

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO

DAIANE CALHEIRO

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS NA MOAGEM DE CINZAS DE
CASCA DE ARROZ PARA SUA ADEQUAÇÃO COMO CO-
PRODUTO**

SÃO LEOPOLDO

2011

DAIANE CALHEIRO

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS NA MOAGEM DE CINZAS DE
CASCA DE ARROZ PARA SUA ADEQUAÇÃO COMO CO-
PRODUTO**

Dissertação, apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes
Co-orientadora: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2011

INSTITUIÇÕES E FONTES PAGADORAS

Este trabalho foi realizado na Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

FONTES FINANCIADORAS



Banco Santander S.A.

C152i Calheiro, Daiane

Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como co-produto / Daiane Calheiro. -- 2011.

97 f.: il. ; 30cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes;
Coorientadora: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski

1. Engenharia civil. 2. Cinza - Casca de arroz - Moagem. 3. Construção civil - Casca de arroz - Aditivos de moagem. I. Título. II. Moraes, Carlos Alberto Mendes. III. Kulakowski, Marlova Piva.

CDU 624

Catálogo na Publicação:
Bibliotecário Eliete Mari Doncato Brasil - CRB 10/1184

DAIANE CALHEIRO

**“INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS NA MOAGEM DE
CINZAS DE CASCA DE ARROZ PARA SUA ADEQUAÇÃO
COMO CO-PRODUTO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 03 de março de 2011


Carlos Alberto Mendes Moraes
Orientador


Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora


Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak – UNISINOS


Prof. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - UFRGS


Prof. Dra. Feliciane Andrade Brehm- UNISINOS

Dedico este trabalho aos meus pais Sérgio e Elonilde e meu irmão Vagner que sempre me deram o maior apoio e amor que precisei.

Ao meu amor incondicional Maicon pelo companheirismo e apoio ao longo desta caminhada.

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Mais uma etapa concluída, mas para que isso se tornasse realidade recebi apoio e dedicação de muitos amigos.

Agradeço em especial o meu orientador, Prof. Carlos Alberto Mendes Moraes, por todo seu incentivo, orientação e dedicação. E também por toda a oportunidade de crescimento profissional e pessoal que me proporcionou através de seus ensinamentos.

À Profa. Marlova Piva Kulakowski, pela orientação e apoio nesta caminhada.

Às professoras Feliciane A. Brehm e Amanda G. Kieling pela amizade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer o Grupo NucMat por toda ajuda que recebi e queria representá-los no nome de Lara Fernandes e Joice B. Schneider pela amizade e ajuda nas análises e a Cynthia F. B. da Silveira por me ajudar a me manter calma, minha inspiração de qualidade de vida.

Ao Grupo do P+L pela paciência e compreensão de muitas vezes não estar tão presente nas atividades.

Ao pessoal do Laboratório de metalurgia física pelas conversas e ajudas nos ensaios.

Às gurias do Laboratório de Geoquímica e as do Lab. de Química pelo apoio nos ensaios químicos.

Ao pessoal do Laboratório de Construção Civil pelo apoio e em especial a Daiana C. M. Arnold pela amizade e ajuda nos ensaios.

Ao Lucas F. Krug amigo e companheiro de trabalho pelas tarefas divididas e muitas discussões sobre os resultados.

Ao meu amigo Luciano pelas incansáveis leituras do trabalho.

Ao Banco Santander e a FINEP pelo incentivo financeiro.

A Metalúrgica Lorscheitter pelo resíduo fornecido para o desenvolvimento da pesquisa.

À minha grande amiga Rosângela A. Bersch que me apoiou sempre que precisei.

Por fim agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que alcançasse mais este objetivo.

RESUMO

De acordo com os novos paradigmas ambientais, a busca pelo desenvolvimento sustentável é imprescindível para o prolongamento das reservas naturais e a redução da poluição. No intuito de minimizar os impactos ambientais negativos, cada vez mais se investe em pesquisas que englobam o uso eficiente de recursos naturais não renováveis. A agroindústria é um grande gerador de resíduos e devido a esse fato, está começando a perceber a importância de destiná-los corretamente. A cinza de casca de arroz (CCA), que é proveniente da queima da casca utilizada para a geração de energia, é um resíduo gerado em grandes quantidades e de baixa densidade, dificultando o gerenciamento, pois necessita de um grande espaço para o armazenamento e o descarte. Desta forma, a reciclagem destas cinzas torna-se uma excelente alternativa para minimizar o impacto ambiental provocado pelo seu descarte inadequado e reduzir os custos de disposição em aterros controlados. A CCA possui um grande teor de sílica em sua composição, podendo se tornar um co-produto para vários segmentos industriais como: construção civil, cerâmica, química, vidros e siderurgia. No intuito de incentivar a inserção desse resíduo como um co-produto de maior valor agregado, o trabalho visa contribuir para aumentar a eficiência da moagem da cinza da casca de arroz. Neste sentido, aditivos foram utilizados para facilitar a moagem para sua adequação como co-produto, considerando a qualidade do material obtido, o tempo e a economia do processo. Para a elaboração deste trabalho, a CCA foi moída sem e com uso de aditivo em 4 tempos diferentes (30min., 1h, 2h e 4h) e foram adicionados dois tipos de aditivos, um comercial e um resíduo do setor metal-mecânico. Estes aditivos foram adicionados em 3 concentrações diferentes: 0,03%, 0,045% e 0,06% para o comercial e 2%, 6% e 10% para o resíduo. Para avaliar o processo de moagem foram realizadas caracterizações química, física e estrutural de todas as amostras: CCA Bruta, CCA Segregada e as CCA moídas. A caracterização da CCA utilizada nesta dissertação mostrou um material mais adequado comparado a trabalhos anteriores confirmando a influência do aumento da eficiência energética da queima da casca na qualidade da CCA como coproduto. Com relação ao uso dos aditivos SIKA-GRIND 200 e pó de granalha, os resultados indicaram que estes não reduziram significativamente o diâmetro médio das partículas. Entretanto, o uso de aditivos para reduzir o tamanho de grão da CCA deve ser melhor estudado para qualificá-la como matéria prima na construção civil.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz, moagem, aditivos de moagem.

ABSTRACT

According to the new environmental paradigms, the pursuit of sustainable development is essential for the lengthening of natural reserves and reduction of pollution. In order to minimize negative environmental impacts, ever more investments are made in research about the efficient use of nonrenewable natural resources. Agribusiness is a major generator of waste and due to that fact, begins to realize the importance of proper disposal. Rice husk ash (RHA), which proceeds from the burning of the husk for energy generation, is generated in large quantities and low density, making it difficult to manage, as it requires a large space for storage and disposal. Thus, recycling this ash becomes an excellent alternative to minimize the environmental impact caused by its inappropriate disposal and reduce landfill disposal costs. RHA has a high content of silica in its composition, making its use possible as a by-product to several industries such as: construction, ceramics, chemical, glass and steel. To encourage the placement of this waste as a by-product with higher aggregated value, this study aims to contribute to increase the efficiency of rice husk ash milling. In this way, additives were used to facilitate the milling for its suitability as a by-product, considering the quality, time and process economy. To elaborate this study, the rice husk ash was ground with and without additives in four different times (30min., 1h, 2h and 4h) and two types of additives were used, a commercial additive and a solid waste from the metal-mechanic industry (cleaning cast parts dust). These additives were added in three different concentrations: 0.03, 0.045 and 0.06% for the commercial additive and 2, 6 and 10% for the dust. To evaluate the milling process, chemical, physical and structural characterizations were carried out for all samples: as received RHA, segregated RHA and grounded RHA. The characterization of RHA, used in this dissertation, showed a material more adequate, when compared to former works using RHA from the same source, confirming the influence of the energetic efficiency of the rice shell burning on the RHA quality as by-product. In relation to the additives SIKA-GRIND 200 and granalha dust, the results indicated that they did not influence significantly in the decreasing of medium diameter of RHA particles. However, the use of additives to reduce the size of the RHA grains must be better studied to qualify RHA as a raw material to civil construction.

Keywords: rice husk ash, milling, milling additives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação da CCA.....	20
Figura 2 - Estrutura Cristalina.....	21
Figura 3 - Estrutura Amorfa.....	21
Figura 4 - Cinza de Casca de Arroz	23
Figura 5 - Micrografia CCA (aumento 80x).....	25
Figura 6 - Micrografia da CCA moída (aumento 80X).....	25
Figura 7 - Estrutura completa de um moinho de bolas.....	33
Figura 8 - Moagem regime catarata	34
Figura 9 - Moagem regime cascata.....	34
Figura 10 - Programa Experimental	40
Figura 11 - Moinho de Bolas	44
Figura 12 - Fluxograma do Processo de Fundição.....	46
Figura 13 - Equipamento de Jato de Granalha.....	46
Figura 14 - CCA retida na peneira 1,2mm.....	55
Figura 15 - CCA passante na peneira 1,2mm.....	55
Figura 16 - Distribuição Granulométrica da CCA Bruta e Segregada	56
Figura 17 - Difratoograma da CCA Bruta	60
Figura 18 - Difratoograma da CCA Segregada e moída (30 min).	60
Figura 19 - Difratoograma da amostra CCA2 bruta.....	61
Figura 20 - Amostra da CCA ₂	62
Figura 21 - Amostra da CCA Bruta.....	62
Figura 22 - Difratoograma do Resíduo Pó de granalha.....	62
Figura 23 - Difratoograma do pó de aciaria elétrica	63
Figura 24 - Difratoograma da CCA Ad. Com. 0,03%, 30 min.	63
Figura 25 - Difratoograma da CCA Ad. Com. 0,045%, 30min	64
Figura 26 - Difratoograma da CCA Ad. Com. 0,06%, 30min	64
Figura 27 - Difratoograma da CCA Ad. PG 2%, 30min.	65
Figura 28 - Difratoograma da CCA Ad. PG 6%, 30min.	65
Figura 29 - Difratoograma da CCA Ad. PG 10%, 30 min.	65
Figura 30 - Micrografia CCA Moída.....	66
Figura 31 - Micrografia CCA Ad. PG10%.....	66

Figura 32 - Micrografia CCA Ad. Com., 0,06%.....	67
Figura 33 - Micrografia CCA Ad. PG	68
Figura 34 - Ponto a CCA Ad. PG.....	68
Figura 35 - Micrografia Resíduo PG.....	69
Figura 36 - Ponto 1 identificado na micrografia	69
Figura 37 - Ponto 2 identificado na micrografia.....	69
Figura 38 - Ponto 3 identificado na micrografia	70
Figura 39 - Ponto 4 identificado na micrografia.....	70
Figura 40 - Comparação do diâmetro médio x tempo das CCA.....	75
Figura 41 - CCA moída por 2 horas	76
Figura 42 - CCA moída por 4 horas.....	76
Figura 43 - Distribuição granulométrica do resíduo PG.....	77
Figura 44 - IAP x Água Requerida da CCA Moída	79
Figura 45 - IAP x Água Requerida da CCA Ad. Comercial.....	79
Figura 46 - IAP x Água Requerida da CCA Ad. PG.....	80
Figura 47 - Argamassa com CCA.....	80
Figura 48 - CP com argamassa com CCA.....	80
Figura 49 - Diâmetro médio x IAP da CCA Moída.....	81
Figura 50 - Diâmetro médio x IAP da CCA Ad. Comercial	82
Figura 51 - Diâmetro médio X IAP da CCA Ad. Pó de Granalha.....	82
Figura 52 - IAP das CCA Moídas	83
Figura 53 - IAP das CCA Ad. Com.....	83
Figura 54 - IAP das CCA Ad. PG	84
Figura 55 - Área Superficial Específica das CCA com Aditivo Comercial	97
Figura 56 - Área Superficial Específica das CCA com Aditivo Resíduo PG	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da CCA.	24
Tabela 2 - Comparação da Superfície específica e atividade pozolânica com o tempo de moagem	26
Tabela 3 - Comparação entre o diâmetro médio das partículas e o tempo de moagem.	27
Tabela 4 - Ganhos de rendimento no processo de moagem com adição de aditivos	36
Tabela 5 - Identificação das Análises de Caracterização	41
Tabela 6 - Número de ensaios realizados no programa experimental	41
Tabela 7 - Análise química do resíduo sólido (pó de granalha)	49
Tabela 8 - Identificação das Amostras	54
Tabela 9 - Composição química das CCA	57
Tabela 10 - Exigências químicas NBR 12653	58
Tabela 11 - Composição química do Resíduo PG	59
Tabela 12 - EDS para CCA Moída, CCA Ad. Com. e CCA Ad. PG	67
Tabela 13 - EDS do Ponto a Identificado no Resíduo PG	68
Tabela 14 - EDS dos Pontos Identificados no Resíduo PG	70
Tabela 15 - Massa específica da CCA	72
Tabela 16 - Distribuição Granulométrica das partículas	74
Tabela 17 - Composição química do cimento	77
Tabela 18 – Caracterização física do cimento	78
Tabela 19 - IAP e Água requerida das CCA	78
Tabela 20 - Comparação entre Condutividade Elétrica e IAP	85
Tabela 21 - Área Superficial Específica	96

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz
FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação
CCA – Cinza de Casca de Arroz
CA – Casca de Arroz
SiO₂ – Dióxido de Silício
SiCl₄ – Cloreto de Silício
Si₃N₄ – Nitreto de Silício
SiC – Carbetto de Silício
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
C – Carbono
K₂O – Óxido de Potássio
P₂O₅ – Óxido Fosfórico
CaO – Óxido de Cálcio
Mg – Magnésio
Fe – Ferro
Na – Sódio
Na₂O – Óxido de Sódio
MgO – Óxido de Magnésio
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
KOH – Hidróxido de Potássio
NaOH – Hidróxido de Sódio
PVC – Policloreto de Vinila
Ca – Cálcio
Ti – Titânio
P – Fósforo
S – Enxofre
Na – Sódio
K – Potássio
Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio
Al₂O₃ – Óxido de Alumínio
Fe₂O₃ – Óxido de Ferro
TiO₂ – Óxido de Titânio
MnO – Óxido de Manganês
SO₃ – Trióxido de Enxofre
Zn – Zinco
CV – Cinza Volante
Ba(OH)₂ – Hidróxido de Bário
H₂O – Água
C₃S – 3CaO.SiO₂
S – SiO₂ - Óxido de Silício
H – H₂O - Água
CSH – 3CaO.SiO₂.3H₂O - Silicato de Cálcio Hidratado
CH – Ca(OH)₂
A – Al₂O₃
C-A-H – xCaO.Al₂O₃.yH₂O
pH – Potencial Hidrogeniônico

