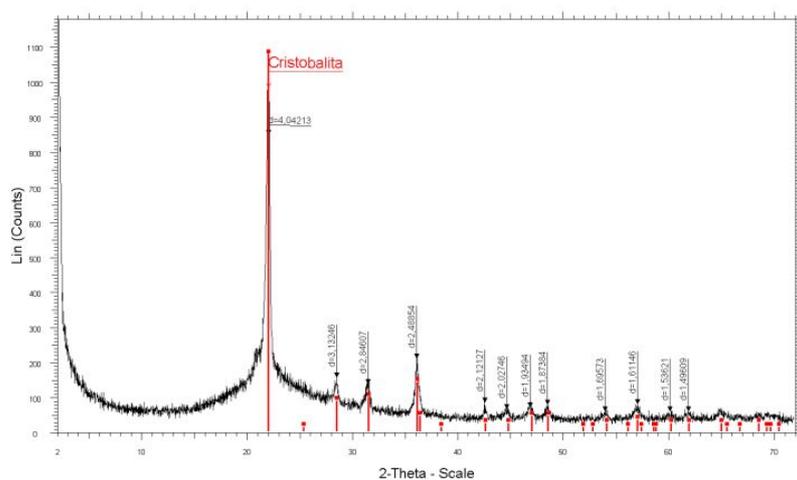
(d2) M1 tratada - TQ2



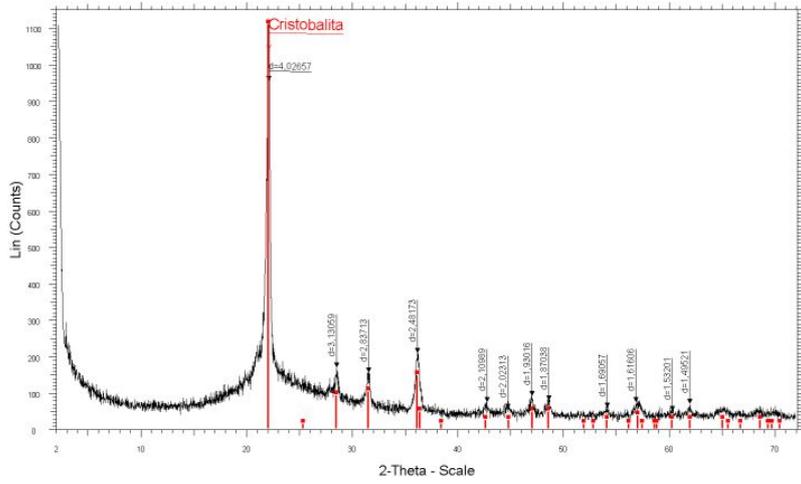
(d3) M1 tratada - TQ3



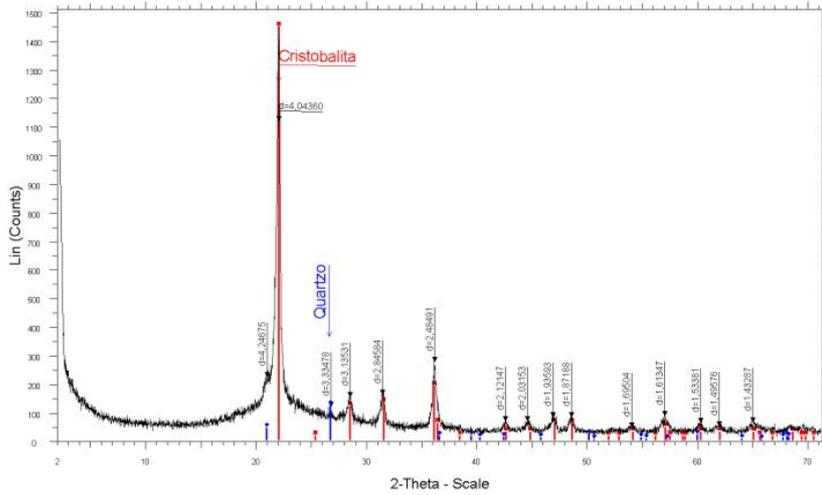
(d4) M1 tratada - TQ4



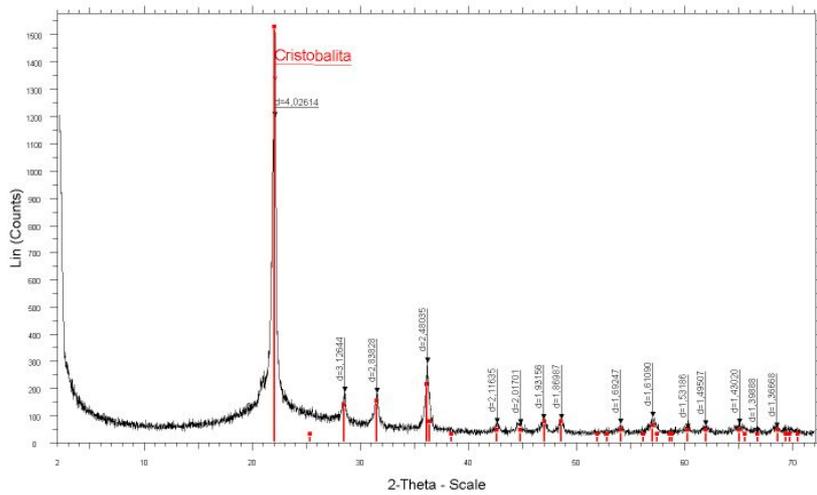
(d5) M1 tratada - TQ5



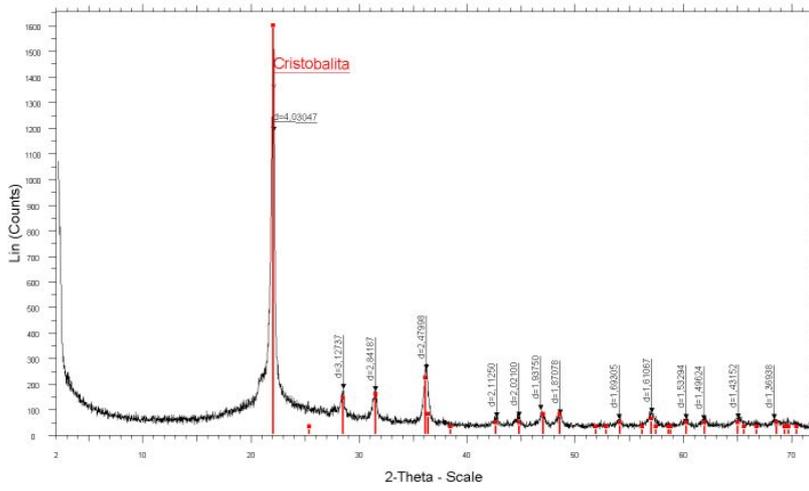
(e) M2 – natural



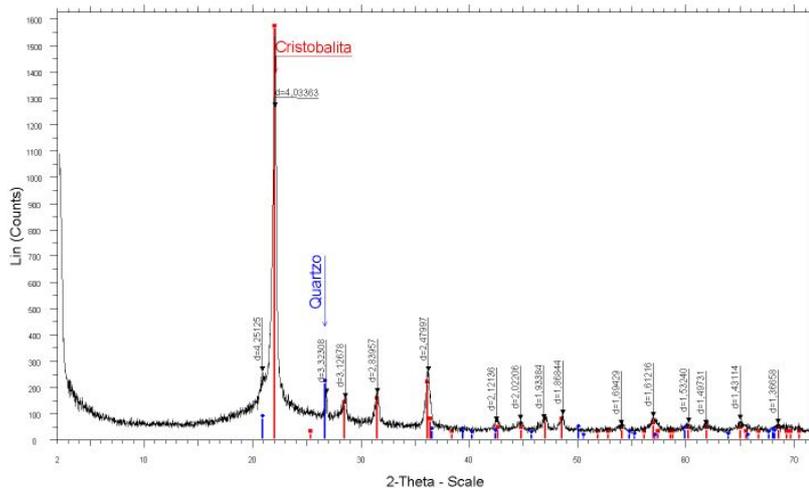
(e1) M2 tratada - TQ1



(e2) M2 tratada - TQ2



(e3) M2 tratada - TQ3



(e4) M2 tratada - TQ4

Anexo IV

Resultados Estadísticos

CAP. 4**TRATAMENTO FÍSICO****Moagem em moinho de bolas, a seco, com corpos moedores G1 - ITEM: 4.2.1.1****Dados do Arquivo:**