PF – Perda ao Fogo
DG – Distribuição Granulométrica
ME – Massa Específica
FRX – Fluorescência de Raios X
AE – Área Superficial Específica
AI – Análise de Imagem
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS – Espectrometria por Dispersão de Energia
DRX – Difração de Raios-X
IAP – Índice de Atividade Pozolânica
AMBEV – Companhia de Bebidas das Américas
BET – Brunauer-Emmett-Teller
RPM – Rotação por minuto
LTM – Laboratório de Tecnologia Mineral
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LAPRON – Laboratório de Processamento Mineral
ABIFA – Associação brasileira de Fundação
ANPEI – Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Inovadoras
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVAS	15
1.2 OBJETIVO GERAL	16
1.2.1 Objetivos específicos	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CASCA DE ARROZ.....	18
2.1.1 Aplicação da Casca de Arroz	19
2.2 CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA)	19
2.2.1 Processo de geração da CCA	20
2.2.2 Características da CCA	22
2.2.3 Influência da moagem na qualidade da CCA	25
2.3 APLICAÇÃO DA CCA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	28
2.3.1 Atividade Pozolânica da CCA	28
2.3.1.1 Reações Pozolânicas	30
2.4 OUTRAS APLICAÇÕES DA CCA	31
2.5 MOAGEM	32
2.5.1 Aditivos auxiliares de Moagem	35
2.5.2 Aplicação de aditivos de moagem	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 ORIGEM DA CCA UTILIZADA	42
3.2 SEGREGAÇÃO POR PENEIRAMENTO DA CCA.....	42
3.3 MOAGEM DA CCA SEM E COM ADITIVOS	43
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA CCA	47
3.4.1 Perda ao Fogo	47
3.4.2 Análise Química	47
3.4.3 Difração de Raios-X	49
3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	50
3.4.5 Massa Específica	50
3.4.6 Área Superficial Específica	50
3.4.7 Distribuição Granulométrica	51
3.4.8 Índice de Atividade Pozolânica	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CCA	55
4.1.1 Segregação da CCA	55
4.1.2 Análise Química e Perda ao Fogo	56
4.1.3 Difração de Raios-X	60
4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	66
4.1.5 Massa Específica	71
4.1.6 Área Superficial Específica	73
4.1.7 Distribuição Granulométrica	73
4.1.8 Índice de Atividade Pozolânica	77
4.1.8.1 Índice de Atividade Pozolânica – método NBR 5752/92	77
4.1.8.2 Índice de Atividade Pozolânica – método de Luxan (1989)	83
5 CONCLUSÃO	87
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A – RESULTADO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA	96

1 INTRODUÇÃO

Estudos voltados para as questões ambientais estão sendo cada vez mais requisitados no sentido de buscar alternativas para minimizar o consumo de matéria-prima, energia e reduzir custos. Muitas pesquisas, tanto de caráter científico como tecnológico, tem sido realizadas para encontrar formas de retornar um resíduo para o ciclo produtivo, e para reduzir o impacto ambiental negativo gerado pelas indústrias com a disposição final destes resíduos em aterros industriais.

A agroindústria está começando a perceber a importância de destinar corretamente seus resíduos. A casca de arroz é o resíduo de maior quantidade e mais volumoso do processo de beneficiamento do arroz.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO, 2010), a produção mundial de arroz na safra 2009/2010 foi de 680 milhões de toneladas. Segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2010), a safra nacional de 2009/2010 de arroz ficou em torno de 12 milhões de toneladas. Já a produção no Rio Grande do Sul foi de aproximadamente 7 milhões de toneladas (IRGA, 2010), significando em torno de 58% da produção nacional, colocando o Estado como o maior produtor.

A casca de arroz possui um alto poder calorífico (em torno de 16.720kJ/kg) e baixo custo (DELLA, 2001). Devido a estes fatores, a casca de arroz vem sendo utilizada como biomassa em caldeira para geração de energia calorífica. Este processo, por exemplo, em relação à safra nacional de 2009/2010, geraria em torno de 500 mil toneladas de cinza de casca de arroz (CCA), se toda a casca fosse utilizada para este fim, representando 20% de cinza gerada em relação à casca e 4% em relação à produção nacional de arroz.

A CCA possui características que a torna passível de ser reciclada como co-produto. Sua composição é basicamente de sílica, apresentando assim potencial para ser utilizada como matéria-prima na elaboração de diversos materiais, em diferentes segmentos industriais, tais como o da construção civil, cerâmica, química, vidros e siderurgia (KIELING, 2009).

1.1 JUSTIFICATIVAS

Muitas empresas beneficiadoras de arroz utilizam a casca como combustível para a secagem, parboilização do cereal e aquecimento dos silos de armazenamento. Essas empresas geralmente são de pequeno porte e não possuem processos para o aproveitamento ou descarte adequado das cinzas oriundas da queima. A cinza de casca de arroz, devido às suas características de baixa densidade e grande volume, necessita de uma grande área de armazenamento para posterior descarte. Devido a este fator, as cinzas muitas vezes são depositadas em terrenos baldios ou lançadas em rios e córregos, provocando a contaminação de solo e água, sem contar o risco à saúde da população, por contaminar o ar e poder causar silicose.

Segundo o IRGA (2010), o Brasil produziu em torno de 12 milhões de toneladas de arroz em 2009/2010. Sabendo que as cascas representam 20% desse valor (FOLETTO *et al.*, 2005), a produção anual desse resíduo tem sido da ordem de aproximadamente 2,4 milhões de toneladas. Quando esta casca é utilizada como combustível, 20% é convertido em cinza (MEHTA E MONTEIRO, 1994), gerando assim 500 mil toneladas de cinzas, considerando que toda a casca gerada seja utilizada para este fim.

Os dados de geração da cinza de casca de arroz são bastante significativos. Desta forma, a reciclagem destas cinzas torna-se uma excelente alternativa para minimizar o impacto ambiental provocado pelo descarte inadequado desse material e reduzir os custos de disposição em aterros industriais.

É um grande desperdício descartar a CCA, pois esta pode vir a ser considerada um co-produto nobre, e ser usada em vários ramos industriais, tais como; eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, obtenção de materiais para células fotovoltaicas, entre outros.

Diversos trabalhos vêm estudando a influência da temperatura de queima e o tempo de moagem nas características químicas e físicas da CCA. No que diz respeito à moagem da cinza residual, pesquisadores como Silveira (1996), Silva (2004), Pouye (2006), Nair, Jagadis e Fraaij (2006), entre outros, atentam para o fato de que o tempo ideal de moagem (que está diretamente ligado à granulometria) da cinza varia de acordo com a aplicação. Esta moagem

geralmente envolve um tempo considerável podendo, em muitos casos, inviabilizar a reciclagem por motivos econômicos.

A moagem é uma das mais importantes operações na indústria mineral, e se caracteriza por alto consumo de energia elétrica. A utilização de aditivos de moagem visa reduzir esse tempo e melhorar a qualidade dos materiais moídos. Com esses aditivos, pode ser também possível reduzir a aglomeração dos materiais dentro do moinho e evitar aderência das partículas finas nos corpos moedores. Esse trabalho busca estudar o desempenho de aditivos que reduzam o período de moagem, tornando a moagem mais homogênea, rápida, econômica e mais sustentável.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é buscar aumentar a eficiência da moagem da cinza da casca de arroz para sua adequação como co-produto.

1.2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Avaliar o desempenho de aditivos de moagem no beneficiamento da CCA.
- Avaliar a Influência do tempo de moagem nas CCA sem e com aditivo de moagem.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório que caracteriza o problema, descreve os objetivos e a justificativa para o mesmo.

O capítulo 2 aborda o referencial bibliográfico básico sobre a casca de arroz (CA) e cinza de casca de arroz (CCA). Em relação à cinza de casca de

arroz, é apresentado o processo responsável por sua geração, suas características, a influência da moagem na sua qualidade e exemplos de aplicações. Sobre os aditivos estão descritos conceitos, características e suas aplicações.

O capítulo 3 contém a descrição dos materiais e a metodologia adotada para esta pesquisa, que se resume em 3 etapas: a segregação, a moagem e a caracterização química e física da CCA sem e com aditivos de moagem.

No capítulo 4 são apresentados os principais resultados obtidos na pesquisa.

O capítulo 5 consiste na conclusão do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A casca de arroz vem sendo amplamente aplicada como combustível para geração de calor. Deste processo se obtém um resíduo, a cinza de casca de arroz. Este resíduo é volumoso e de difícil armazenamento e pode também causar danos à saúde humana. Portanto, este capítulo apresenta uma explanação sobre a aplicação da casca de arroz como biomassa. São apresentadas as características da CCA e a influência da moagem na sua qualidade, e exemplos de aplicações na construção civil e em outros ramos industriais. Em relação aos aditivos de moagem, focou-se nas características e nas aplicações de uma maneira geral.

2.1 CASCA DE ARROZ

A casca de arroz é uma capa lenhosa que envolve o grão, dura e altamente silicosa. Sua composição é basicamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra (TASHIMA, 2006). A composição da casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (FERNANDES, 2006).

Esta casca é uma matéria-prima de baixo custo, normalmente considerada de difícil reaproveitamento devido às características negativas como abrasividade, baixas propriedades nutritivas, resistência à degradação e grande volume ocupado.

A indústria agrícola é responsável pela geração de um grande volume de resíduos. De acordo com Santos (2006), o resíduo agro-industrial que representa um dos maiores volumes de material disposto na natureza no Brasil é a casca de arroz, com 2,4 milhões de toneladas somente na safra de 2009/2010 (IRGA, 2010). Portanto, a possibilidade de utilização desse resíduo abundante para a produção de materiais de interesse tecnológico é considerada promissora, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

2.1.1 Aplicação da Casca de Arroz

Segundo Kieling (2009), as vantagens de se utilizar a casca de arroz faz com que várias indústrias no Rio Grande do Sul estejam operando pequenas centrais termelétricas utilizando a casca como combustível para geração de vapor e energia, pois estas apresentam um bom poder calorífico e possuem um alto conteúdo de materiais voláteis. Além disto, percebe-se que algumas empresas já estão desenvolvendo seus projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) baseados nestes critérios. Essas novas vantagens contribuíram para um grande aumento na geração de cinza de casca de arroz.

A sílica contida na casca de arroz vem sendo muito estudada, de acordo com Huang *et. al.* (2001), no intuito de ser purificada para obter SiO_2 , SiCl_4 , Si_3N_4 e SiC . O objetivo do seu estudo foi verificar a possibilidade de se obter sílica a partir da casca de arroz em leito fluidizado. Nos resultados obtidos, destaca-se que as cinzas na zona densa (o local mais próximo do distribuidor do leito fluidizado) foram facilmente purificadas para a obtenção do pó de SiO_2 .

As empresas de beneficiamento de arroz são as principais consumidoras da casca de arroz como combustível para a secagem e parboilização do cereal. Motivadas pela evolução tecnológica do beneficiamento do arroz, a casca de arroz vem substituindo a lenha empregada na geração de calor nos secadores do grão, pois possui um elevado poder calorífico (aproximadamente 16720 kJ/kg). Ao comparar a casca de arroz com o carvão e o petróleo, que também são combustíveis, a casca corresponde a 50% da capacidade térmica de um carvão betuminoso de boa qualidade e a 33% da capacidade térmica do petróleo (DELLA e HOTZA, 2006).

2.2 CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA)

O processo de queima da casca de arroz, como citado anteriormente, gera uma grande quantidade de resíduo de CCA que é um material leve, volumoso e altamente poroso, possuindo uma massa específica em torno de $1,8\text{g/cm}^3$ (POUEY, 2006).

Descartar esta cinza no meio ambiente é extremamente impactante, pois segundo Foletto *et al.* (2005), a cinza gerada na combustão apresenta uma certa quantidade de carbono residual, que é um grave poluente para o solo, alterando o pH do meio. Como a cinza contém alto teor de sílica, em torno de 92%, isto a torna um resíduo valorizado. Mas para que essa cinza tenha um alto valor agregado deve possuir uma boa qualidade, que é mensurada pela alta superfície específica, tamanho das suas partículas e o grau de amorfismo.

Estas cinzas geralmente apresentam em sua composição: dióxido de silício ou comumente denominada sílica (SiO_2), carbono (C), óxido de potássio (K_2O), óxido fosfórico (P_2O_5), óxido de cálcio (CaO) e em menores quantidades, magnésio (Mg), Ferro (Fe) e Sódio (Na) (ARMESTO *et al.*, 2002).

O desenvolvimento de produtos que utilizam a cinza de casca de arroz (Figura 1), seja como componente principal ou secundário, é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um produto de maior valor agregado, sem que haja a produção de um novo resíduo.

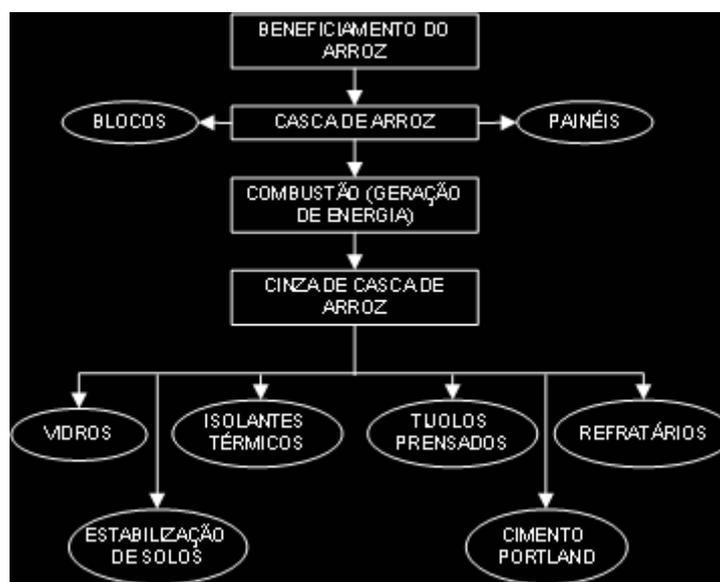


Figura 1 - Aplicação da CCA
Fonte: Adaptado de Della *et al.*, 2006.

2.2.1 Processo de geração da CCA

A combustão da casca de arroz origina cinzas com formas estruturais

variáveis (amorfa e/ou cristalina) que dependem, tanto do tipo de equipamento quanto da queima usada. Este processo pode ser: artesanal a céu aberto, grelhas, processo industrializado por leito fluidizado; com ou sem controle da temperatura. Outros fatores que influenciam na forma estrutural da cinza são o tempo de permanência nos fornos e a temperatura de queima.

O material cristalino possui uma estrutura bem definida, ou seja, os átomos estão situados numa disposição repetitiva ou periódica ao longo de grandes distâncias atômicas. Isto é, sempre que existe uma ordenação de grande alcance na solidificação do material, os átomos se posicionarão entre si num modo tridimensional repetitivo, onde cada átomo está ligado aos seus átomos vizinhos mais próximos (Figura 2). Já os materiais que não se cristalizam, possuem uma estrutura não definida, ou seja, não existe esta ordenação atômica de longo alcance. Esta estrutura desorganizada torna-se mais propícia para reagir com outros elementos atômicos, sendo denominada estrutura amorfa conforme mostrado na figura 3 (CALLISTER, 2007).