Cinza	tempo	diâmetro
CCA0	0	39,18
CCA0	120	13,07
CCA0	240	9,13
CCA0	480	6,83
CCA1	0	53,59
CCA1	120	11,43
CCA1	240	8,36
CCA1	480	6,22
CCA3	0	60,28
CCA3	120	15,91
CCA3	240	11,39
CCA3	480	7,39

Análise de variância

ANOVA	Fatores			
Efeito	G L	SQ	Df erro	Valor P
1 -Cinza	2	46,76	0,0	0,0
2 -Tempo de moagem	3	1282,65	0,0	0,0
12	6	26,12	0,0	0,0

Moagem em moinho de bolas, a seco, com corpos moedores G2 e G3 - ITEM: 4.2.1.1**Dados do Arquivo:**

Cinza	G	tempo	diâmetro
CCA0	G2	0	39,18
CCA0	G2	60	33,27
CCA0	G2	120	28,70
CCA0	G3	0	39,18
CCA0	G3	60	33,13
CCA0	G3	120	28,49
CCA7	G2	0	53,95
CCA7	G2	60	48,43
CCA7	G2	120	29,13
CCA7	G3	0	53,95
CCA7	G3	60	43,41
CCA7	G3	120	33,60
CCA9	G2	0	63,80
CCA9	G2	60	51,30
CCA9	G2	120	32,63
CCA9	G3	0	63,80
CCA9	G3	60	40,82
CCA9	G3	120	32,77

Análise de Variância

ANOVA	Fatores			
Efeito	GL	SQ	Df erro	Valor P
1 - Cinza	2	308,14	0,0	0,00000
2 - Granulometria - G	1	7,02	0,0	0,00000
3 - Tempo de moagem	2	688,47	0,0	0,00000
12	2	5,44	0,0	0,00000
13	4	58,40	0,0	0,00000
23	2	18,49	0,0	0,00000
123	4	5,67	0,0	0,00000

Moagem em moinho agitador, a seco - ITEM: 4.2.4**Dados do Arquivo:**

Cinza	tempo	diâmetro
CCA0	0	39,18
CCA0	15	9,83
CCA0	60	3,59
CCA9	0	64,95
CCA9	15	7,9
CCA9	60	3,99

Resultados da Análise Estatística

ANOVA	Fatores			
Efeito	GL	SQ	Df erro	Valor P
1 - Cinza	1	97,93	0,0	0,0
2 – Tempo de moagem	2	1407,49	0,0	0,0
12	2	118,03	0,0	0,0

Experimento preliminar I – ITEM 4.2.7**Dados do Arquivo:**

Cinza	G	f _c – NBR 5752	f _c – NBR 5752 Alt.
CCA0	micronização	35,0	35,9
CCA0	micronização	36,7	48,4
CCA0	micronização	36,5	49,0
CCA0	periquito	37,9	46,6
CCA0	periquito	38,0	35,1
CCA0	periquito	43,1	49,7
CCA8	micronização	16,8	20,7
CCA8	micronização	25,5	23,7
CCA8	micronização	22,5	24,0
CCA8	periquito	20,1	21,1
CCA8	periquito	24,4	25,4
CCA8	periquito	26,5	27,0

Análise de Variância – dados de f_c - NBR 5752

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- Cinza	1*	695,99	8*	70,66	0,000031*
2 – Moinho	1	24,21	8	2,46	0,155580
12	1	1,89	8	0,19	0,672822

Teste de Duncan – Cinza (dados de f_c - NBR 5752)

ANOVA	Fator: Cinza	
Cinza	CCA0	CCA8
	37,85138	22,61996
CCA 0	0,000239*	
CCA 8	0,000239*	

Análise de Variância – dados de f_c - NBR 5752 Alterada

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- Cinza	1*	1254,554*	8*	39,671*	0,000233*
2 – Moinho	1	0,833	8	0,026	0,875062
12	1	4,006	8	0,127	0,731114

Teste de Duncan – Cinza (dados de f_c - NBR 5752 Alterada)

ANOVA	Fator: Cinza	
Cinza	CCA0	CCA8
	44,08493	23,63536
CCA 0	0,000423*	
CCA 8	0,000423*	

Experimento preliminar II – ITEM 4.2.8

Análise de Variância – dados de f_c - NBR 5752

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- Moinho	2*	1094,22*	54*	12,449	0,000036*
2 – Cinza	2*	520,32*	54*	5,920	0,004737*
3- Tempo de moagem	2*	728,96*	54*	8,293	0,000723*
12	4	72,33	54	0,823	0,516302
13	4	169,66	54	1,930	0,118631
23	4*	296,99*	54*	3,379	0,015391*
123	8*	221,58*	54*	2,521	0,020859*

Teste de Duncan – Moinho (dados de f_c - NBR 5752)

ANOVA	Fator: Moinho		
Moinho	bolas 70,530	agitador 78,733	Periquito 83,064
bolas		0,002353*	0,000071*
agitador	0,002353*		0,095548
periquito	0,000071*	0,095548	

Teste de Duncan – Cinza (dados de f_c - NBR 5752)

ANOVA	Fator: cinza		
Cinza	CCA0 81,400	CCA7 78,207	CCA9 72,720
CCA0		0,216394	0,001843*
CCA7	0,216394		0,036112*
CCA9	0,001843*	0,0036112*	

Análise de Variância – dados de f_c - NBR 5752 Alterada

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- Moinho	2*	3302,094*	54*	37,889	0,000000*
2 – Cinza	2*	3285,935*	54*	37,704	0,000000*
3- Tempo de moagem	2*	455,007*	54*	5,221	0,008455*
12	4	185,476	54	2,128	0,089827
13	4*	318,142*	54*	3,650	0,010536*
23	4	131,935	54	1,514	0,0211137
123	8	107,006	54	1,228	0,300987

Teste de Duncan – Moinho (dados de f_c - NBR 5752 Alterada)

ANOVA	Fator: Moinho		
Moinho	bolas 97,71916	agitador	Periquito
bolas		0,613612	0,000060*
agitador	0,613612		0,000112*
periquito	0,000060*	0,000112*	

Teste de Duncan – Cinza (dados de f_c - NBR 5752 Alterada)

ANOVA	Fator: cinza		
Cinza	CCA0 113,5461	CCA7 105,8747	CCA9 91,79488
CCA0		0,004000*	0,000060*
CCA7	0,004000*		0,000113*
CCA9	0,000060*	0,000113*	

TRATAMENTO TÉRMICO**Tratamento Térmico TT0 - ITEM 4.3.2.1**

Dados do Arquivo:

Tempo	Cinza	L*
0	CCA0	21,94
0	CCA0	21,79
0	CCA1	19,87
0	CCA1	20,31
0	CCA3	29,76
0	CCA3	30,87
0	CCA7	26,50
0	CCA7	27,00
6	CCA0	44,63
6	CCA0	44,43
6	CCA1	57,97
6	CCA1	57,97
6	CCA3	41,39
6	CCA3	41,41
6	CCA7	48,06
6	CCA7	48,06
9	CCA0	44,89
9	CCA0	44,88
9	CCA1	57,40
9	CCA1	57,41
9	CCA3	38,96
9	CCA3	39,31
9	CCA7	49,33
9	CCA7	49,31
12	CCA0	44,47
12	CCA0	44,46
12	CCA1	58,34
12	CCA1	58,34
12	CCA3	39,22
12	CCA3	39,30
12	CCA7	48,40
12	CCA7	48,43

Análise de Variância

ANOVA	Fatores				
	Efeito	GL	SQ	Df erro	F
1- Tempo de queima	3	1059,21	16	18196,89	0,000
2 – Tipo de cinza	3	192,82	16	3312,55	0,000
12	9	67,61	16	1161,50	0,000

Tratamento Térmico TT1 - ITEM 4.3.2.2

Dados do Arquivo:

Tratamentos	Cinza	L*
natural	CCA0	21,94
natural	CCA0	21,79
natural	CCA1	19,87
natural	CCA1	20,31
natural	CCA3	29,76
natural	CCA3	30,87
natural	M1	21,20
natural	M1	21,38
natural	M2	25,95
natural	M2	26,59
TT1	CCA0	42,03
TT1	CCA0	42,03
TT1	CCA1	31,73
TT1	CCA1	31,76
TT1	CCA3	37,65
TT1	CCA3	38,41
TT1	M1	28,46
TT1	M1	28,47
TT1	M2	42,96
TT1	M2	42,96

Análise de Variância

ANOVA	Fatores				
	GL	SQ	Df erro	F	Valor P
1- Tratamento	1	803,90	10	6534,80	0,000
2 – Tipo de cinza	4	84,96	10	690,59	0,000
12	4	32,01	10	260,22	0,000

CAP 5**Avaliação colorimétrica no CIELab – ITEM 5.2.1.2****Análise de Variância – valores de luminância – L***

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- cinza	2*	50,841*	9*	1121,55*	0,000000*
2 – tratamento	2*	1210,644*	9*	26706,49*	0,000000*
123	4*	9,464*	9*	208,76*	0,000000*

Teste de Duncan – Cinza

ANOVA	Fator: cinza		
Cinza	CC0	CCA7	CCA9
	36,6338	40,1083	42,41663
CCA0		0,000210*	0,000210*
CCA7	0,000210*		0,000092*
CCA9	0,000210*	0,000092*	

Teste de Duncan – Tratamento

ANOVA	Fator: tratamento		
Tratamento	natural	térmico	químico
	23,57845	45,26593	50,31438
Natural		0,000210*	0,000092*
térmico	0,000210*		0,000210*
químico	0,000092*	0,000210*	

Água requerida – ITEM 5.2.5.3 a**Análise de Variância – Água requerida**

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- cinza	2	30,2769*	36	-	-
2 – tratamento	2	119,7687*	36	-	-
3 - moinho	1	148,1396*	36	-	-
12	4	54,0090*	36	-	-
13	2	26,4665*	36	-	-
23	2	14,8620*	36	-	-
123	4	45,3794*	36	-	-

Resistência à compressão – ITEM 5.2.5.3 b**Análise de Variância –IAP – NBR 5752**

ANOVA	Efeitos				
	Fatores	GL	SQ	Df erro	F
1- cinza	2*	1102,300*	36*	136,8655*	0,000000*
2 – tratamento	2*	321,584*	36*	39,9290*	0,000000*
3 - moinho	1*	7074,762*	36*	878,4282*	0,000000*
12	4*	167,785*	36*	20,8328*	0,000000*
13	2*	286,601*	36*	35,5855*	0,000000*
23	2*	215,681*	36*	26,7798*	0,000000*
123	4	12,637	36	1,5691	0,203537

Teste de Duncan – Cinza

ANOVA	Fator: Cinza		
Cinza	CC0 89,55354	CCA7 99,69582	CCA9 84,30154
CCA0		0,000122*	0,000124*
CCA7	0,000122*		0,000064*
CCA9	0,000124*	0,000064*	

Teste de Duncan – Tratamento

ANOVA	Fator: Tratamento		
Tratamento	natural 86,47608	térmico 92,42162	químico 94,65319
Natural		0,000122*	0,000064*
térmico	0,000122*		0,023986*
químico	0,000064*	0,23986*	

Teste de Duncan – Moinho

ANOVA	Fator: Moinho	
Moinho	Bolas 79,73749	Periquito 102,6298
Bolas		0,000122*
periquito	0,000122*	

Cap. 6**Resistência à compressão dos cimentos – ITEM 6.1.4****Versão 91****Teste de Duncan – Cinza**

ANOVA	Fator: Cinza		
Cinza	CC0 42,78823	CCA7 43,13214	CCA9 41,01205
CCA0		0,000371*	0,000009*
CCA7	0,000371*		0,000011*
CCA9	0,000009*	0,000011*	

Teste de Duncan – Tratamento

ANOVA	Fator: Tratamento		
Tratamento	natural 43,69136	térmico 40,87056	químico 42,37049
Natural		0,000011*	0,000009*
térmico	0,000011*		0,000009*
químico	0,000009*	0,000009*	

Teste de Duncan – Moinho

ANOVA	Fator: Moinho	
Moinho	Bolas 39,61110	Periquito 45,01059
Bolas periquito	0,000009*	

Teste de Duncan – Cinza

ANOVA	Fator: Cinza		
Cinza	CC0 42,78823	CCA7 43,13214	CCA9 41,01205
CCA0		0,000371*	0,000009*
CCA7	0,000371*		0,000011*
CCA9	0,000009*	0,000011*	

Teste de Duncan – Percentual de substituição

ANOVA	Fator: Percentual				
Percentual	6 44,29550	10 45,49500	15 45,06033	33 41,81522	50 34,88796
6		0,000011*	0,000009*	0,000009*	0,000011*
10	0,000011*		0,000490*	0,000003*	0,000004**
15	0,000009*	0,000490*		0,000011*	0,000003*
33	0,000009*	0,000003*	0,000011*		0,000009*
50	0,000011*	0,000004*	0,000003*	0,000009*	

Teste de Duncan – Idade

ANOVA	Fator: Idade			
Idade	3	7	28	91
3		0,000009*	0,000011*	0,000003*
7	0,000009*		0,000009*	0,000011*
28	0,000011*	0,000009*		0,000009*
91	0,000003*	0,000011*	0,000009*	

Versão 28 dias

Teste de Duncan – Cinza

ANOVA	Fator: Cinza		
Cinza	CC0	CCA7	CCA9
	42,78823	43,13214	41,01205
CCA0		0,418431*	0,000009*
CCA7	0,418431*		0,000011*
CCA9	0,000009*	0,000011*	

Teste de Duncan – Beneficiamento

ANOVA	Fator: beneficiamento		
Beneficiamento	I	II	III
	49,40014	46,53078	48,96152
I		0,000011*	0,84990*
II	0,000011*		0,000009*
III	0,84990	0,000009*	

Teste de Duncan – Moinho

ANOVA	Fator: Moinho	
Moinho	Bolas	Periquito
	44,94041	51,65455
Bolas		0,000009*
periquito	0,000009*	

Teste de Duncan – Percentual de substituição

ANOVA	Fator: Percentual				
Percentual	6	10	15	33	50
	48,58976	51,18755	50,38169	49,41858	41,90983
6		0,000003*	0,000011*	0,011711*	0,000009*
10	0,000003*		0,014247*	0,000011*	0,000004**
15	0,000011*	0,014247*		0,003397*	0,000003*
33	0,011711*	0,000011*	0,003397*		0,000011*
50	0,000009*	0,000004*	0,000003*	0,000011*	

Anexo V

Fichas-resumo dos Cimentos – CAp. 6

C1	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Bolas – 120 min	6 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	31,9	4,3		
	7	34,0	4,9		
	28	46,7	5,4		
	91	53,9*	-		
$f_c = 6,889 \ln(x) + 22,861$ (R ² = 0,892)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico	32,6 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:62,01 – CaO:7,82			3:17*	4:38*	1:21*

* valor estimado por ajuste de curva

C2	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Bolas – 120 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	27,3	2,7		
	7	38,3	4,9		
	28	52,2	2,8		
	91	65,8*	-		
$f_c = 11,093 \ln(I) + 15,766$ (R ² = 0,985)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico	33,5 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:59,26 – CaO:6,65			3:48	5:29	1:43

C3	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Bolas – 120 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	26,9	3,3		
	7	37,6	4,4		
	28	52,6	2,4		
	91	66,4*	-		
f_c = 11,482 Ln(I)+ 14,654 (R ² = 0,989)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:53,54 – CaO:5,24		35,4 %	0,5 mm	início:	fim:
				4:19*	6:21*
				diferença:	2:02*

* valor estimado por ajuste de curva

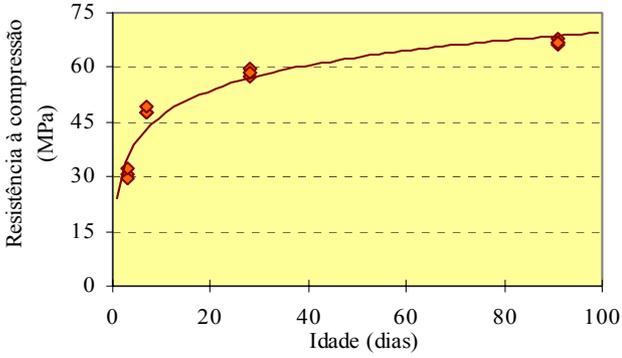
C4	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Bolas – 120 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	21,9	5,3		
	7	23,3	3,0		
	28	47,7	4,4		
	91	59,4*	-		
f_c = 11,788 Ln(x) + 6,2188 (R ² = 0,8844)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:44,87 – CaO:4,80		41,3 %	0,5 mm	início:	fim:
				5:08	7:49
				diferença:	2:41