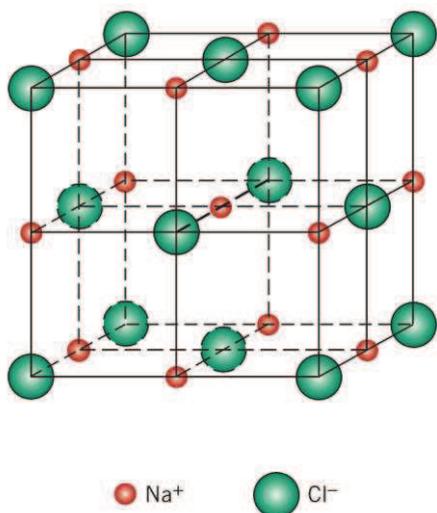


Figura 2 - Estrutura Cristalina
Fonte: Callister, 2007

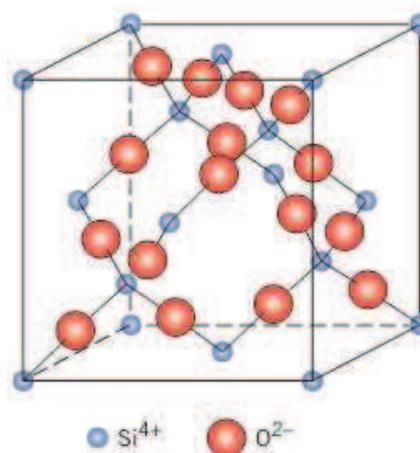


Figura 3 - Estrutura Amorfa
Fonte: Callister, 2007

A casca arroz queimada em condições controladas (temperatura máxima de 1000°C), ao atingir 800°C com um patamar de queima de duas horas, gera cinza constituída de sílica em forma cristalina de quartzo, cristobalita e tridimita. Para temperaturas no intervalo de 450 a 700°C, com patamar de três a quatro horas, obtém-se sílica no estado amorfo (FERRO, SILVA e WIEBECK, 2007).

A sílica amorfa, obtida no processo de queima, quando moída é altamente reagente com hidróxidos alcalinos. Suas propriedades principais são a baixa condutividade térmica e a elevada resistência ao choque térmico. Desta forma é um componente desejável na composição de produtos cerâmicos como refratários e isolantes térmicos, que sofrerão intensa ação do calor e variação brusca de temperatura (MACHADO, *et al.*, 2007).

A cinza de casca de arroz geralmente contém carbono e, por esta razão, tende a apresentar coloração preta. Entretanto, a CCA pode ser também de cor cinza, púrpura ou branca, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. Silveira (1996) relata que os álcalis K_2O e Na_2O são as principais impurezas presentes e os teores de CaO e MgO não ultrapassam 1%. Quando a casca é queimada por completo, esta resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura. A cor branca é a indicação da completa oxidação do carbono da cinza, pelas altas temperaturas ou longos períodos de retenção, com a formação de sílica cristalina (REGO, 2001).

Há estudos que buscam um processo químico para obtenção de CCA, pois a cinza de casca de arroz amorfa, obtida a partir da queima direta da casca de arroz, comumente apresentará uma coloração mais escura devido à presença de carbono. Esta coloração é um dos fatores que limita o uso da cinza em produtos de cimento e, principalmente, o seu uso em escala industrial. Alguns dos pesquisadores que estudaram este fator foram Salas, *et al.* (2009), compararam dois métodos de produzir CCA: um tipo convencional, obtido por um tratamento térmico da casca de arroz e outro baseado em um ataque químico-térmico da casca de arroz. No segundo caso, foi utilizado o tratamento químico (ácido) com o intuito de diminuir o grau de cristalização da sílica e de carbono em cascas de arroz. Os resultados apontaram que a CCA que passou pelo processo químico, obteve melhor desempenho quando adicionada ao concreto.

2.2.2 Características da CCA

A cinza de casca de arroz é classificada como Classe IIA – Não Inerte, conforme consta na norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004). Distingue-se por

possuir um alto teor de sílica (por volta de 92%) e apresentar partículas muito finas e alongadas (figura 4). Dependendo do grau de moagem, pode apresentar alta superfície específica. De acordo com as características morfológicas dos grãos, essa cinza possui elevada reatividade, apresentando vantagens técnicas quando incorporada ao concreto, por exemplo.



Figura 4 - Cinza de Casca de Arroz
Fonte: Elaborada pela autora

Silveira (1996) e Pouey (2006) analisaram a composição química da cinza de casca de arroz, utilizada por diferentes autores e produzidas sob diferentes condições de queima (tempo de permanência, temperatura e processo), em diversas regiões do mundo. Concluíram que os resultados são bastante semelhantes, havendo uma variação no teor de sílica entre 70 e 95%. A tabela 1 apresenta uma compilação das diferentes composições químicas, publicadas na literatura feita por Pouey (2006) e atualizadas com alguns artigos mais recentes.

Tabela 1 - Composição química da CCA.

Composição Química (% em peso)														
Autor	Temperatura de queima (°C)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	
COOK (1976)	450	93,1	0,41	0,2	0,41	NA	0,45	NA	0,08	2,31	NA	NA	2,77	
SALAS (1986)	1000	91,3	0,94	0,37	2,15	NA	0,88	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
CINCOTTO (1988)	500 - 600	94,7	0,09	1,46	0,99	NA	0,95	0,21	0,04	1,75	NA	NA	7,29	
GUEDERT (1989)	SC	93,1	0,92	0,4	0,52	NA	0,85	NA	0,12	1,12	NA	NA	NA	
FARIAS (1990)	NE	91,8	0,6	0,34	0,5	NA	0,52	0,02	0,11	1,3	NA	NA	NA	
SUGITA <i>et al.</i> (1992)	600	90	0,1	0,4	0,4	NA	0,3	NA	0,06	2,41	NA	NA	4,2	
ISAIA (1995)	*	78,6	2,3	2,3	1	NA	0,8	0,04	0,01	0,56	NA	NA	11,8	
FONSECA (1999)	NE	83,6	0,17	0,17	1,03	0,66	NA	NA	NA	3,65	NA	1,34	8,54	
DELLA (2001)	NE	72,1	0,3	0,15	0,43	0,15	0,7	NA	0,5	0,72	0,05	0,6	24,3	
QUINGGE (2005)	NE	92,4	0,3	0,4	0,7	0,11	0,3	NA	0,07	2,54	NA	0,11	2,31	
UMAMAHESWARAN E BATRA (2007)	NE	93,52	0,01	0,51	0,68	NA	0,47	NA	0,4	2,4	0,04	1,06	0,8	
PEDROSO (2008)	NE	95,04	0	0,44	1,25	NA	0,45	0,01	0,09	1,4	NA	NA	0,51	
CHAVES <i>et al.</i> (2009)	NE	88,13	0,27	0,33	2,83	0,53	NA	0,17	NA	6,543	NA	1,21	NA	
		Sílica	Al	Fe	Ca	Mn	Mg	S	Cloreto	K	Ti	P	Zn	PF
KIELING (2009)	900	90,72	0,03	0,11	0,25	0,04	0,23	0,03	0,02	0,92	ND	0,23	0,004	7,7

PF = Perda ao Fogo; NA = não analisado; NE = não especificado; * 50% sem controle + 50% a 650°C; SC = Sem controle; ND = Não detectado

Fonte: adaptado de Pouey (2006)

Analisando a tabela 1, pode-se deduzir que, conforme aumenta o teor de sílica de uma determinada CCA tende a ser menor sua perda ao fogo. Isto pode indicar que, quanto maior o teor de sílica há menos impurezas como casca não queimada, e há menor quantidade de carbono residual. Em relação aos demais compostos químicos, as concentrações podem variar de acordo com o tipo de solo, região e a espécie de arroz cultivado.

A grande maioria dos trabalhos produzidos no Brasil, sobre o uso de CCA como material pozolânico, foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em beneficiadoras do cereal. Em alguns casos, quando as beneficiadoras possuíam queimadores de leito fluidizado, a temperatura de queima era controlada, evitando a formação de sílica cristalina. Outros estudos foram realizados com cinzas obtidas de queimas sem um controle efetivo do tempo e da temperatura de queima. De um modo geral, os resultados obtidos nas pesquisas brasileiras concluíram que a CCA possui boa atividade pozolânica, com desempenho comparável ao da sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-silício e/ou do silício metálico) (KIELING, 2009).

2.2.3 Influência da moagem na qualidade da CCA

O grau de moagem é um fator importante, pois modifica propriedades físicas da cinza da casca de arroz, como a superfície específica e finura. A moagem tem o objetivo de reduzir o tamanho das partículas das cinzas, pois a granulometria influencia na reatividade da pozolana e também no efeito fíler, ou seja, ocupando os espaços vazios, quando adicionadas aos cimentos, argamassas e concretos. A área superficial é outra característica fundamental na reatividade da CCA, e que também pode ser otimizada com o processo de moagem adequado (POUEY, 2006). A CCA quando moída passa de partículas aciculares para um formato mais esférico (Figuras 5 e 6).

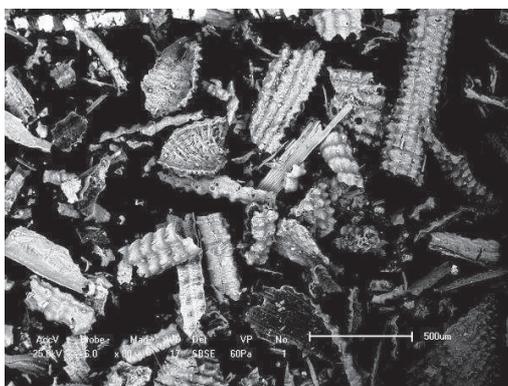


Figura 5 - Micrografia CCA (aumento 80x)
Fonte: Kieling (2009)

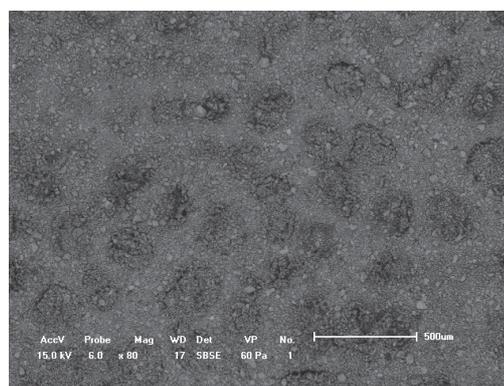


Figura 6 - Micrografia da CCA moída (aumento 80X)
Fonte: Elaborada pela autora

Nair, Jagadis e Fraaij (2006) concluíram que uma vez que as cinzas de casca de arroz são submetidas à moagem com as mesmas condições, a maior área superficial da CCA pode ser atribuída à queima controlada. A área superficial específica da cinza da casca de arroz é controlada principalmente pelo volume de poros. Também relatam que quanto maior for a superfície da CCA, maior será a sua atividade pozolânica.

Quando a cinza é queimada em altas temperaturas, acima de 800°C, ela possui uma área superficial menor. Este decréscimo ocorre com o aumento da temperatura, e está relacionado com o fato das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas as outras. Portanto, para se obter um melhor índice de pozolanicidade da CCA, oriunda de um processo sem controle de temperatura, é necessário que esta passe por uma etapa de moagem para reduzi-la a um

material mais fino (SILVA, 2004).

Santos (1997), utilizando diferentes CCAs, verificou que diferentes tempos de moagem levaram a diferentes áreas superficiais do material, concluindo que cada CCA gerada por um determinado processo de queima, possui seu tempo de moagem ótimo para atingir maior pozolanicidade. Os resultados encontrados (tabela 2) demonstraram um aumento da superfície específica com o aumento do tempo de moagem. Também demonstraram que o aumento da atividade pozolânica ocorreu com a adição de CCA moída até um tempo de 4 horas. Posteriormente a este tempo de moagem, a atividade pozolânica apresentou decréscimo. Isto ocorre, provavelmente, em consequência da dificuldade de se dispersar partículas muito finas na argamassa.

Tabela 2 - Comparação da Superfície específica e atividade pozolânica com o tempo de moagem

Tempo de Moagem	Superfície específica - Blaine (m²/kg)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
15min	827	62
30min	1087	83
1h	1376	106
2h	1604	113
4h	1614	126
6h	1772	123
8h	2275	119
10h	2589	118
20h	2899	115

Fonte: Santos (1997)

Para que a CCA atinja seu ponto ótimo de moagem é importante conhecê-la bem, através de uma boa caracterização. Kieling (2009), com uma caracterização físico-química (Perda ao Fogo, Distribuição Granulométrica, Massa Específica, Finura, Área Específica, Microscopia Eletrônica de Varredura, Análise de Imagem, Análise Química e Difração de Raios-X), conseguiu identificar as diferenças entre os dois tipos de cinzas utilizadas no estudo, constatando que houve influência do tipo de processo de queima. A autora identificou também, que para um melhor aproveitamento da CCA é necessária uma segregação granulométrica para a remoção de impurezas, em especial, a casca de arroz não queimada ou queimada de forma incompleta e CCA com estrutura cristalina (em função de pré-fusão de uma pequena quantidade de casca).

A tabela 3 apresenta alguns estudos que relacionam o tempo de moagem com o diâmetro médio de partículas de CCA para diferentes aplicações.

Tabela 3 - Comparação entre o diâmetro médio das partículas e o tempo de moagem.

Autores	Aplicação	Tipo de moinho	Tempo de Moagem	Diametro médio (μ)	Resultados
Possan; Venquiaruto e Dal Molin (2007)	Uso da CCA no concreto	Moinho de Bolas	1h	11,25	Com vistas à durabilidade, a CCA moída por 1h pode ser utilizada em ambiente urbano e quando moída a 4h pode ser utilizada em meios mais agressivos.
			4h	9,45	
Tashima; Silva; Akasaki e Barbosa (2005)	Uso da CCA no concreto	Moinho de Bolas	30min	12	Ganho de resistência à compressão em todas as porcentagens estudadas.
Kieling; Moraes e Brehm (2009)	Uso da CCA para a remoção de cromo hexavalente	Moinho excêntrico modelo CB2-T (Piriquito)	2h	5,83	As amostras moídas apresentaram maior eficiência de adsorção do cromo hexavalente.
Pouey (2006)	Emprego de CCA na confecção de cimentos Portland composto e/ou pozolânico	Moinho de bolas	1h	14,09	CCA tem potencial para serem empregadas na produção de cimentos, tanto aquelas menos cristalinas, quanto as mais cristalinas.
			2h	9,82	
			3h	16,53	
Ferro, Silva e Wiebeck (2007)	CCA como carga em poliamida 6 e 6.6	-	-	4	A CCA é uma alternativa viável para a substituição do talco como carga.

Observa-se na tabela 3, que o tempo de moagem e o diâmetro médio das partículas tendem a variar, apesar de ser utilizado o mesmo tipo de moinho. Este fato pode estar relacionado à composição da CCA, a quantidade de agente moedor (bolas), material a ser moído, entre outros fatores. Quando se compara os diâmetros médios obtidos pelo moinho de bolas, com os do moinho periquito nota-se que o periquito tende a obter diâmetros menores. Pouey (2006) utilizou vários

tipos de moinho para moagem da CCA e também obteve melhores resultados neste modelo.

2.3 APLICAÇÃO DA CCA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Vários pesquisadores vêm estudando a aplicação da CCA na construção civil. Barbosa (2006) utilizou a cinza em concretos de alto desempenho, já Pouey (2006) verificou a viabilidade técnica do emprego de cinzas de casca de arroz na confecção de cimentos Portland composto, e ou pozolânico. Souza (2008) estudou a durabilidade de argamassas convencionais com cinza de casca de arroz e a própria casca, substituindo parte do aglomerante, e substituindo o agregado miúdo, respectivamente.

Como mencionado em vários trabalhos, o uso da cinza de casca de arroz é viável na construção civil, sendo muito ressaltado o tempo de moagem que esta precisa para poder ser utilizada, ou seja, o tempo necessário para que a CCA atinja a finura adequada para seu uso. Neste sentido, estudar alternativas para reduzir este tempo de moagem e, conseqüentemente, o custo envolvido é fundamental. Portanto, usar aditivos para aumentar a eficiência da moagem pode ser uma boa solução no sentido de aliar a viabilidade técnica com a viabilidade econômica do seu beneficiamento como co-produto para a construção civil.

2.3.1 Atividade Pozolânica da CCA

A NBR 12653:1992 (ABNT, 1992) define pozolana como um material que possui pouca atividade aglomerante, porém, quando finamente moído e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. No que se refere à sua origem, os materiais que apresentam esta característica são classificados como naturais e artificiais. As pozolanas naturais, por serem, muitas vezes, de origem vulcânica, acabam causando impacto ambiental negativo devido à sua crescente exploração. A fim de reduzir estes impactos, estudos estão sendo desenvolvidos

para possibilitar a substituição desta matéria prima natural por pozolanas artificiais, que são consideradas como resíduos ou subprodutos agroindustriais provenientes de distintos processos (KIELING, 2009).

O uso de pozolanas pode ser vantajoso por vários motivos, dentre eles o aumento da resistência e da durabilidade, que é um dos aspectos mais relevantes do concreto (SILVA, 2007). Considerando as questões econômicas, estes materiais possuem um custo e preço menores quando comparados ao cimento Portland. E, em relação ao meio ambiente, reduzem a extração de recursos naturais não renováveis, o consumo de energia e a emissão de CO₂ na produção do cimento, contribuindo assim com a redução dos impactos negativos do setor da construção civil.

Mehta e Monteiro (1994) classificaram a sílica ativa e a cinza de casca de arroz como pozolanas altamente reativas, e a cinza volante como uma pozolana comum.

Estudo realizado por Rukzon, Chindaprasirt e Mahachai (2009) concluiu que, a cinza de casca de arroz tem um alto potencial para tornar-se um bom material pozolânico se tiver um elevado módulo de finura.

De acordo com Santos (1997), um dos principais fatores limitantes para a utilização da CCA é o controle da temperatura de queima da casca de arroz. A temperatura de queima da casca irá determinar o teor de sílica amorfa que influencia diretamente na atividade pozolânica. A mesma autora salienta que o grau de moagem ideal sofre influência significativa da temperatura de queima. Kieling *et. al.* (2010) também reforçam esta questão, colocando que o tipo de processo de combustão interfere nas características química, física e microestruturais das cinzas originadas quando comparados os sistemas de leito fluidizado e grelha móvel (processo que tem a maior aplicação no RS). Os autores concluem também que:

“[...] A presença de materiais contaminantes e cascas incombustas indicam que os processos de queima devem ser melhor controlados, tanto para aumentar a eficiência energética do processo de queima quanto a qualidade da cinza gerada, visto que estas impurezas poderão comprometer a utilização do co-produto em aplicações específicas se o mesmo não for segregado de forma adequada.”

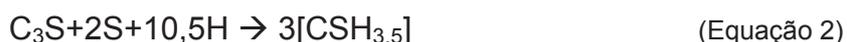
2.3.1.1 Reações Pozolânicas

As pozolanas, isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. Porém, há algumas pozolanas que possuem mais de 25% de cálcio em sua composição química. (SILVA, 2007).

As reações pozolânicas acontecem da seguinte forma: as pozolanas se solubilizam em meio alcalino e reagem com os íons Ca^{2+} , precipitando silicato de cálcio hidratado que é o principal produto dessas reações (equação 1) (SILVA, 2007).



A sílica amorfa, que é o principal constituinte das pozolanas, reage principalmente com o hidróxido de cálcio formado na hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer ou do cimento Portland. Quando utilizadas pozolanas muito reativas ou com um alto teor de sílica amorfa, a relação CaO/SiO_2 do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$ é próxima de 1 e a reação $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ é ligeiramente menor, indicando a ocorrência de uma reação secundária com o $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$, conforme a equação 2 (SILVA, 2007).



Onde:

C_3S : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$

S: SiO_2

H: H_2O

CSH: $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$

Pequenas quantidades de alumina reativa na composição química de uma pozolana geralmente substituem parte da sílica do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$. Porém, quando uma pozolana possui grande quantidade de alumina reativa (como as pozolanas naturais e as argilas calcinadas), algumas reações secundárias podem ocorrer, resultando na formação de $x\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.y\text{H}_2\text{O}$ (aluminato de cálcio hidratado), conforme equação 3. (SILVA, 2007).



Onde:

CH: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

A: Al_2O_3

H: H_2O

C-A-H: $x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

Existem métodos de ensaio para analisar a atividade pozolânica de uma substância. Entre eles, existem os ensaios que estão sendo estudados neste trabalho como: Difração de Raios-X que indica a estrutura, cristalina ou amorfa, do material; NBR 5752 - Determinação da atividade pozolânica com o cimento (ABNT, 1992) que consiste em determinar o Índice de Atividade Pozolânica; e o Método de Luxan (1989) que é uma análise rápida para a avaliação da atividade pozolânica de produtos naturais através da medição da condutividade elétrica.

2.4 OUTRAS APLICAÇÕES DA CCA

Além de ser uma boa alternativa como material pozolânico para a construção civil, a CCA também pode ser utilizada em outros segmentos industriais.

Bhattacharya *et al.* (2006), por exemplo, utilizaram cinza de casca de arroz após moagem, como material adsorvente para a remoção de Zinco (II). Nesse estudo, os autores verificaram que para um pH igual a 5, na temperatura de 30°C, com uma concentração inicial de Zn (II) de 225ppm, e para uma dosagem de 10g/L de cinza de casca de arroz, a remoção do metal foi de 95% em 2 horas de tempo de contato.

Mahvi, Alavi e Maleki (2005) pesquisaram a adsorção de íons cádmio em solução aquosa utilizando casca de arroz e sua cinza. A adsorção máxima foi de cerca de 97,2 e 99,2% para casca de arroz e cinzas de casca de arroz, respectivamente. Os estudos mostraram que a cinza da casca de arroz foi mais favorável do que a casca de arroz na remoção de cádmio e, portanto, foi um

adsorvente melhor.

Outra aplicação é a utilização da CCA moída como carga estrutural em poliamida 6 e poliamida 6.6 (FERRO, SILVA e WIEBECK, 2007). Foi realizada uma comparação das propriedades mecânicas e a propriedade térmica de fio incandescente entre compostos de poliamida 6 e poliamida 6.6, com 30% de CCA, e compostos de poliamidas com 30% de talco. Os resultados das propriedades mecânicas e térmica mostraram um comportamento semelhante entre as poliamidas com CCA e as poliamidas com talco. Os autores concluíram que o uso da cinza da casca de arroz é uma alternativa viável para a substituição do talco como carga.

Cinza de casca de arroz foi incorporada em borracha natural utilizando-se um misturador de cilindros em sistema de vulcanização convencional (COSTA, *et. al*, 2003). Para esse trabalho a CCA foi moída por 5 horas e peneirada em 325 mesh (0,044mm). Foi observado que a adição da cinza de casca de arroz às composições de borracha natural, em comparação às outras cargas utilizadas, aumentou a velocidade de reticulação¹ e diminuiu a energia de ativação² aparente de modo mais marcante.

O diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da Pirelli Pneus, Roberto Falkenstein, apresentou o projeto de produção de pneu de forma sustentável na sessão destinada aos cases de sucesso do IX Conferência Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Inovadoras (ANPEI) de 2009 (FALKENSTEIN, 2009). De acordo com diretor da Pirelli, no segundo semestre de 2009, foram apresentados os primeiros pneus com sílica produzida a partir das cinzas da casca de arroz.

2.5 MOAGEM

A moagem é a operação de fragmentação fina obtendo-se nela um produto adequado para ser utilizado (LUZ, SAMPAIO E ALMEIDA, 2004). É neste estágio que é feita a redução das partículas através do impacto, compressão, abrasão e

¹ Tempo de vulcanização da borracha. A vulcanização converte um emaranhamento viscoso de moléculas de cadeias longas numa rede elástica tridimensional, unindo quimicamente (reticulação) estas moléculas em vários pontos ao longo da cadeia (CALLISTER, 2007).

² Energia necessária para iniciar uma reação química entre as partículas (CALLISTER, 2007).

atrito do produto com o meio moedor.

A moagem é o último processo de fragmentação de minérios, mas das pozolanas é o único estágio de fragmentação e nesta etapa deve se ter atenção aos dimensionamentos, bem como na escolha certa do equipamento moedor mais adequado para operação desejada (LUZ, SAMPAIO E ALMEIDA, 2004).

A obtenção destes fragmentos pode ser através da colisão dos corpos em diversos meios de moagem, como, por exemplo, os tradicionais moinhos cilíndricos, moinhos de martelo, moinho periquito, moinho agitador, moinho de bolas, entre outros.

No desenvolvimento prático deste trabalho foi utilizado o moinho de bolas (Figura 7) que é o mais utilizados na moagem de CCA. O processo denominado moinho de bolas é parte do grupo de equipamento de moagem cilíndrico. Esta classe de equipamentos é muito utilizada para a redução de partículas de um material. Obtém-se a moagem através do atrito entre as bolas e o material a ser fragmentado, a agitação se dá pelo rolamento do moinho em torno do seu eixo longitudinal e o meio moedor é posicionado horizontalmente. Este tipo de moinho ainda pode ser empregado com outras finalidades, tais como dispersar aglomerantes e agregados e modificar o formato das partículas. O processo de moagem pode ser realizado de duas maneiras: a seco ou a úmido (LUZ, SAMPAIO E ALMEIDA, 2004).

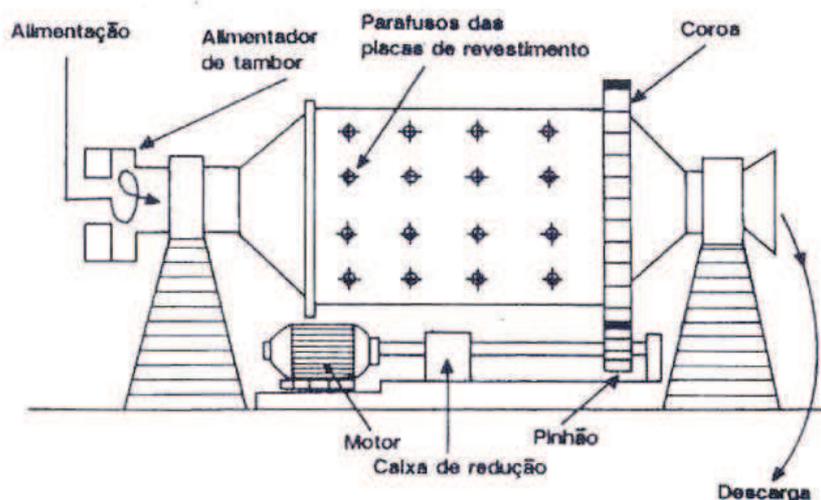


Figura 7 - Estrutura completa de um moinho de bolas.
Fonte: Luz, Sampaio e Almeida, 2004.

De acordo com Luz, Sampaio e Almeida (2004), os moinhos de bola têm

basicamente dois regimes de operação: catarata e cascata. A determinação desta forma de trabalho se obtém basicamente através de duas variáveis: velocidade e volume de carregamento.

Na moagem catarata os agentes moedores realizam uma trajetória parabólica (Figura 8). Esse regime aumenta consideravelmente o impacto e é mais indicado para a fragmentação de produtos mais grossos evitando também o surgimento dos finos. Nesta situação a velocidade do moinho é alta (a cima da velocidade nominal) e desloca os corpos moedores a uma posição elevada dentro do jarro. Estes caem provocando grande impacto no material a ser moído. Em relação ao fator de enchimento, este deve ser baixo.

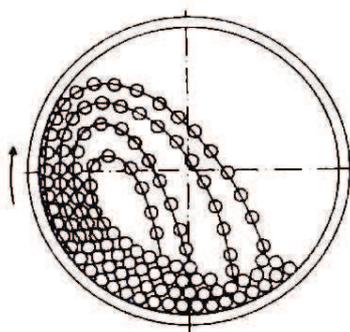


Figura 8 - Moagem regime catarata.
Fonte: Luz, Sampaio e Almeida, 2004.

No regime de cascata a moagem por abrasão e atrito são os elementos fragmentadores mais importantes, apesar de haver também a ocorrência de impacto (Figura 9). Esse regime é usualmente utilizado quando se deseja uma moagem mais fina. Neste regime a velocidade do moinho é baixa e o fator de enchimento é alto.

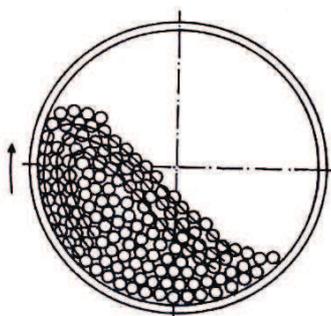


Figura 9 - Moagem regime cascata.
Fonte: Luz, Sampaio e Almeida, 2004.

Neste trabalho, devido às características exigidas para tornar a CCA um co-produto com granulometria adequada foi utilizada a moagem de regime cascata.

2.5.1 Aditivos auxiliares de Moagem

A moagem é uma das mais importantes operações na indústria mineral, e se caracteriza por alto consumo de energia elétrica. Por esta razão estão surgindo pesquisas voltadas para aumentar a eficiência da moagem, reduzindo o consumo de energia, assim como o tempo de moagem.

Os aditivos e o meio de moagem (seco ou úmido) favorecem a moagem através da redução das forças de adesão entre as partículas, por evitarem a formação de agregações e aderências do material ao meio moedor (WELLENKAMP, 1999).

A eficiência da maioria das unidades de moagem é muito baixa. De acordo com Katsioti *et al.* (2009), as partículas de cimento, por exemplo, podem envolver o meio de moagem, aglomerando-se e reduzindo as forças de atração.

Choi, Lee e Kim (2009) estudaram os efeitos dos aditivos de moagem em relação ao consumo de energia cinética para moer pós calcínicos, e concluíram que quando os aditivos foram usados, o diâmetro médio das partículas diminuiu demandando menos tempo e, portanto, consumindo menos energia.

Os aditivos de moagem já possuem ampla utilização na área de mineração, por exemplo. Na Tabela 4, são apresentados os ganhos de rendimento obtidos com alguns tipos de aditivos adicionados na moagem de minérios e materiais.