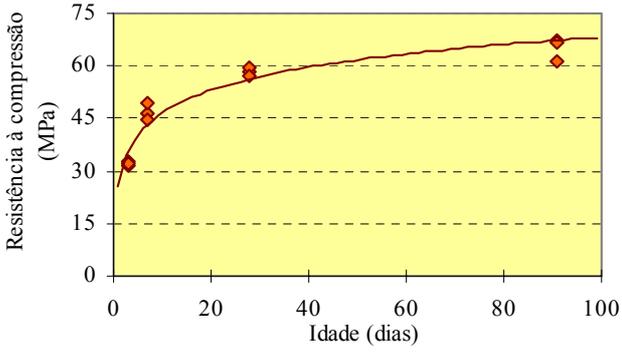
C5	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Bolas – 120 min	50 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	7,8**	4,2		
	7	12,6**	5,2		
	28	38,6	0,5		
	91	52,8*	-		
f_c = 13,985 Ln(I) - 10,256 (R ² = 0,932)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:33,86 – CaO:1,81	49,0 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
			4:37	6:45	2:08

* valor estimado por ajuste de curva
 ** valor inferior ao estabelecida na NBR

C6	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Periquito-30 min	6 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	25,1	2,7		
	7	43,4	4,2		
	28	55,4	3,2		
	91	62,7	2,5		
f_c = 10,649 Ln(x) + 17,705 (R ² = 0,920)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico OH:67,00 – CaO:9,59	31,2 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:10*	5:15*	2:05*

* valor estimado por ajuste de curva

C7	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Periquito-30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	31,7	4,8		
	7	48,3	2,3		
	28	58,7	1,8		
	91	67,0	1,5		
$f_c = 9,873 \text{ Ln}(x) + 24,163$ $(R^2 = 0,9363)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:62,22 – CaO:7,13	32,6 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
			3:01	4:46	1:45

C8	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Periquito-30 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	32,3	1,5		
	7	46,6	5,2		
	28	58,6	1,9		
	91	65,1	5,9		
$f_c = 9,309 \text{ Ln}(x) + 25,338$ $(R^2 = 0,931)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:56,88 – CaO:6,57	33,4 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:25*	4:43*	1:18*

* valor estimado por ajuste de curva

C9	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Periquito-30 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	24,0	2,7		
	7	41,3	3,3		
	28	54,8	3,8		
	91	74,8	2,0		
$f_c = 14,158 \ln(I) + 10,32$ (R ² = 0,979)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:48,78 – CaO:5,05	36,6 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			2:57	5:02	2:05

C10	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Natural	Periquito-30 min	50 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	17,7	4,0		
	7	36,0	2,4		
	28	54,6	4,0		
	91	72,2	1,7		
$f_c = 15,607 \ln(x) + 2,6832$ (R ² = 0,9881)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:14,57 – CaO:0,00	40,3 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:46	6:04	2:18

C 11	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Térmico	Bolas– 120 min	6 %	< 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	24,7	5,9		
	7	35,4	4,5		
	28	47,0	5,5		
	91	59,4*	-		
$f_c = 9,893 \ln(x) + 14,743$ $(R^2 = 0,9557)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico	33,3 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:62,86 – CaO:8,22			4:22*	5:59*	1:37*

* valor estimado por ajuste de curva

C 12	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Térmico	Bolas– 120 min	10 %	< 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	24,4	5,9		
	7	35,1	1,5		
	28	46,6	5,7		
	91	60,9*	-		
$f_c = 10,442 \ln(x) + 13,787$ $(R^2 = 0,9504)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico	35,8 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:59,26 – CaO:6,93			4:02	5:47	1:45

* valor estimado por ajuste de curva

C 13	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Térmico	Bolas– 120 min	15 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	27,7	1,4			
	7	35,9	4,6			
	28	48,2	0,81			
	91	59,1*	-			
f_c = 9,1294 Ln(x) + 17,895 (R ² = 0,9892)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:54,81 – CaO:5,32				início:	fim:	diferença:
		37,4 %	0 mm	3:42*	5:35*	1:53*

* valor estimado por ajuste de curva

C 14	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Térmico	Bolas– 120 min	33 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	17,2	2,0			
	7	28,3	2,6			
	28	38,2	0,37			
	91	58,7	4,7			
f_c = 11,621 Ln(x) + 4,2593 (R ² = 0,9719)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:49,95 – CaO:5,12				início:	fim:	diferença:
		45,2 %	0 mm	3:16	5:26	2:10

C 15	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP		
	CCA0	Térmico	Bolas– 120 min	50 %	< 75%		
Resultados obtidos							
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96						
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)				
	3	6,6**	5,3				
	7	14,4**	1,6				
	28	25,6**	3,0				
	91	35,6*	-				
	f _c = 8,373 Ln(x) - 2,1629 (R ² = 0,9955)						
	Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
	Pozolânico		51,8 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
	OH:43,17 – CaO:4,31				3:56	6:06	2:10

* valor estimado por ajuste de curva

** valor inferior ao estabelecido na NBR

C 16	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP		
	CCA0	Térmico	Periquito– 30 min	6%	≥ 75%		
Resultados obtidos							
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96						
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)				
	3	29,0	2,0				
	7	43,2	5,9				
	28	50,7	0,6				
	91	63,0*	-				
	f _c = 9,246 Ln(x) + 21,269 (R ² = 0,8881)						
	Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
	Não Pozolânico		31,3 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
	OH:63,28– CaO:7,98				2:17*	4:35*	2:18*

* valor estimado por ajuste de curva

C 17	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Térmico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	25,5	2,4		
	7	42,8	1,8		
	28	52,0	1,8		
	91	61,2	0,7		
$f_c = 9,6494 \ln(I) + 19,528$ $(R^2 = 0,9246)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:60,95 – CaO:6,69		32,4 %	0,5 mm	início:	fim: diferença:
				2:31	4:55 2:24

* valor estimado por ajuste de curva

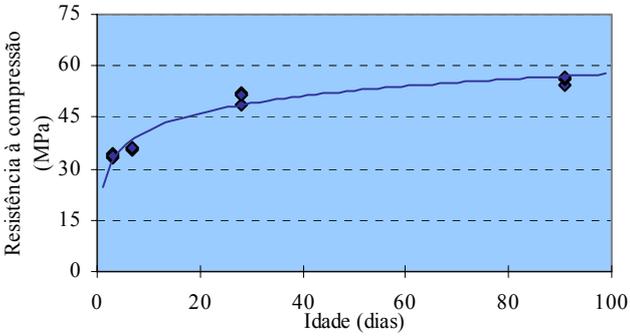
C 18	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Térmico	Periquito - 30min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	33,4	4,1		
	7	44,3	4,2		
	28	49,1	5,7		
	91	49,9	2,6		
$f_c = 4,6282 \ln(x) + 31,599$ $(R^2 = 0,7596)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:58,70 – CaO:6,48		33,1 %	0 mm	início:	fim: diferença:
				2:42*	5:14* 2:32*

* valor estimado por ajuste de curva

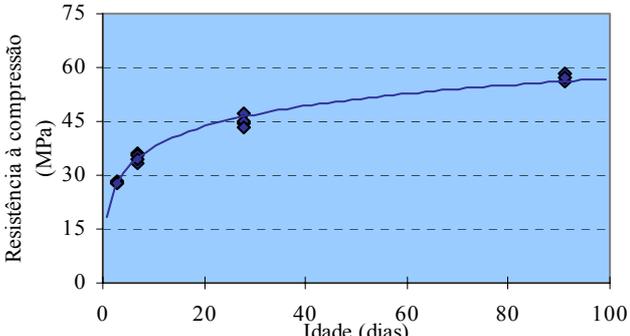
C 19	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Térmico	Periquito- 30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	25,1	3,0			
	7	39,4	2,1			
	28	58,1	3,5			
	91	64,4	5,1			
$f_c = 11,419 \ln(x) + 15,462$ $(R^2 = 0,9528)$						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		38,2 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:41,69 – CaO:3,99				3:18	6:54	3:36

C 20	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Térmico	Periquito- 30 min	50%	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	19,8	4,3			
	7	32,7	4,3			
	28	49,7	3,8			
	91	64,8	1,7			
$f_c = 13,023 \ln(I) + 6,269$ $(R^2 = 0,9955)$						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		42,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:17,35– CaO:0,00				3:50	8:32	4:42

* valor estimado por ajuste de curva

C 21	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Químico	Bolas– 120 min	6 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	33,7	1,6			
	7	35,9	1,1			
	28	50,9	4,8			
	91	55,7	2,8			
$f_c = 7,138 \ln(x) + 24,822$ (R ² = 0,9406)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		33,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:61,59 – CaO:8,62				3:44*	7:55*	4:11*

* valor estimado por ajuste de curva

C 22	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Químico	Bolas– 120 min	10 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	27,9	1,2			
	7	35,0	4,3			
	28	45,1	4,3			
	91	57,2	1,8			
$f_c = 8,391 \ln(x) + 18,364$ (R ² = 0,985)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		33,6 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:59,05 – CaO:8,26				3:45	6:00	2:15

C 23	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Químico	Bolas– 120 min	15 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	32,1	2,5			
	7	37,0	4,1			
	28	50,0	3,3			
	91	53,6	3,7			
f_c = 6,696 Ln(x) + 24,918 (R ² = 0,9542)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:50,65 – CaO:6,23				início:	fim:	diferença:
		31,2 %	0 mm	3:02	4:23	1:21

C 24	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA0	Químico	Bolas– 120 min	33 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	26,0	3,2			
	7	31,6	3,1			
	28	47,9	5,4			
	91	58,9*	-			
f_c = 10,033 Ln(x) + 13,636 (R ² = 0,9602)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:41,90 – CaO:6,21				início:	fim:	diferença:
		43,0 %	0,5 mm	3:15	5:33	2:18

* valor estimado por ajuste de curva

C 25	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Bolas– 120 min	50 %	< 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	17,5	1,8		
	7	28,9	4,0		
	28	40,9	2,9		
	91	53,5*	-		
$f_c = 10,192 \ln(x) + 7,541$ $(R^2 = 0,9788)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:27,94 – CaO:3,63	-	-	-	-	-

* valor estimado por ajuste de curva

C 26	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Periquito– 30 min	6 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	27,1	3,5		
	7	32,4	4,7		
	28	50,9	5,3		
	91	62,8*	-		
$f_c = 10,918 \ln(I) + 13,559$ $(R^2 = 0,9523)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:65,00 – CaO:8,04	31,2 %	1,0 mm	2:46*	6:10*	3:34*

* valor estimado por ajuste de curva

C 27	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	28,7	2,1		
	7	41,4	0,7		
	28	50,8	3,8		
	91	63,8	5,6		
$f_c = 9,9297 \ln(x) + 19,202$ $(R^2 = 0,970)$					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:60,87 – CaO:6,95	32,7 %	0,5 mm	2:45	5:50	3:05

C 28	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Periquito– 30 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	31,4	2,5		
	7	46,3	3,8		
	28	55,1	2,9		
	91	66,9	4,6		
$f_c = 9,922 \ln(I) + 22,731$ $(R^2 = 0,9563)$					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:51,74 – CaO:5,35	33,8 %	0 mm	2:40	5:25	2:45

C 29	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Periquito– 30 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	26,5	2,6		
	7	45,5	3,3		
	28	53,4	4,5		
	91	57,2	2,3		
$f_c = 8,579 \ln(I) + 22,568$ (R ² = 0,829)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico				início:	fim:
OH:42,39 – CaO:4,46		36,8 %	0 mm	1:44	4:00
				diferença:	2:16

C 30	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA0	Químico	Periquito– 30 min	50 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	19,3	3,0		
	7	38,0	5,6		
	28	53,8	0,9		
	91	62,9	0,8		
$f_c = 12,552 \ln(x) + 9,348$ (R ² = 0,9516)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico				início:	fim:
OH:17,83 – CaO:0,00		-	-	-	-
				diferença:	-

C 31	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Natural	Bolas – 120 min	6 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	34,2	5,2		
	7	43,4	4,7		
	28	47,5	4,1		
	91	54,9	2,3		
$f_c = 5,458 \ln(I) + 30,252$ (R ² = 0,9184)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico	32,4 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:63,21 – CaO:8,71			3:19*	4:36*	1:17*

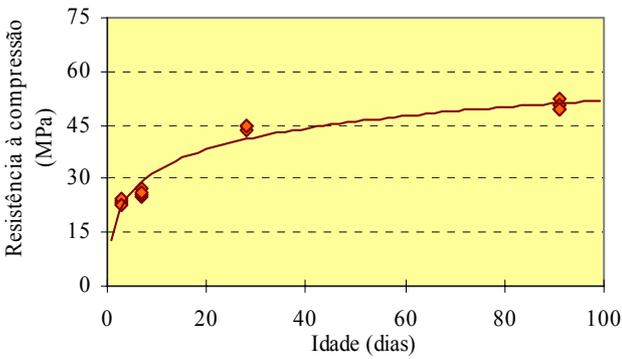
* valor estimado por ajuste de curva

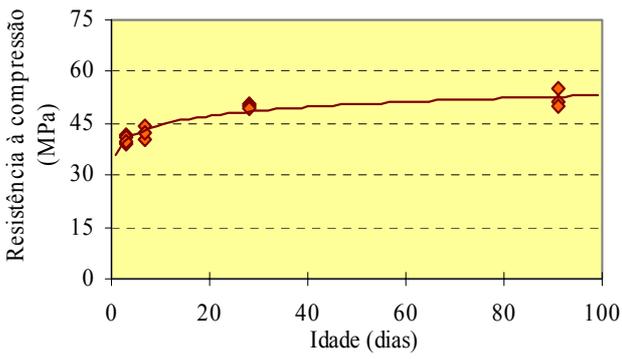
C 32	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Natural	Bolas – 120 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	40,0	1,8		
	7	40,3	3,5		
	28	53,9	5,2		
	91	56,4	5,6		
$f_c = 5,510 \ln(I) + 32,654$ (R ² = 0,875)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico	33,4 %	1,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:61,05 – CaO:8,28			3:38	5:13	1:35

C 33	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 15 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	37,4	2,49			
	7	41,4	2,37			
	28	48,8	4,83			
	91	60,2	1,6			
$f_c = 6,647 \ln(I) + 28,968$ ($R^2 = 0,964$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:56,84 – CaO:7,51				início:	fim:	diferença:
		34,5 %	1,0 mm	3:58*	5:06*	1:08*

* valor estimado por ajuste de curva

C 34	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 33 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	29,0	4,8			
	7	32,3	5,1			
	28	46,5	4,1			
	91	52,8	1,5			
$f_c = 7,408 \ln(I) + 19,661$ ($R^2 = 0,969$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:44,42 – CaO:5,56				início:	fim:	diferença:
		39,2 %	1,0 mm	4:45	6:10	1:25

C 35	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 50 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	23,6	2,8			
	7	26,1	5,1			
	28	44,3	1,7			
	91	50,3	3,6			
$f_c = 8,524 \text{ Ln(I)} + 12,666$ ($R^2 = 0,954$)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:26,32 – CaO:0,61	45,6 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:	
			4:47	6:27	1:40	

C 36	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Natural	Moinho: Periquito–30 min	Percentual de substituição: 6 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	40,3	3,2			
	7	42,2	4,65			
	28	50,0	0,88			
	91	52,0	5,84			
$f_c = 3,732 \text{ Ln(I)} + 35,984$ ($R^2 = 0,890$)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico OH:63,37 – CaO:8,24	32,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
			3:43*	5:34*	1:51*	

* valor estimado por ajuste de curva

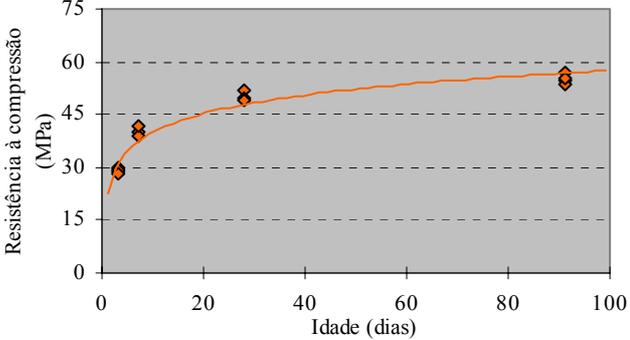
C 37	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Natural	Periquito-30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	36,8	5,6		
	7	40,4	1,9		
	28	55,2	5,9		
	91	70,1	3,3		
$f_c = 9,771 \ln(x) + 24,074$ $(R^2 = 0,962)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:58,74 – CaO:5,28	34,7 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:45	5:35	1:50