Tabela 4 - Ganhos de rendimento no processo de moagem com adição de aditivos

ADITIVO	MINÉRIO/MATERIAL	FATOR TAXA DE MOAGEM*
água	mármore	1,60
água	clínquer	1,30
isopentanol	quartzito	1,29
acetona	clínquer	1,37
amina (Flotigan)	quartzito	2,20
amina (Flotigan)	calcário	1,70
ácido oleico	calcário	1,10
oleato de sódio	quartzito	2,00
oleato de sódio	calcário	2,00
estearato de sódio	clínquer	1,20
ácido naftênico	clínquer	1,33
naftenato de sódio	quartzito	1,40
sulfonaftenato de sódio	quartzito	1,80
acetato de anila	quartzito	1,23
carbonato de sódio	calcário	2,00
dióxido de carbono	quartzito	1,55
polimetafosfato de sódio (Calgon)	chumbo e zinco	1,65

* Relação entre novas superfícies produzidas com aditivo/ novas superfícies produzidas sem aditivo.

Fonte: (POSSA, 2002)

Estes ganhos foram expressos pelo fator de taxa de moagem, que é a relação entre as novas superfícies produzidas com a adição de reagente por novas superfícies produzidas sem a adição de reagente, conforme a equação 4 (POSSA, 2002).

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{i1} / d_i}{\sum_{i=1}^n M_{i2} / d_i} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

S1 e S2 = superfície total de duas distribuições de tamanhos;

Mi1 e Mi2 = massa retida em um intervalo de tamanhos de duas distribuições; e

di = tamanho médio de um intervalo de tamanhos.

O aditivo pode ser orgânico ou inorgânico, e estar no estado gasoso, líquido ou sólido. Possa (2002) e Inoue *et al.* (2005) citaram e estudaram aditivos inorgânicos como: Carbonato de cálcio (sólido), dióxido de carbono (gás) e polimetafosfato de sódio (sólido). Katsioti *et al.* (2009) em seu estudo trabalhou

com aditivos orgânicos (líquidos) para moagem de cimento, como:

- aminas alifáticas: trietilenotetramina e tetraetilenopentamina;
- aminoálcoois: Dietanolamina, Trietanolamina e Triisopropanolamina;
- compostos glicóis (etilenoglicol, dietilenoglicol);
- compostos mais complexos: aminoetiletanolamina e dietilenotriamina;
- fenóis e derivados.

Para apresentarem resultados efetivos, é necessário que estes aditivos tenham capacidade de evitar aglomeração das partículas e a adesão nos meios moedores e nas paredes do moinho.

2.5.2 Aplicação de aditivos de moagem

De acordo com a BYK - Additives e Instruments (2009), para que aditivos como dispersantes de alto peso molecular, utilizados em tintas a base solvente, sejam eficientes, devem ser incorporados na base de moagem das tintas. A resina e os solventes devem ser pré misturados, aí então o aditivo deve ser gotejado sob agitação. A introdução dos aditivos em sistemas de baixa polaridade pode gerar um aumento da viscosidade logo após o uso dos aditivos. Esta é uma característica destes produtos e não influi negativamente na dispersão final dos pigmentos. Este aumento inicial da viscosidade pode ser evitado com a adição de uma pequena quantidade de solventes polares (álcool ou glicol), no aditivo ou diretamente na base de moagem. Os pigmentos devem ser pré-dispersos, após a completa homogeneização do aditivo.

Oliveira e Labrincha (2002) avaliaram a moagem de vidrados, e observaram que este processo é bastante crítico porque é necessário evitar contaminações e ter uma granulometria melhor controlada. É preciso evitar também a decomposição dos aditivos de moagem orgânicos, pois pode favorecer a lixiviação de alguns compostos e acarretar desgaste excessivo, ou mesmo estilhaçamentos das bolas e do revestimento interno, contaminando o vidro. Uma carga mal dimensionada, uma velocidade de rotação mal escolhida ou ainda o uso de bolas de tamanho inconveniente, podem não só originar uma moagem ineficiente, como também aquecer demasiadamente o moinho. A má

administração da moagem pode acarretar em perda de coesão interna do vidro devido à degradação do aditivo de moagem, originando má formação do vidro.

Katsioti *et al.* (2009) analisaram seis aditivos de moagem comerciais, utilizados para a produção de cimento Portland, e compararam com cimento produzido sem aditivo. Todas as misturas de cimento foram testadas e ajustadas para que ficassem com a mesma consistência da pasta referência. Em todos os casos, o aditivo de moagem melhorou a superfície específica e a moabilidade. Esse fato foi atribuído à capacidade do aditivo de não só reduzir a resistência a moagem do material, mas também por evitar aglomeração do pó e da aderência do material nas bolas e nas paredes do moinho.

Outro estudo voltado para a questão do uso de aditivos para facilitar a moagem foi desenvolvido por Inoue *et al.* (2005), que utilizaram hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH) como aditivo no processo de redução de compostos orgânicos clorados do policloreto de vinila (PVC). Em ambos os casos, as reações de desclorificação aumentaram o rendimento com o tempo de moagem e a quantidade de aditivo. O KOH foi mais efetivo na velocidade de reação de desclorificação na fase inicial, mas isto foi revertido conforme avançava a moagem. Com o uso do aditivo pode-se ter uma moagem e uma reação de desclorificação mais eficientes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa experimental foi definida uma metodologia com o intuito de avaliar se a proposta desenvolvida e os objetivos apresentados para moagem com o uso de aditivos obteriam uma CCA moída mais homogênea, de melhor qualidade e em menor tempo.

A pesquisa foi dividida em três etapas:

- Etapa 1: Caracterização físico-química da CCA bruta.
- Etapa 2: Segregação da CCA e caracterização físico-química da CCA Segregada.
- Etapa 3: Moagem sem e com aditivos da CCA, e caracterização físico-química das CCAs moídas e dos aditivos utilizados.

A Figura 10 ilustra as etapas empregadas na metodologia desenvolvida neste trabalho. Na tabela 5 são apresentados os ensaios para a caracterização e as siglas utilizadas para identificação dessas análises, que aparecem na figura 10 e tabela 6, inclusive. Já a tabela 6 indica o número de ensaios e quantidade de amostras utilizadas no programa experimental.

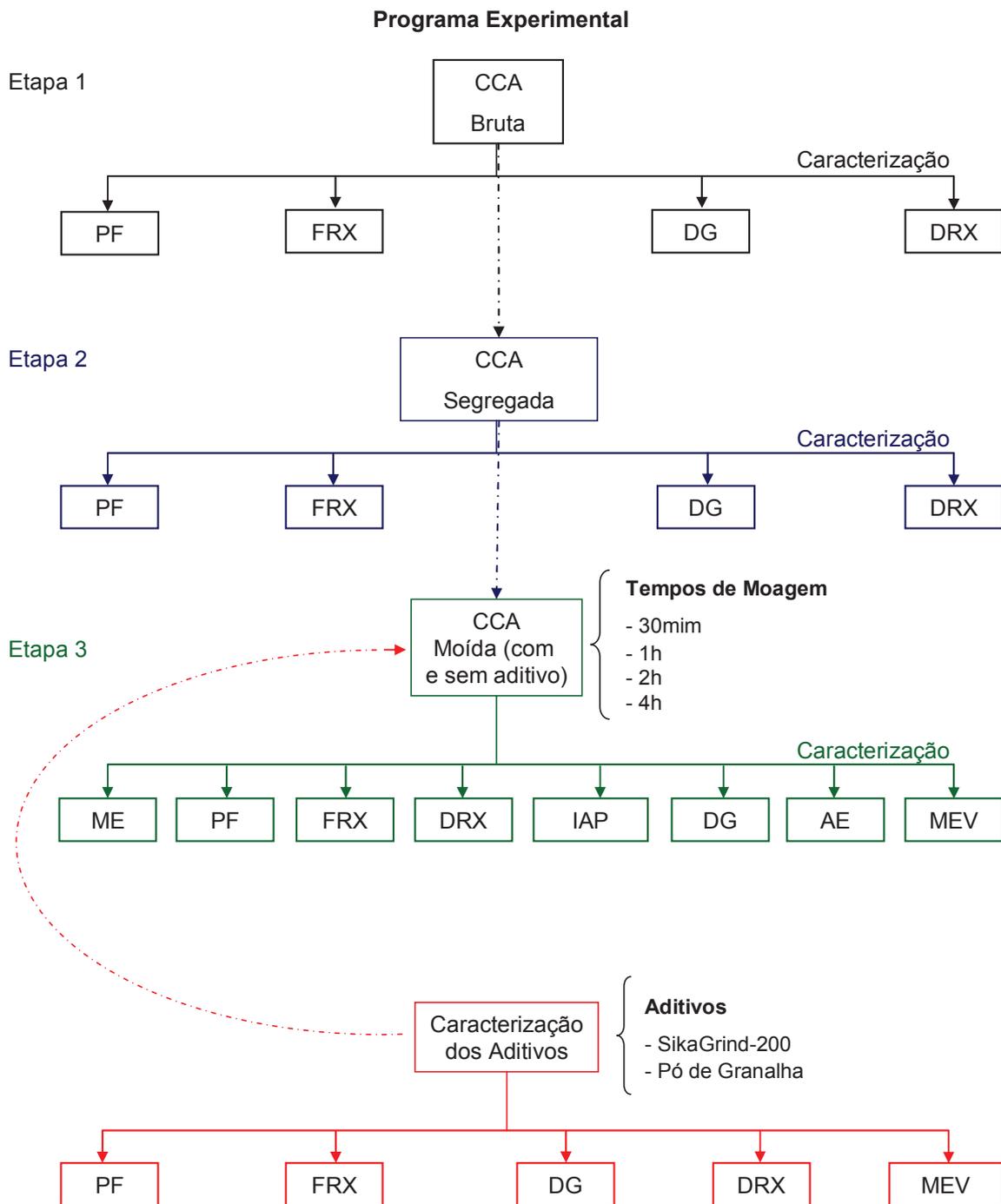


Figura 10 - Programa Experimental
Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 5 - Identificação das Análises de Caracterização

Símbolos	Ensaio
PF	Perda ao Fogo
DG	Distribuição Granulométrica
ME	Massa Específica
FRX	Fluorescência de Raios-X
AE	Área Superficial Específica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difração de Raios-X
IAP	Índice de Atividade Pozolânica

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 6 - Número de ensaios realizados no programa experimental

Amostra	ME	PF	FRX	IAP	IAP	DRX	AE	DG	MEV	Quant. Amostra (g)
Normas	NBR NM 23/2001	CEMP 120/2003		5752/1992	Luxan et. al. (1989)		BET	CEMP 081/2003**		
CCA Bruta	0	2	1	0	0	1	0	2	0	163
CCA Segregada	0	2	1	0	0	1	0	2	0	163
CCA moída – 30min.	2	2	1	3	2	1	1	1	0	603
CCA moída – 1h.	2	0	0	3	2	0	1	1	0	580
CCA moída – 2h.	2	0	0	3	2	0	1	1	0	580
CCA moída – 4h.	2	0	0	3	2	0	1	1	1	590
CCA moída – 30min. (com aditivo)*	12	18	9	18	12	6	6	6	0	3657
CCA moída – 1h. (com aditivo)*	12	0	0	18	12	0	6	6	0	3480
CCA moída – 2h. (com aditivo)*	12	0	0	18	12	0	6	6	0	3480
CCA moída – 4h. (com aditivo)*	12	0	0	18	12	0	6	6	3	3510
Aditivo – Pó de Granalha	2	2	1	0	2	1	1	1	1	313
Total de Amostras										17119
Total de Ensaio	58	26	13	84	58	10	29	33	5	316

* 2 aditivos e 3 concentrações de aditivo; ** CCA moída: Granulometria Laser

Fonte: Elaborada pela autora

Considerando que 8% da CCA fica retida na etapa de segregação, mais as perdas de material durante os ensaios, a quantidade de cinza de casca de arroz necessária, como amostra para o programa experimental, foi de aproximadamente 20 kg.

3.1 ORIGEM DA CCA UTILIZADA

A cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho é oriunda do processo de combustão em caldeira da empresa AMBEV, localizada em Viamão no Estado do RS, que utiliza casca de arroz como combustível. Neste sistema contínuo, a casca de arroz é alimentada automaticamente, modulada de acordo com a pressão de vapor da caldeira. O material atravessa a fornalha, com temperatura que varia entre 600°C e 700°C, por meio de uma grelha deslizante, durante 9 minutos. A velocidade da grelha altera conforme a quantidade de casca que está sendo alimentada, bem como a vazão de ar que entra no sistema.

3.2 SEGREGAÇÃO POR PENEIRAMENTO DA CCA

Para a segregação foi utilizada a metodologia desenvolvida por Kieling (2009). Salienta-se ainda, que a escolha por este tipo de segregação ocorreu devido a este sistema ser facilmente instalado nas centrais geradoras antes da CCA ser recolhida nos silos de armazenamento.

A segregação granulométrica, indicada por Kieling (2009), foi realizada por agitador de peneiras - máquina vibratória e tamises (peneiras) quadradas para análises granulométricas, da marca Telastem Peneiras para Análises Ltda. O tempo de agitação foi de 5 minutos, utilizando duas malhas de peneira (1,2 mm e 0,6 mm). A escolha pela peneira 1,2 mm baseou-se na análise visual das frações resultantes da distribuição granulométrica que poderiam se acumular nesta peneira, servindo para retirar materiais mais grosseiros. Quanto à utilização da peneira 0,6 mm, considerou-se a quantidade relevante retida nesta peneira na distribuição granulométrica da CCA, observada em estudo anterior (KIELING, 2009).

Porém, para este trabalho optou-se por utilizar somente uma peneira, a de 1,2 mm, para a segregação, pois KIELING (2009) já havia concluído em trabalho anterior que essa fração possui a atividade pozolânica satisfatória e se constitui

de um material isento de contaminação, de cascas não queimadas ou queima incompleta e cinza com estrutura cristalina.

O processo de segregação é relevante dentro da metodologia proposta para viabilizar a reciclagem de cinza de casca de arroz, pois a fração não passante na peneira 1,2 mm apresenta, além de outras contaminações, casca não queimada que reduz a eficiência da moagem.

3.3 MOAGEM DA CCA SEM E COM ADITIVOS

Para que a cinza possua propriedades pozolânicas satisfatórias para ser empregada como adição mineral em cimentos, concretos e argamassas, esta deve ser finamente moída. No trabalho de Santos (1997) e Kieling (2009), ambas as autoras observaram que com moagem de 2 horas, as cinzas já apresentavam desempenho satisfatório, utilizando moinho de bolas e excêntrico modelo CB2-T, respectivamente. Porém, Prudêncio JR., Santos e Dafico (2003) analisaram e obtiveram o melhor desempenho da moagem em 4 horas, utilizando também moinho de bolas.

Como o objetivo do trabalho é avaliar uma metodologia para melhorar a eficiência da moagem da cinza da casca de arroz, foram moídas amostras de cinzas com e sem aditivos nos tempos de moagem de 30 minutos, 1, 2 e 4 horas em moinho de bolas de porcelana, com capacidade de 7,5L acionado por gira moinho horizontal de dois andares, modelo CT – 240; marca Servitech, do Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS. O regime cascata é o utilizado devido o equipamento disponível no laboratório operar desta forma. Os maiores tempos (2h e 4h) foram determinados em função da literatura e pré-testes realizados. Em função dos aditivos terem como objetivo reduzir o tempo de moagem optou-se por menores tempos (30min. e 1h), para avaliar esta possibilidade.