C 38	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Natural	Periquito-30 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	35,6	4,4		
	7	37,2	3,9		
	28	55,4	1,4		
	91	61,8	3,2		
$f_c = 8,551 \ln(I) + 24,41$ $(R^2 = 0,940)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:54,10 – CaO:4,75	35,0 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
			3:45*	5:36*	1:51*

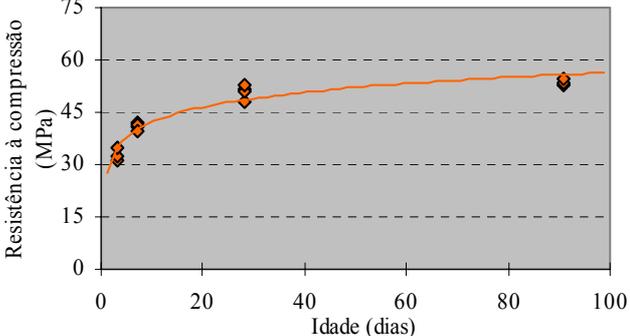
* valor estimado por ajuste de curva

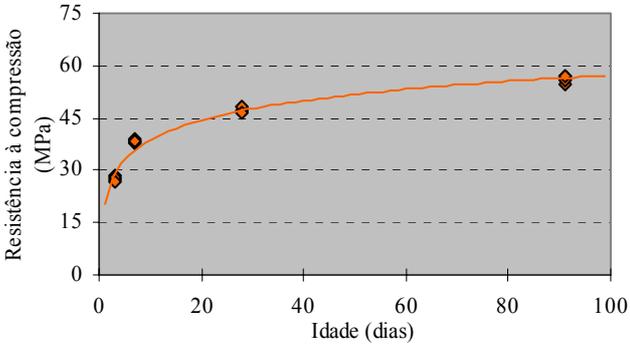
C 39	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Natural	Periquito-30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	29,5	4,7			
	7	40,6	3,4			
	28	58,5	4,4			
	91	55,8	6,0			
$f_c = 8,672 \ln(I) + 22,835$ (R ² = 0,826)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		37,9 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:42,1 – CaO:2,03				3:15	5:45	2:30

C 40	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Natural	Periquito-30 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	19,9	2,2			
	7	32,3	2,8			
	28	49,7	2,7			
	91	63,6	0,9			
$f_c = 12,752 \ln(I) + 6,696$ (R ² = 0,997)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		41,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:11,58 – CaO:0,00				2:10	6:00	3:50

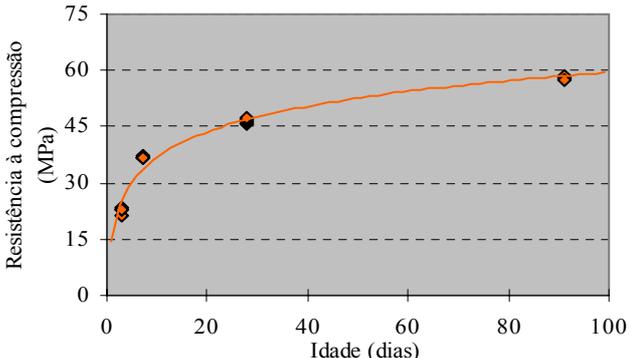
C 41	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Térmico	Moinho: Bolas– 120 min	Percentual de substituição: 6 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,9	3,4			
	7	40,1	3,6			
	28	50,2	3,4			
	91	55,1	3,3			
$f_c = 7,544 \text{ Ln}(I) + 22,72$ ($R^2 = 0,946$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico OH:63,16 – CaO:8,69	31,6 %	1,0 mm	início: 2:25*	fim: 5:21*	diferença: 1:56*	

* valor estimado por ajuste de curva

C 42	Cinza constituinte: CCA7	Beneficiamento: Térmico	Moinho: Bolas– 120 min	Percentual de substituição: 10 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	32,7	6,0			
	7	40,8	3,6			
	28	50,8	5,7			
	91	53,6	2,0			
$f_c = 6,218 \text{ Ln}(I) + 27,805$ ($R^2 = 0,916$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico OH:61,68 – CaO:8,41	32,8 %	0 mm	início: 2:43	fim: 5:28	diferença: 2:45	

C 43	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Térmico	Bolas– 120 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	27,6	2,6		
	7	38,4	1,5		
	28	47,1	2,0		
	91	56,0	2,9		
$f_c = 7,975 \ln(I) + 20,553$ (R ² = 0,976)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:57,47 – CaO:7,72	34,0 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
			3:04*	5:36*	2:32*

* valor estimado por ajuste de curva

C 44	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Térmico	Bolas– 120 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	22,7			
	7	36,8			
	28	46,4			
	91	57,8			
$f_c = 9,789 \ln(I) + 14,334$ (R ² = 0,968)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:46,52 – CaO:6,33	39,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:53	5:58	2:05

C 45	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Térmico	Bolas– 120 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	16,5	4,1			
	7	22,1	4,1			
	28	38,8	5,7			
	91	51,1	2,2			
$f_c = 10,402 \ln(I) + 3,957$ (R ² = 0,989)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico	46,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
OH:39,37 – CaO:5,44			4:04	6:09	2:05	

C 46	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Térmico	Periquito– 30 min	6%	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	39,5	1,7			
	7	40,2	2,5			
	28	48,3	3,2			
	91	47,3	5,2			
$f_c = 2,759 \ln(I) + 36,337$ (R ² = 0,754)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico	32,1 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
OH:64,00– CaO:7,84			2:57*	6:15*	3:18*	

* valor estimado por ajuste de curva

C 47	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Térmico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	34,8	5,3		
	7	43,4	3,9		
	28	46,5	4,5		
	91	53,4*	-		
$f_c = 4,9456 \text{ Ln}(I) + 31,048$ $(R^2 = 0,788)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:58,31 – CaO:5,60		33,3 %	0,5 mm	início:	fim:
				3:13	5:58
				diferença:	2:45

* valor estimado por ajuste de curva

C 48	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Térmico	Periquito - 30min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	36,0	3,5		
	7	42,6	3,3		
	28	52,8	4,3		
	91	62,9	3,9		
$f_c = 7,818 \text{ Ln}(I) + 27,291$ $(R^2 = 0,983)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:54,10 – CaO:4,91		33,9 %	0 mm	início:	fim:
				3:28*	5:42*
				diferença:	2:14*

* valor estimado por ajuste de curva

C 49	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Térmico	Periquito– 30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	30,6				
	7	32,1				
	28	54,1				
	91	62,0				
$f_c = 10,347 \ln(x) + 16,352$ $(R^2 = 0,941)$						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		38,2 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:45,26 – CaO:3,41				3:46	5:31	1:45

C 50	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Térmico	Periquito– 30 min	50%	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	24,8	6,0			
	7	35,0	6,0			
	28	36,4	4,6			
	91	43,5*	-			
$f_c = 4,7919 \ln(I) + 21,876$ $(R^2 = 0,683)$						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		41,21 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:21,68– CaO:0,00				3:09	5:48	2:39

* valor estimado por ajuste de curva

C 51	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Químico	Bolas– 120 min	6 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	30,0	4,1			
	7	37,2	6,0			
	28	49,5	5,9			
	91	56,2	5,8			
$f_c = 7,806 \ln(I) + 21,986$ (R ² = 0,959)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		32,0 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:62,31 – CaO:8,41				4:07*	6:40*	2:33*

C 52	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Químico	Bolas– 120 min	10 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	30,9	4,8			
	7	37,9	2,2			
	28	49,9	4,0			
	91	58,7	3,7			
$f_c = 8,198 \ln(I) + 22,023$ (R ² = 0,989)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		33,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:58,74 – CaO:8,49				3:42	6:12	2:30

C 53	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Bolas– 120 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	29,4	2,0		
	7	37,4	4,7		
	28	48,7	5,7		
	91	57,4	2,8		
$f_c = 9,766 \ln(I) + 11,322$ (R ² = 0,969)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:52,84 – CaO:7,31	37,6 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
			3:14*	5:38*	2:24*

C 54	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Bolas– 120 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	22,4	5,8		
	7	34,5	4,2		
	28	45,9	1,9		
	91	49,1	1,0		
$f_c = 7,929 \ln(I) + 16,178$ (R ² = 0,925)					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:41,27 – CaO:5,48	39,9 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			3:00	4:35	1:35

C 55	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Bolas– 120 min	50 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	13,3	3,8		
	7	18,8	3,0		
	28	39,0	4,8		
	91	49,9	1,5		
f_c = 11,264 Ln(I) -0,157 (R ² = 0,981)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:29,68 – CaO:4,14	47,4 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			4:23	5:03	0:40

C 56	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Periquito– 30 min	6 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	36,2	4,9		
	7	41,4	3,3		
	28	52,0	4,4		
	91	56,1	5,2		
f_c = 6,067 Ln(I) + 29,88 (R ² = 0,949)					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico OH:62,65 – CaO:8,06	31,6 %	1,5 mm	início:	fim:	diferença:

C 57	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	34,3	5,6		
	7	39,2	3,6		
	28	55,6	4,3		
91	52,6	4,0			
$f_c = 6,108 \ln(I) + 28,911$ $(R^2 = 0,793)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:58,62 – CaO:7,50	32,6 %	0 mm	2:43	5:08	2:25

C 58	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA7	Químico	Periquito– 30 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	34,4	2,4		
	7	34,2	2,9		
	28	54,2	4,7		
91	54,2	3,9			
$f_c = 7,089 \ln(I) + 24,69$ $(R^2 = 0,836)$					
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico			início:	fim:	diferença:
OH:52,49 – CaO:5,76	34,0 %	0,5 mm			

C 59	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Químico	Periquito– 30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	30,9	1,8			
	7	36,7	1,8			
	28	56,5	5,2			
	91	69,5*	-			
$f_c = 11.696 \ln(I) + 16,727$ $(R^2 = 0,960)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		39,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:39,37 – CaO:5,44				3:05	5:18	2:15

C 60	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA7	Químico	Periquito– 30 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	21,2	2,9			
	7	32,1	3,3			
	28	51,1	5,9			
	91	59,9	3,6			
$f_c = 11,599 \ln(x) + 9,524$ $(R^2 = 0,977)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		45,4 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:9,1 – CaO:0,00				4:10	6:35	2:25

C 61	Cinza constituinte: CCA9	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 6 %	IAP < 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,3	2,3			
	7	41,9	3,7			
	28	49,2	3,6			
91	60,8*	-				
$f_c = 8,68 \text{Ln}(x) + 21,611$ $(R^2 = 0,8805)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico OH:61,80 – CaO:7,46	32,6 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:	

* valor estimado por ajuste de curva

C 62	Cinza constituinte: CCA9	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 10 %	IAP < 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	29,7	5,2			
	7	43,4	4,5			
	28	50,8	1,7			
91	62,9*	-				
$f_c = 9,043 \text{Ln}(x) + 22,06$ $(R^2 = 0,8946)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:60,32 – CaO:6,45	33,2 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:	

* valor estimado por ajuste de curva

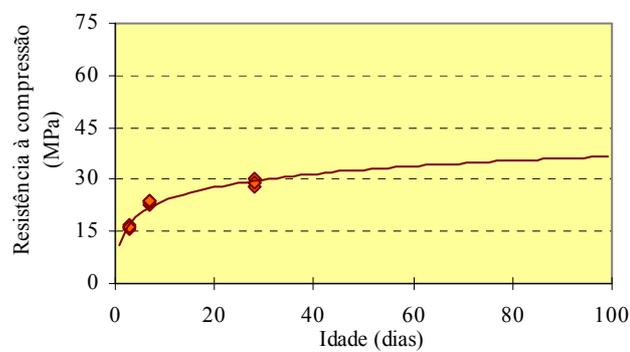
C 63	Cinza constituinte: CCA 9	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 15 %	IAP < 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	25,7	1,3			
	7	38,9	1,7			
	28	47,8	2,4			
	91	60,2*	-			
$f_c = 9,549 \ln(X) + 17,134$ (R ² = 0,9357)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:57,14 – CaO:6,05	35,2 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:	

* valor estimado por ajuste de curva

C 64	Cinza constituinte: CCA 9	Beneficiamento: Natural	Moinho: Bolas – 120 min	Percentual de substituição: 33 %	IAP < 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	24,6	4,5			
	7	33,2	3,2			
	28	39,8	3,7			
	91	48,7*	-			
$f_c = 6,732 \ln(x) + 18,308$ (R ² = 0,9327)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:46,56 – CaO:5,16	38,8 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:	

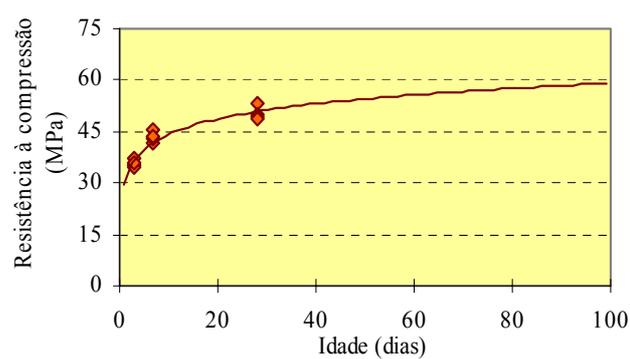
* valor estimado por ajuste de curva

C 65	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Natural	Bolas – 120 min	50 %	< 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	16,4	4,0			
	7	23,4	3,4			
	28	29,1**	4,5			
	91	36,1* **	-			
	$f_c = 5,503 \ln(x) + 11,288$ (R ² = 0,9466)					
	Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
	Pozolânico OH:37,67 – CaO:3,1				início:	fim:
			44,0 %	0 mm	4:40	6:40 2:00



* valor estimado por ajuste de curva
 ** valor inferior ao estabelecida na NBR

C 66	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Natural	Periquito-30 min	6 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	35,5	4,1			
	7	43,5	5,0			
	28	50,3	5,9			
	91	58,4*	-			
	$f_c = 6,429 \ln(x) + 29,438$ (R ² = 0,914)					
	Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
	Não Pozolânico OH:66,30 – CaO:7,72				início:	fim:
			32,6 %	0,5 mm		



* valor estimado por ajuste de curva

C 67	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Natural	Periquito-30 min	10 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	35,7	4,8			
	7	44,9	3,4			
	28	51,8	5,9			
	91	60,7*	-			
$f_c = 6,961 \ln(x) + 29,334$ (R ² = 0,9056)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		33,2 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:51,62 – CaO:5,37				4:31	6:46	2:15

* valor estimado por ajuste de curva

C 68	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Natural	Periquito-30 min	15 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	31,0	0,8			
	7	42,2	3,7			
	28	49,4	4,1			
	91	59,9*	-			
$f_c = 7,967 \ln(x) + 23,933$ (R ² = 0,9183)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		36,0 %	1,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:50,00 – CaO:2,43						

* valor estimado por ajuste de curva

C 69	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Natural	Periquito-30 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	22,1	4,7		
	7	34,8	4,1		
	28	50,9	4,8		
	91	66,4*	-		
f_c = 12,787 Ln (I) + 8,758 (R ² = 0,9841)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:43,93 – CaO:1,47		40,3 %	0,5 mm	início:	fim: diferença:
				4:36	7:36 3:00

C 70	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Natural	Periquito-30 min	50 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	14,7	4,8		
	7	27,3	3,0		
	28	40,9	2,0		
	91	55,2*	-		
f_c = 11,549 Ln(x) + 3,0715 (R ² = 0,9836)					
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:26,11 – CaO:0,00		43,7 %	0,5 mm	início:	fim: diferença:
				6:30	7:30 1:00

C 71	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Bolas– 120 min	6 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	32,7	4,8			
	7	35,6	2,2			
	28	44,8	2,8			
	91	50,9*	-			
$f_c = 5,497 \ln(x) + 26,123$ (R ² = 0,9577)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		32,4 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:61,13 – CaO:9,15				3:56	5:31	1:35

* valor estimado por ajuste de curva

C 72	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Bolas– 120 min	10 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	27,6	1,7			
	7	34,6	5,8			
	28	46,0	2,8			
	91	55,7*	-			
$f_c = 8,224 \ln(I) + 18,573$ (R ² = 0,9837)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		33,6 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:59,51 – CaO:8,56				3:56	5:31	1:35

* valor estimado por ajuste de curva

C 73	Cinza constituinte: CCA 9	Beneficiamento: Térmico	Moinho: Bolas– 120 min	Percentual de substituição: 15 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,5	3,0			
	7	34,7	5,2			
	28	49,5	1,0			
	91	60,4*	-			
$f_c = 9,578n(x) + 17,237$ (R ² = 0,9852)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:56,68 – CaO:7,56	34,9 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:	