A CCA foi seca em estufa a 105 °C para remoção da umidade e moída a seco. O moinho foi carregado com 5 kg de esferas de alumina de diferentes diâmetros e 1 kg de cinza a uma velocidade de 54 rpm (Figura 11). A quantidade

de esferas e cinza foi determinada segundo Silveira (1996) e Pouey (2006), que utilizaram um equipamento semelhante ao usado neste trabalho.



Figura 11 - Moinho de Bolas
Fonte: Elaborada pela autora

Os aditivos para auxiliar a moagem já são altamente utilizados pelas indústrias de mineração. Na moagem do clínquer de cimento, por exemplo, sabe-se que os aditivos melhoram a eficiência e reduzem o custo do processo de moagem (MICCO *et al.*, 2000).

Para este trabalho foram utilizados 2 aditivos, um destes já vem sendo aplicado no processo de moagem do cimento comercialmente, e como segundo aditivo foi testado um resíduo sólido industrial com características semelhantes às da CCA para avaliar seu desempenho na função de auxiliar de moagem.

O aditivo comercial utilizado foi o ajudante de moagem SikaGrind-200, utilizado para a produção de cimento. Sua composição química é um derivado de amina e livre de cloretos. Em relação à dosagem, o fabricante recomenda para a produção de cimento uma quantidade de 0,3 - 0,6 kg por tonelada de cimento, ou seja 0,03% - 0,06% da massa total do clínquer de cimento mais adições (SIKA, 2005). Para a moagem da CCA utilizou-se a quantidade entre a mínima e a máxima recomendada pelo fabricante, sendo moída com adição de 0,03%, 0,045% e 0,06% em relação à massa de CCA. Já o resíduo foi adicionado em uma proporção baixa em relação à amostra, definido a partir da determinação de sua composição química, para que sua constituição não viesse a afetar quimicamente o co-produto obtido. Foi adicionada uma proporção de 2%, 6% e 10% de resíduo sobre a massa de amostras, no caso 1kg.

Os aditivos comerciais normalmente possuem um alto custo e são, muitas vezes, compostos de substâncias orgânicas e voláteis que podem acarretar risco à saúde humana e contaminação do ar. Estes fatores foram os principais motivos para avaliar a utilização de resíduos industriais como aditivos para a moagem, pois além de aproveitar um material que será descartado em aterro industrial, tomou-se o cuidado de optar por resíduos que são considerados classe IIA – Não inerte, portanto, não trazendo risco potencial para o meio ambiente e as pessoas.

Dentre vários resíduos industriais avaliados, o escolhido é de origem metalúrgica, do setor de fundição. O Pó de granalha é um resíduo oriundo do processo de acabamento por jato de granalha de peças de ferro fundido. Sua composição contém sílica, e foi fornecido pela Metalúrgica Lorscheitter, localizada em São Sebastião do Caí, RS. Essa empresa atualmente desenvolve projeto de pesquisa e desenvolvimento em parceria com o Núcleo de Caracterização de Materiais – NucMat – da UNISINOS, parceira em Projeto de Pesquisa RHAЕ/CNPq – Pesquisador na Empresa.

O processo de acabamento por jato de granalha tem o objetivo de limpar a peça de ferro fundido, removendo a areia do molde aderida na mesma. Este processo é bastante controlado, pois pode danificar a peça, trazendo problemas dimensionais e até mesmo condenando a peça.

A Figura 12 apresenta um fluxograma do processo de fundição, para uma melhor compreensão da origem do resíduo e a Figura 13 apresenta o equipamento de jato de granalha.

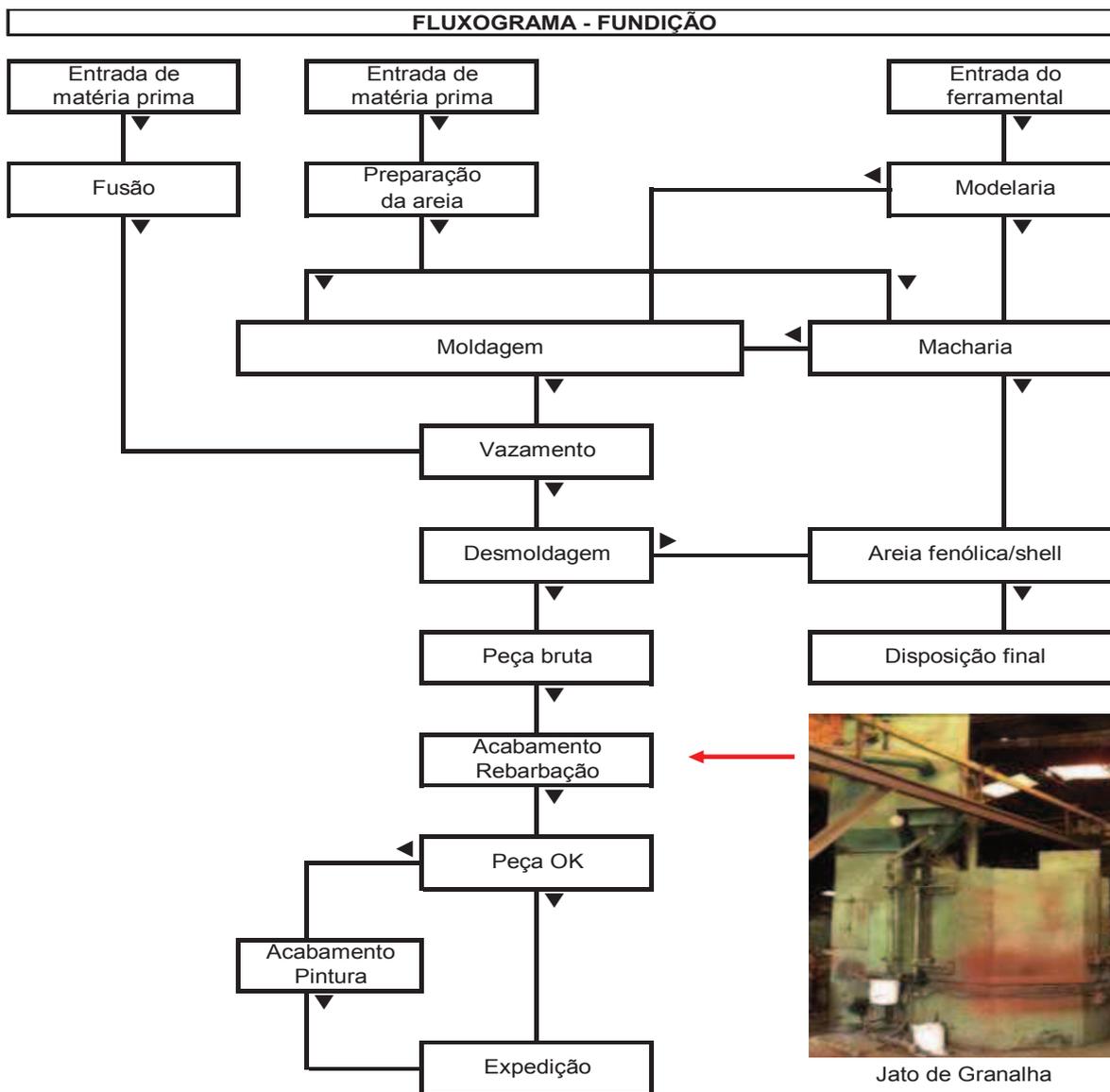


Figura 12 - Fluxograma do Processo de Fundição
 Fonte: Elaborada pela autora



Figura 13 - Equipamento de Jato de Granalha
 Fonte: Elaborada pela autora

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA CCA

Para reciclar um resíduo, e conseguir transformá-lo em co-produto é fundamental um estudo de caracterização físico-química do material através de ensaios e métodos apropriados, para que com isto se possa conhecer sua composição química, e suas propriedades físicas (BREHM, 2004 e KIELING, 2009).

As amostras de CCA foram submetidas às análises de caracterização físico-química em todas as etapas, conforme fluxograma apresentado na Figura 7.

3.4.1 Perda ao Fogo

A Perda ao Fogo quantifica o material orgânico existente na amostra, como por exemplo: carbono livre e dióxido de carbono proveniente dos hidratos e dos carbonatos, bem como água combinada.

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma CEMP nº 120 (ABIFA, 2003). A perda ao fogo consiste em colocar 1 g de amostra, previamente seca em estufa, a 105 °C, em forno mufla a 950°C, durante 3 horas. Após, o material é pesado até atingir massa constante. A diferença da massa inicial e final é o resultado da análise. Os ensaios de PF foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física, na UNISINOS. Cabe ressaltar que a NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992) fixa as condições exigíveis para estes materiais serem utilizados como adição, onde uma das análises exigidas é a perda ao fogo.

Realizou-se a PF nos resíduos utilizados como aditivos, nas amostras de CCA Bruta, segregada e moída. Em relação à CCA moída, o ensaio foi aplicado no tempo de moagem de 30 min, com e sem aditivos.

3.4.2 Análise Química

Para análise química das amostras foram utilizadas três técnicas,

Fluorescência de Raios-X (FRX), Espectrometria de Absorção Atômica e Gravimetria.

O ensaio de FRX determina qualitativa e quantitativamente os elementos presentes em uma amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. Esta técnica é não-destrutiva para todos os tipos de amostras (SALVADOR, 2007). O equipamento utilizado é um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu do Brasil Comércio Ltda. O ensaio foi realizado no Laboratório de Metalurgia física da UNISINOS.

A Espectrometria de Absorção Atômica está baseada no princípio de que átomos livres (no estado gasoso), gerados em um atomizador, são capazes de absorver radiação de frequência específica que é emitida por uma fonte espectral. Cada espécie atômica possui um espectro de absorção formado por uma série de estreitas raias, características devido a transições eletrônicas envolvendo os elétrons externos (KRUG, *et. al.*, 2004). O espectrofotômetro utilizado é da marca Varian, modelo AA240FS.

A Gravimetria é um método analítico quantitativo, cujo processo envolve a separação e pesagem de um elemento ou um composto do elemento na forma mais pura possível. O elemento ou composto deve ser determinado num composto puro, estável e de estequiometria definida. O resultado é calculado a partir da fórmula química do composto e das massas atômicas dos elementos que constituem o composto pesado (SKOOG, *et. al.*, 2006).

A análise química quantitativa das amostras de CCA bruta, segregada e moída, foi através do FRX, pois havia padrão para a quantificação. Em relação à CCA moída, o ensaio foi aplicado no tempo de moagem de 30 min com e sem aditivos. Como não há padrões de FRX para o resíduo pó de granalha, a análise foi qualitativa.

No resíduo sólido (pó de granalha), a análise química quantitativa foi feita a partir do resultado do FRX e as técnicas utilizadas foram absorção atômica e gravimetria, dependendo do elemento (tabela 7). Estas quantificações foram realizadas pela empresa Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental.

Tabela 7 - Análise química do resíduo sólido (pó de granalha)

Parâmetros	Metodologia
Ferro	Espectrometria de Absorção Atômica
Manganês	Espectrometria de Absorção Atômica
Cromo	Espectrometria de Absorção Atômica
Zinco	Espectrometria de Absorção Atômica
Cobre	Espectrometria de Absorção Atômica
Potássio	Espectrometria de Absorção Atômica
Silício	Espectrometria de Absorção Atômica
Titânio	Espectrometria de Absorção Atômica
Enxofre	Gravimetria
Zircônio	Espectrometria de Absorção Atômica

Fonte: Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental, 2010

3.4.3 Difração de Raios-X

A Difração de Raios-X identifica a composição mineralógica do material. Esta análise instrumental determina qualitativamente a presença ou não de fases cristalinas de uma substância, ou seja, materiais cristalinos ou com algum caráter cristalino são identificados pela presença de picos no difratograma. O desvio da linha base entre 15 e 30 graus é indicativo da amorficidade do material (TASHIMA, 2006).

Para realização da análise de DRX se faz necessário que as amostras possuam uma granulometria inferior a 0,075mm. Portanto os resíduos e as amostras CCA bruta e a segregada foram moídas em gral de Ágata até os grãos atingirem um tamanho uniforme e passante na peneira 200 da ABNT (0,075mm). Os ensaios de DRX foram realizados no Laboratório de Física da UFRGS, no difratômetro Siemens D5000. A identificação dos picos obtidos no difratograma foi realizada com o Software Philips Analytical e sua respectiva base de dados.

Em relação às amostras moídas, foram analisadas aquelas com tempo de moagem de 30 min, com e sem aditivo.

3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é fundamentada na emissão de feixe de elétrons, o qual incide sobre uma amostra provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação entre o feixe de elétrons e amostra (SILVA, 2004). A utilização de equipamentos associados ao MEV, como Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS), permite análise qualitativa e semiquantitativa da composição dos elementos de áreas superficiais. Foram realizadas as análises por MEV nas amostras com aditivos para verificar a evolução da moagem dos grãos, presença de contaminantes, e o comportamento dos aditivos moídos com a CCA.

As imagens foram obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura, marca Shimadzu SSX-550, instalado no Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão (SENAI-CETEMP), em São Leopoldo-RS.

3.4.5 Massa Específica

Massa específica de uma substância é a razão entre determinada massa desta substância e o volume correspondente, desconsiderando os vazios existentes.

A massa específica das amostras foi determinada conforme NBR NM 23 - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica (ABNT, 2001) no Laboratório de Materiais de Construção Civil, na UNISINOS. O método de determinação da massa específica utilizada nesta norma é por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier.

3.4.6 Área Superficial Específica

A metodologia utilizada foi a da adsorção de nitrogênio (BET – Brunauer-Emmett-Teller), que conduz a valores substancialmente superiores aos obtidos

pelo método Blaine - NBR NM 76:1998 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (ABNT, 1998), pois utiliza a medição da adsorção de nitrogênio por toda a superfície do material, incluindo os poros abertos (KIELING, 2009). Os ensaios de BET foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), na UFRGS. Esses ensaios foram aplicados somente na CCA moída.

3.4.7 Distribuição Granulométrica

Através da distribuição granulométrica é possível identificar os tamanhos médios das partículas de uma determinada substância.

A distribuição granulométrica das partículas foi determinada pelo método de granulometria por difração a laser, empregando-se o analisador de distribuição de tamanho de partículas CILAS 1064 *Liquid*. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS e aplicados para as amostras moídas.

Para as amostras bruta e segregada foi realizado a granulometria de acordo com a Norma CEMP 081 - Determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura (ABIFA, 2003), que consiste em utilizar um conjunto de peneiras padronizadas pela ABNT e calcular a massa do material retido em todas as peneiras. O resultado é expresso em porcentagem em relação à massa total de amostra. Optou-se por utilizar esta norma porque é mais restritiva, possuindo um maior número de peneiras com abertura de malha menor que a NM 248 – Agregado – Determinação da Composição granulométrica, utilizada pela engenharia civil (ABNT, 2003).