* valor estimado por ajuste de curva

C 74	Cinza constituinte: CCA 9	Beneficiamento: Térmico	Moinho: Bolas– 120 min	Percentual de substituição: 33 %	IAP ≥ 75%	
	Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	22,1	3,5			
	7	24,7	4,5			
	28	43,9	2,6			
	91	54,9*	-			
$f_c = 10,303 \text{ Ln}(x) + 8,449$ (R ² = 0,9303)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:44,53 – CaO:7,16	39,9 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	

* valor estimado por ajuste de curva

C 75	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Bolas– 120 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	13,7	2,1			
	7	23,0	5,0			
	28	34,1	3,1			
	91	45,0*	-			
$f_c = 8,954 \text{ Ln}(x) + 4,6127$ $(R^2 = 0,9846)$						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:39,07 – CaO:6,88	46,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
			6:30	9:50	3:20	

* valor estimado por ajuste de curva

C 76	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Periquito– 30 min	6%	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,4	2,8			
	7	32,3	3,6			
	28	46,9	4,2			
	91	50,6	2,2			
$f_c = 6,971 \text{ Ln}(x) + 20,385$ $(R^2 = 0,953)$						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico OH:61,54– CaO:8,28	32,4 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:	

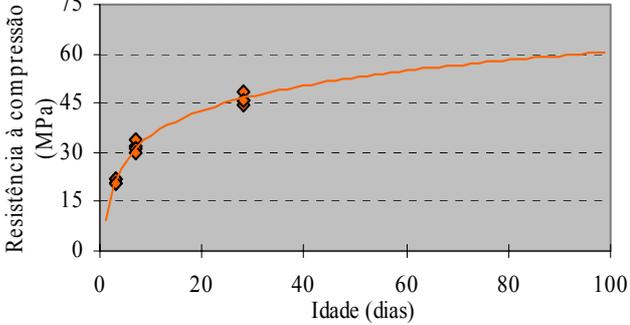
* valor estimado por ajuste de curva

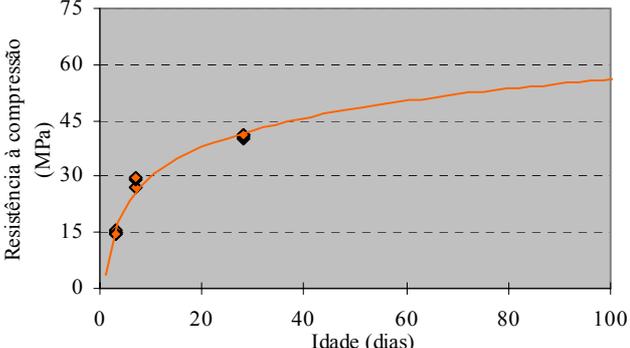
C 77	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	29,8	2,3			
	7	35,8	1,4			
	28	47,6	1,1			
	91	53,0	1,3			
$f_c = 7,039Ln(I) + 22,383$ $(R^2 = 0,9857)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		33,2 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:59,31 – CaO:8,12				2:57	5:14	2:17

* valor estimado por ajuste de curva

C 78	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Periquito - 30min	15 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,7	2,5			
	7	34,3	5,5			
	28	53,6	4,7			
	91	66,5*	-			
$f_c = 11,551 Ln(x) + 14,416$ $(R^2 = 0,9607)$						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		34,9 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:53,44 – CaO:6,17						

* valor estimado por ajuste de curva

C 79	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Periquito– 30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	21,2	4,2			
	7	31,8	6,0			
	28	46,1	5,2			
	91	59,5*	-			
$f_c = 11,1 \text{ Ln}(x) + 9,43$ ($R^2 = 0,9824$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:43,32 – CaO:4,78	39,6 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
			4:12	6:42	2:30	

C 80	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Térmico	Periquito– 30 min	50%	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	15,0	4,4			
	7	28,6	5,9			
	28	40,8	1,3			
	91	55,0*	-			
$f_c = 11,338 \text{ Ln}(I) + 3,8243$ ($R^2 = 0,9734$)						
Pozolanicidade NBR 5753/92	Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico OH:18,22– CaO:0,00	42,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
			3:12	5:30	2:18	

* valor estimado por ajuste de curva

C 81	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Bolas– 120 min	6 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	32,8	3,7			
	7	39,8	1,2			
	28	47,8	3,0			
	91	50,4	1,8			
f_c = 5,2945 Ln(x) + 28,18 (R ² = 0,9425)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		32,5 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:66,19 – CaO:8,64				2:34	4:43	2:09

* valor estimado por ajuste de curva

C 82	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Bolas– 120 min	10 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	27,7	4,5			
	7	39,9	3,6			
	28	47,9	3,1			
	91	59,5*	-			
f_c = 8,887 Ln(x) + 19,44 (R ² = 0,9287)						
Pozolanidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Não Pozolânico		32,8 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:61,74 – CaO:8,36				2:34	4:43	2:09

C 83	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Químico	Bolas– 120 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	29,9	2,3		
	7	36,6	5,3		
	28	38,7	4,3		
	91	50,0	3,1		
$f_c = 5,304 \ln(x) + 24,347$ (R ² = 0,8995)					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:59,11 – CaO:7,68		34,4 %	0 mm	início:	fim: diferença:

C 84	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Químico	Bolas– 120 min	33 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	25,8	2,8		
	7	31,2	4,9		
	28	44,7	3,5		
	91	47,4	4,1		
$f_c = 6,643 \ln(x) + 19,011$ (R ² = 0,9464)					
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03	
Pozolânico OH:47,97 – CaO:5,29		37,8 %	0,5 mm	início:	fim: diferença:

C 85	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Bolas– 120 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	18,2	4,0			
	7	24,4	2,2			
	28	36,6	3,0			
	91	41,1	4,5			
$f_c = 6,956 \ln(x) + 11,186$ ($R^2 = 0,9667$)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Pozolânico	41,9 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:	
OH:36,44 – CaO:2,79			2:35	5:35	3:00	

* valor estimado por ajuste de curva

C 86	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Periquito– 30 min	6 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	35,7	2,3			
	7	43,5	5,6			
	28	51,4	5,9			
	91	56,5	1,5			
$f_c = 5,915 \ln(x) + 30,769$ ($R^2 = 0,9366$)						
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis-tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03			
Não Pozolânico	32,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:	
OH:63,56 – CaO:8,08						

* valor estimado por ajuste de curva

C 87	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Químico	Periquito– 30 min	10 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	37,7	2,1		
	7	45,5	3,9		
	28	53,9	5,7		
	91	60,5	2,1		
$f_c = 6,575 \ln(x) + 31,521$ $(R^2 = 0,9627)$					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:55,87 – CaO:7,20	32,8 %	0 mm	início:	fim:	diferença:
			2:54	4:39	1:45

C 88	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP
	CCA 9	Químico	Periquito– 30 min	15 %	≥ 75%
Resultados obtidos					
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96				
	Idade(dias)	f_c (MPa)	D.P.R. (%)		
	3	36,3	2,7		
	7	42,1	4,5		
	28	53,3	4,2		
	91	62,0	2,2		
$f_c = 7,623 \ln(x) + 27,65$ $(R^2 = 0,9848)$					
Pozolanidade NBR 5753/92	Água Consis- tência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico OH:54,25 – CaO:6,97	34,0 %	0 mm	início:	fim:	diferença:

C 89	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Periquito– 30 min	33 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	28,5	3,7			
	7	35,1	5,4			
	28	54,2	3,7			
	91	61,9	1,5			
f_c = 10,305 Ln (I) + 16,873 (R ² = 0,9763)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		38,4 %	0,5 mm	início:	fim:	diferença:
OH:45,54 – CaO:6,17				3:10	4:45	1:35

C 90	Cinza constituinte:	Beneficiamento:	Moinho:	Percentual de substituição:	IAP	
	CCA 9	Químico	Periquito– 30 min	50 %	≥ 75%	
Resultados obtidos						
Propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão NBR 7215/96					
	Idade(dias)	f _c (MPa)	D.P.R. (%)			
	3	19,6	3,6			
	7	34,0	3,7			
	28	47,6	3,4			
	91	52,9	3,6			
f_c = 9,408 Ln(x) + 12,726 (R ² = 0,9373)						
Pozolanicidade NBR 5753/92		Água Consistência Normal NBR NM 43/03	Expansibilidade a quente NBR 11578/91	Tempo de pega (h) NBR NM 65/03		
Pozolânico		41,0 %	1,0 mm	início:	fim:	diferença:
OH:32,79 – CaO:5,21				3:20	4:55	1:35