3.4.8 Índice de Atividade Pozolânica

Para a análise de Índice de Atividade Pozolânica foram utilizados dois métodos, o da NBR 5752 - Determinação da atividade pozolânica com o cimento

(ABNT, 1992) e o de Luxan *et al.* (1989) que foi reproduzido por Kieling (2009) e é uma análise rápida para a avaliação da atividade pozolânica de produtos naturais através da medição da condutividade elétrica.

A NBR 5752 (ABNT,1992) foi utilizada para avaliar como se comporta o resíduo (auxiliar de moagem) e a CCA quando colocados em contato com materiais cimentícios. Esse método consiste em preparar uma argamassa tradicional com cimento Portland (referência) e, uma argamassa que deve ter parte do cimento substituído em 35% de seu volume por material pozolânico. Para a realização deste ensaio foi utilizado o cimento tipo CII F-32. A norma de atividade pozolânica exige cimento em acordo com a NBR 5732 – Cimento Portland Comum (ABNT, 1991). Contudo, este material não se encontra disponível no mercado. O CP-II-F-32 é composto com fíler calcário, que é inerte, e possui tempo de pega e hidratação compatível com o CP-I-S, ao contrario do cimento CP-V-ARI, que seria o cimento com menor teor de material carbonático.

A norma recomenda a produção de três corpos de prova para cada tempo de moagem. Para a moldagem dos corpos de provas, a norma reporta para a NBR 7215 (ABNT, 1996). Após a produção das argamassas, os corpos de provas ainda nos moldes foram colocados em câmara úmida durante 24 horas. Após esse período, realizou-se a desmoldagem e as argamassas foram colocadas em recipientes hermeticamente fechados e estanques em temperatura de $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 27 dias. Para determinação da carga de ruptura à compressão, os corpos de prova de argamassa foram capeados e submetidos à compressão axial de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). O resultado, expresso em porcentagem, é a razão entre resistência média aos 28 dias dos corpos de prova com material pozolânico e da argamassa de referência.

Foram produzidas argamassas com todos os tempos de moagem escolhidos para esse trabalho, ou seja, 30 min, 1, 2, e 4 horas.

Luxan *et al.* (1989) propuseram que a atividade pozolânica pode ser medida pela condutividade elétrica. Neste método, é definido um índice de atividade pozolânica baseado na variação da condutividade elétrica de 200 mL de solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 40°C e sob agitação constante devido à adição de 5,0 g de pozolana. Após a adição, a condutividade elétrica decresce, pois existe uma menor quantidade de íons cálcio (Ca^{+2}) e hidroxilas ($(\text{OH})^{-}$) na solução, sendo o índice de atividade pozolânica definido

como a relação entre a condutividade elétrica antes da adição de CCA, e aquela após decorridos 120 s da adição.

Aplicando este método, os materiais podem se classificados em três grupos de acordo com o índice de atividade pozolânica determinado (LUXAN et al., 1989):

- materiais sem atividade pozolânica: $\text{mS/cm} < 0,4$;
- materiais de atividade pozolânica moderada: $0,4 < \text{mS/cm} < 1,2$;
- materiais com alta atividade pozolânica: $\text{mS/cm} > 1,2$.

Os ensaios de condutividade elétrica foram realizados no Laboratório de Química da UNISINOS. Para tanto, utilizou-se um condutivímetro Digimed, modelo DM 31. Foram empregadas as mesmas amostras utilizadas no ensaio de pozolanicidade com o cimento, sendo os ensaios realizados em duplicata para cada amostra.

Para facilitar a identificação das amostras, a Tabela 8 apresenta a nomenclatura das amostras utilizada neste trabalho.

Tabela 8 - Identificação das Amostras

Amostra	Identificação
CCA Bruta	Cinza de Casca de Arroz sem nenhum tipo de tratamento.
CCA Segregada	Cinza de Casca de Arroz passante na peneira 1,2mm
CCA Moída	Cinza de Casca de Arroz moída sem aditivo
CCA Ad. Com. 0,03%	Cinza de Casca de Arroz moída com 0,03% de aditivo comercial.
CCA Ad. Com. 0,045%	Cinza de Casca de Arroz moída com 0,045% de aditivo comercial.
CCA Ad. Com. 0,06%	Cinza de Casca de Arroz moída com 0,06% de aditivo comercial.
CCA Ad. PG 2%	Cinza de Casca de Arroz moída com 2% do resíduo pó de granalha.
CCA Ad. PG 6%	Cinza de Casca de Arroz moída com 6% do resíduo pó de granalha.
CCA Ad. PG 10%	Cinza de Casca de Arroz moída com 10% do resíduo pó de granalha.
Resíduo PG	Resíduo de fundição – pó de granalha.

Fonte: Elaborada pela autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões referentes aos ensaios executados no programa experimental.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CCA

Para caracterização da CCA, como já descrito na metodologia, foram realizados ensaios físicos e químicos, e as amostras foram identificadas conforme a tabela 8.

4.1.1 Segregação da CCA

Na segregação granulométrica observou-se, através de análise visual (Figuras 14 e 15), que o material retido na peneira 1,2 mm é constituído de CCA na fase cristalina (cor branca), casca não queimada e outras impurezas oriundas do processo de queima. Já o material passante apresentou-se como uma amostra mais homogênea. O material não passante na peneira 1,2 mm ficou em torno de 8% em massa.



Figura 14 - CCA retida na peneira 1,2mm
Fonte: Elaborada pela autora



Figura 15 - CCA passante na peneira 1,2mm
Fonte: Elaborada pela autora

Outra constatação é que quando se aplicou a segregação granulométrica à CCA, esta apresentou uma distribuição granulométrica mais regular, conforme

representado na Figura 16. Com isto corrobora-se a importância desta etapa, conforme sugerido por Kieling (2009).

Ao se comparar os valores de CCA retidos na peneira 1,2 mm do trabalho de Kieling (2009) que foi em torno de 10% (amostragem feita em 2008), com os valores do presente trabalho que foi de 8% (amostragem feita em 2010), pode-se inferir que o processo de queima da casca de arroz está mais eficiente, havendo assim uma redução de 2% em casca não queimada ou com queima incompleta e CCA cristalina (material normalmente retido na peneira acima de 1,2 mm). Além disso, observando visualmente os dois lotes percebe-se a redução, em especial, de casca não queimada ou com queima incompleta, os quais são mais críticos para a qualidade da cinza enquanto co-produto para construção civil, pois comprometem seu grau de pozolanicidade. Considerando que a empresa gera entorno de 600t/mês de cinza, 2% de eficiência significa 12t/mês a mais de cinza com potencial de uso, além dos ganhos energéticos obtidos no processo de queima.

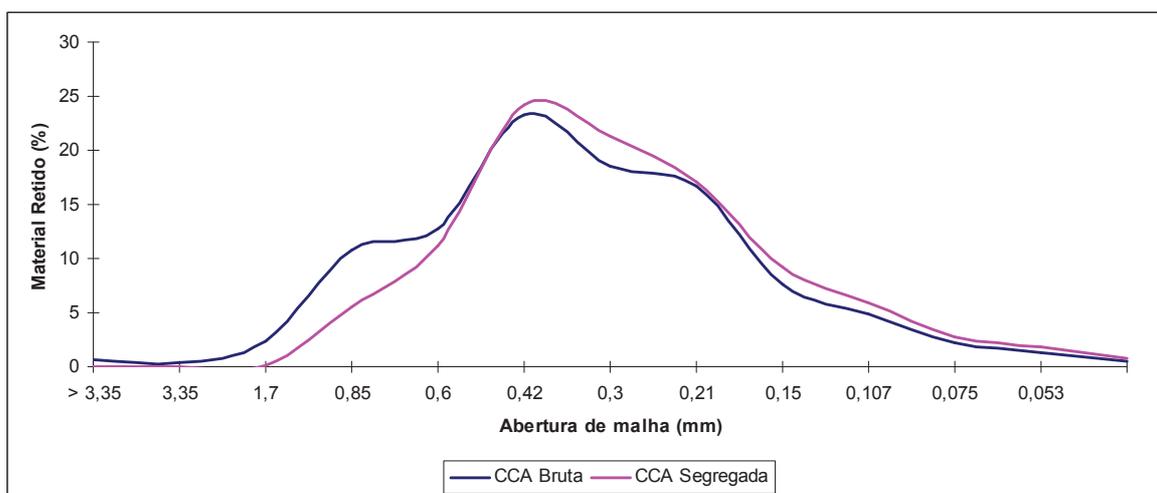


Figura 16 - Distribuição Granulométrica da CCA Bruta e Segregada
Fonte: Elaborada pela autora

4.1.2 Análise Química e Perda ao Fogo

Os resultados da caracterização química e de perda ao fogo da CCA sem e com aditivos estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Composição química das CCA

	Composição Química (% em peso)										
	Si	Zn	Fe	Mn	Ti	Ca	K	S	P	Al	PF
CCA Bruta	76,395	ND	ND	0,039	ND	0,046	0,602	0,001	0,115	ND	7,938
CCA Segregada	72,565	ND	ND	0,039	ND	0,051	0,593	0,046	0,124	ND	7,177
CCA Moída	80,361	0,001	0,001	0,037	ND	0,088	0,652	0,049	0,111	ND	6,660
CCA Ad. Com. 0,03%	83,515	0,001	ND	0,036	ND	0,083	0,668	0,030	0,101	ND	6,360
CCA Ad. Com. 0,045%	82,354	0,001	ND	0,036	ND	0,086	0,660	0,047	0,102	ND	6,330
CCA Ad. Com. 0,06%	82,671	0,001	ND	0,037	ND	0,074	0,658	0,038	0,111	ND	6,760
CCA Ad. PG 2%	83,488	0,001	0,284	0,035	ND	0,083	0,658	0,043	0,113	ND	6,200
CCA Ad. PG 6%	80,426	0,001	0,893	0,030	ND	0,084	0,636	0,049	0,104	ND	6,330
CCA Ad. PG 10%	78,581	0,002	1,307	0,030	0,001	0,070	0,604	0,046	0,118	ND	5,440

PF = Perda ao Fogo; ND = Não Detectado; Obs.: Cl, Na e Mg não foram detectados em nenhuma amostra

Fonte: Elaborada pela autora

Comparando os resultados da tabela 9, nota-se que a adição dos aditivos na CCA não alterou significativamente sua composição. Porém, as amostras CCA Ad. PG apresentaram o elemento ferro na sua composição química, o que era esperado devido à composição química do resíduo PG (tabela 11) conter este elemento.

Com relação à presença de ferro na composição química de CCA, Thashima (2006) estudou uma cinza com um teor de 0,86% de Fe. O autor produziu uma CCA e avaliou seu comportamento em matrizes de cimento Portland com o intuito de avaliar a atividade pozolânica da cinza. Os resultados mostraram que a CCA apresentou características adequadas para a utilização como material pozolânico em matrizes de cimento Portland, e a princípio o autor não verificou nenhuma possível influência negativa da presença de ferro neste produto, pois não há nenhum comentário neste sentido.

A escória de aciaria possui ferro em sua composição e vem sendo estudada como substituição em parte do cimento. Geyer (2001) teve como objetivo principal em seu estudo o de apontar potencialidades do uso da escória de aciaria elétrica, proveniente do forno panela, que tinha em torno de 11% de Fe em sua composição, na indústria da construção civil. A autora constatou que a adição de até 10% de escória moída ao cimento Portland comum é perfeitamente viável para uso em concretos. Inclusive, independente do tempo de estocagem da escória, ela constatou melhorias no concreto produzido.

Masuero (2001) desenvolveu um trabalho com o objetivo de propor um método para a estabilização quanto à expansibilidade das escórias de aciaria elétrica, e estudar o desempenho mecânico e de durabilidade desta escória tratada em argamassas. Mesmo após as escórias passarem pelo tratamento, o teor de ferro ficou na faixa de 0,57% a 1,23%. Os resultados obtidos em relação à resistência à compressão mostraram desempenho similar pelas argamassas com adição destas escórias, e aquelas sem escória, independente do teor utilizado. Quanto aos aspectos de durabilidade, absorção de água, resistência ao ataque de íons cloretos, carbonatação e resistência ao ataque por sulfato, com exceção da carbonatação, a incorporação da escória tratada apresentou desempenho igual ou superior quando comparada a argamassas sem escória.

Outro fator que pode confirmar que o ferro, nas concentrações que se encontra na CCA, não traz influência no seu uso, é que nos difratogramas da CCA com a adição do resíduo PG não foi detectada a presença deste elemento ou seus compostos como será visto no item 4.1.3. a seguir.

Analisando o teor de sílica das CCA com a PF, percebe-se que quanto maior o teor de sílica menor é a perda ao fogo. Este resultado está de acordo com outros autores como Pouey (2006) e Kieling (2009), que constataram que o aumento do teor de sílica está relacionado com o valor de Perda ao Fogo que é menor em amostras com percentuais elevados de sílica.

A norma NBR 12653 – Material Pozolânicos (ABNT, 1992) estabelece algumas exigências químicas para o uso de pozolanas como adição mineral, conforme tabela 10.

Tabela 10 - Exigências químicas NBR 12653

Propriedades	Material pozolânico - Classe E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	50
SO ₃ , % máx.	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0
Perda ao Fogo, % máx.	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 1992).

Analisando a CCA de acordo com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 1992), o único parâmetro que não se enquadrou foi a perda ao fogo, ficando acima de 6%. Porém, Kieling (2009) estudou uma CCA com PF em torno de 8% e obteve bom resultado em relação à pozolanicidade. Portanto, pode-se inferir, que só a perda ao fogo não pode ser utilizada como parâmetro que limite a sua utilização como pozolana. Em função disto, a norma NBR 12653 deveria ser questionada em termos desta diferença entre os valores de perda ao fogo para pozolanas naturais (máx. 10%) contra máximo 6% da pozolanas artificiais.

A análise química do resíduo Pó de gralha está apresentada na tabela 11. Além desta análise, foi realizado ensaio de perda ao fogo, mas devido à ocorrência de aumento da massa da amostra durante o ensaio, que pode ter ocorrido devido à oxidação de fase metálica presente, e ou pela mudança de estado de oxidação do óxido de ferro, não foi possível avaliar a presença de material orgânico e ou volátil.

Tabela 11 - Composição química do Resíduo PG

	Composição Química (% em peso)										
	Si	Cr	Fe	Mn	K	Ti	Zn	S	Cu	Zr	PF
Resíduo PG	86,000	0,018	12,231	0,236	0,001	ND	0,014	0,08	0,010	0,002	ND

PF = Perda ao Fogo; ND = Não Detectado;

Fonte: Elaborada pela autora

Quando comparadas as composições químicas do resíduo PG com a CCA, utilizada neste trabalho, verificou-se que o resíduo é semelhante à cinza com exceção de alguns elementos que estão presentes em baixa concentração (Cr e Cu).

Analisando o teor de ferro (Fe) do resíduo PG com os teores deste mesmo elemento nas CCA com Ad. PG percebe-se que os valores são proporcionais, ou seja, conforme aumenta a concentração do resíduo aumenta o teor de ferro em 2,32%, 7,30% e 10,64%, respectivamente quando comparado aos 12% de ferro encontrado no resíduo PG. Com isto, pode-se dizer que as análises realizadas tem credibilidade, pois mesmo utilizando técnicas diferentes e realizadas em lugares distintos, apresentaram valores coerentes. Este fato reforça a importância de se realizar uma boa caracterização com equipamentos precisos e calibrados.

4.1.3 Difração de Raios-X

As composições mineralógicas das amostras de CCA com e sem aditivos foram determinadas por difração de raios X. Os difratogramas da CCA bruta e da CCA segregada são apresentados nas figuras 17 e 18, respectivamente.

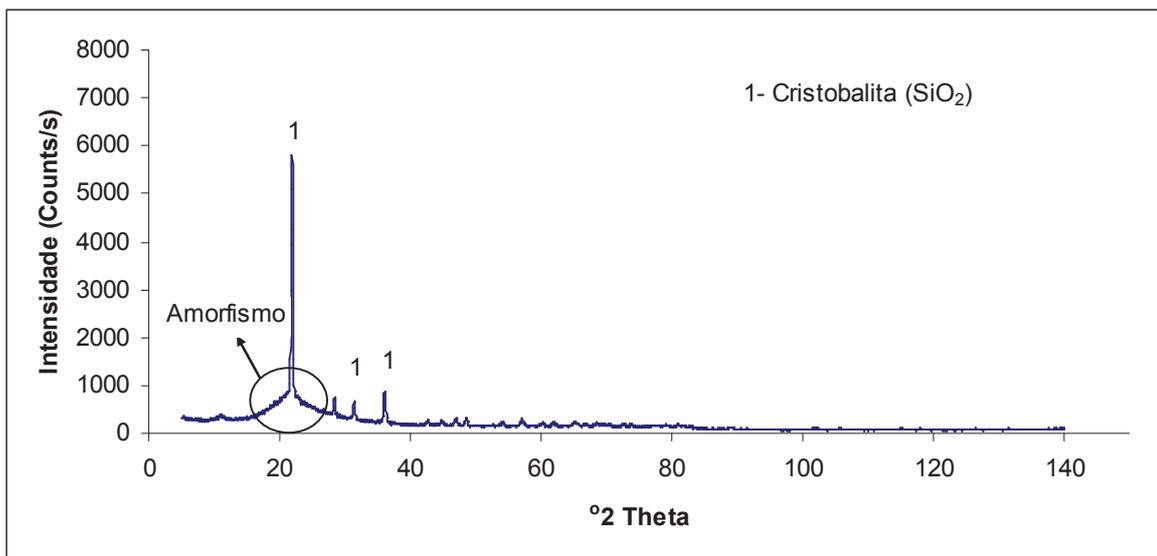


Figura 17 - Difratograma da CCA Bruta
Fonte: Elaborada pela autora

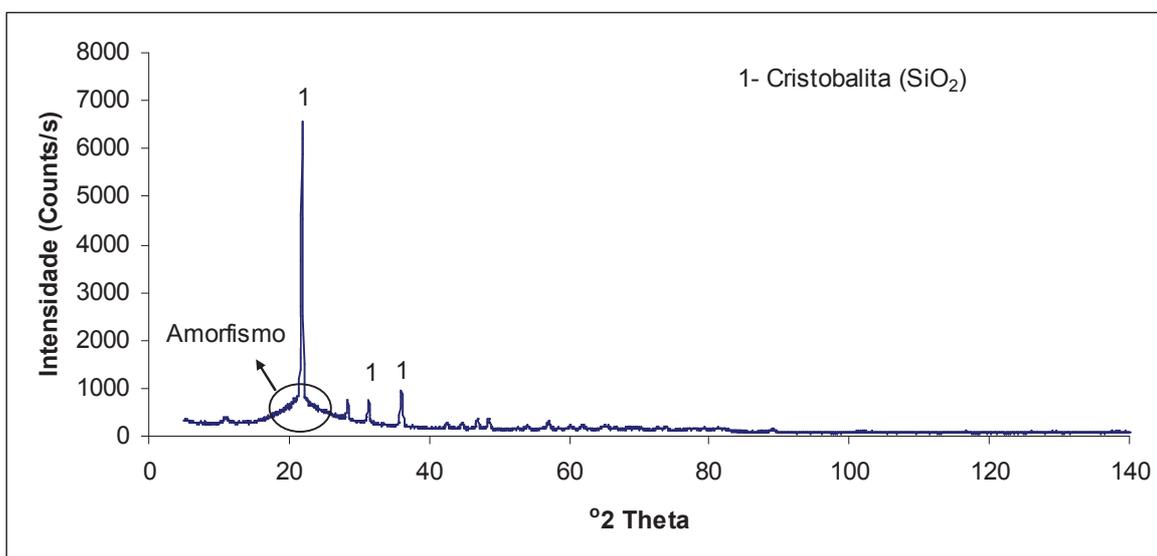


Figura 18 - Difratograma da CCA Segregada e moída (30 min).
Fonte: Elaborada pela autora

Como pode ser observada nas Figuras 17 e 18, a composição mineralógica da CCA bruta e a CCA segregada não se altera. De acordo com Tashima (2006), o desvio da linha base entre os ângulos 15 e 30 graus é indicativo de amorfismo.

Outro fator importante é a presença de Cristobalita, que é um composto formado acima de 800°C (PAYA, 2001; FERRO, SILVA e WIEBECK, 2007; e KIELING, 2009), confirmando também a presença de composto cristalino. O sistema de queima que deu origem à CCA utilizada nesta pesquisa é o de Grelha Deslizante, e mesmo a temperatura de queima sendo controlada entre 600°C e 700°C pode ocorrer a formação de material cristalino. Isto pode ser devido ao deslizamento da CCA na grelha do forno. Este movimento faz com que as cinzas que ficam mais próximas da chama atinjam uma temperatura mais elevada.

A CCA utilizada na pesquisa de Kieling (2009) é da mesma origem da utilizada neste trabalho, então, quando se compara o difratograma da CCA₂ (Figura 19), utilizada por Kieling (2009), com a CCA Bruta deste trabalho (Figura 17) percebe-se que o pico de Cristobalita na CCA Bruta é ligeiramente menor, indicando uma tendência de que o processo de queima pode estar mais controlado atualmente, como já havia sido comentado anteriormente com relação à menor perda ao fogo. Esta tendência é também reforçada pelo resultado da segregação granulométrica que reduziu em 2% o valor de material contaminante da cinza utilizada neste trabalho, e também pela análise visual das várias amostras coletadas entre 2009 (Figura 20) e 2010 (Figura 21), em função da maior presença de casca não queimada e mal queimada na mais antiga.

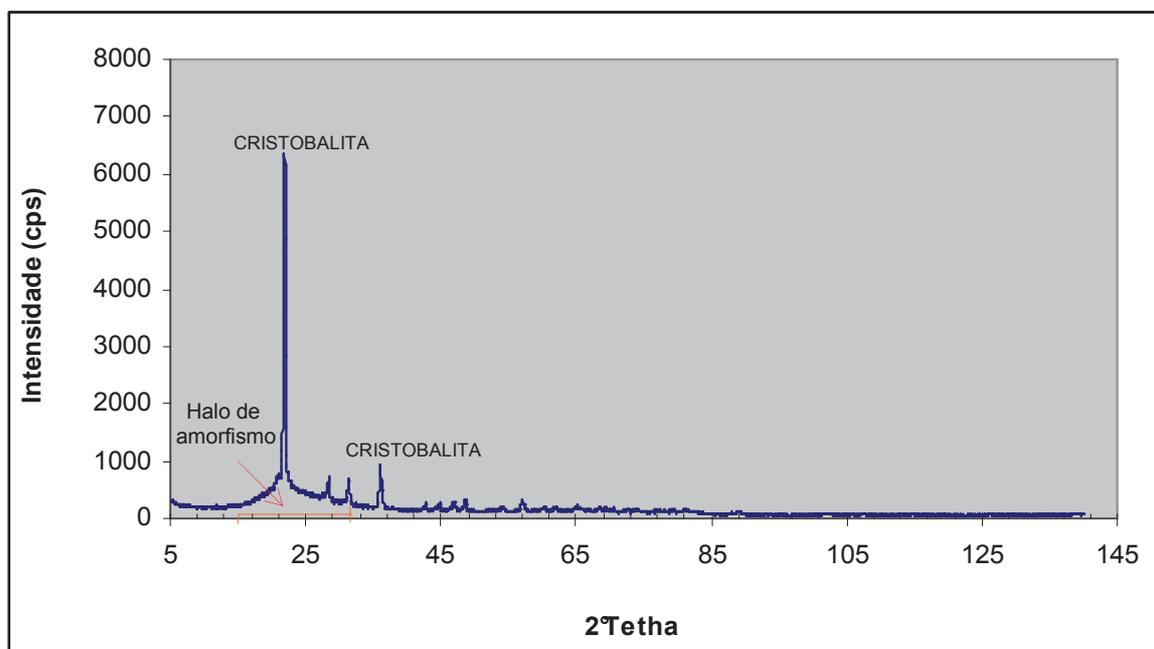


Figura 19 - Difratograma da amostra CCA2 bruta.
Fonte: KIELING, 2009



Figura 20 - Amostra da CCA₂
Fonte: KIELING, 2009



Figura 21 - Amostra da CCA Bruta
Fonte: Elaborada pela autora

A presença de quartzo no resíduo PG (figura 22) pode auxiliar na redução do tamanho dos grãos da CCA, pois é um material mais duro quando comparado com a cristobalita, pois o quartzo apresenta uma dureza igual a 7 na escala Mohs, enquanto a cristobalita apresenta uma dureza de 6,5 nesta mesma escala (Dana, 1982).

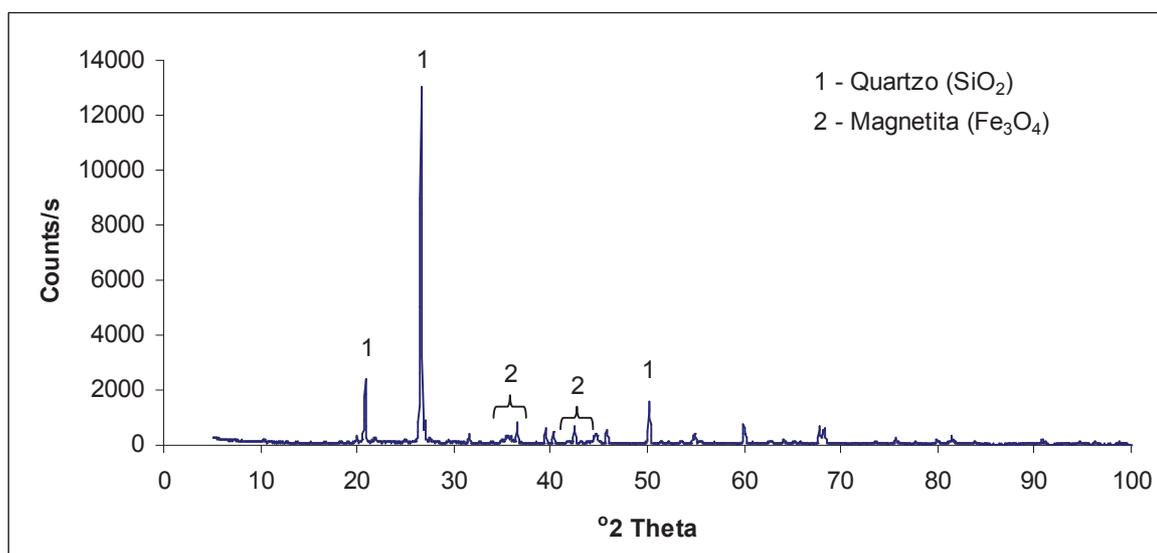


Figura 22 - Difratoograma do Resíduo Pó de granalha
Fonte: Elaborada pela autora

O número 2 indicado na figura 22 são picos provavelmente de Magnetita (Fe₃O₄), pois no difratograma do pó de aciaria elétrica analisado por Machado (2004) (Figura 23) nos ângulos entre 34° e 36°, 36° e 38° e 42° e 44° indicam a presença deste composto.

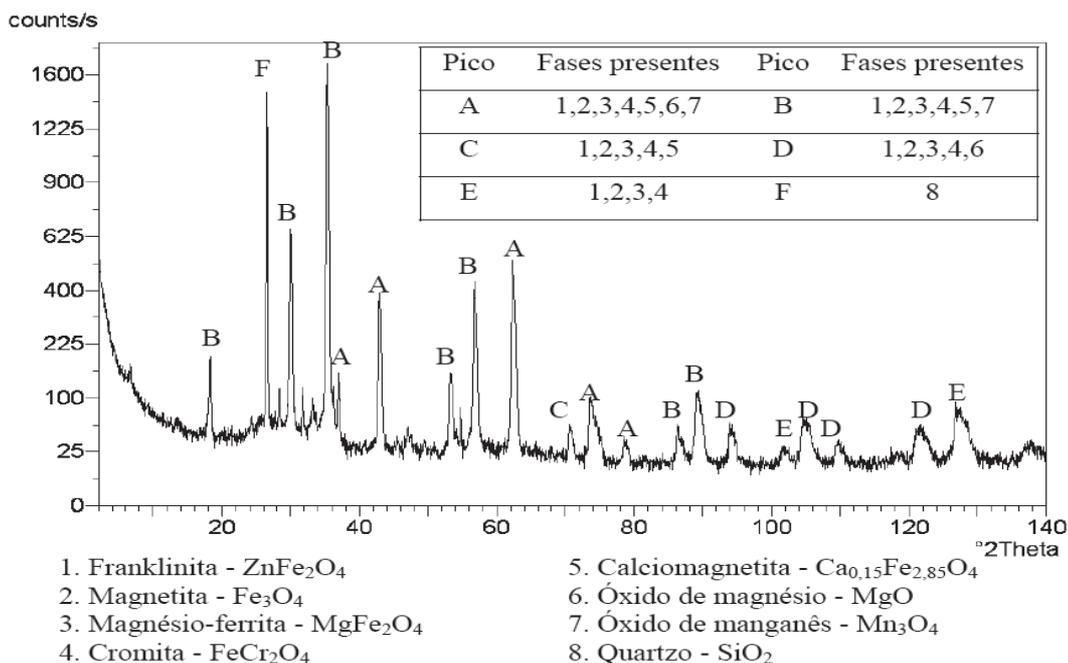


Figura 23 - Difratoograma do pó de aciaria elétrica
 Fonte: Machado (2004)

A seguir, são avaliadas as amostras moídas com aditivos, considerando para os dois casos o tempo de moagem de 30 min.

Em relação às amostras de CCA, que foram moídas com auxílio de aditivo comercial (Figura 24, 25 e 26), não houve alteração na sua composição mineralógica, comparado com a amostra de CCA sem aditivo (Figura 18), indicando que o aditivo comercial não influi na composição mineralógica da cinza moída.

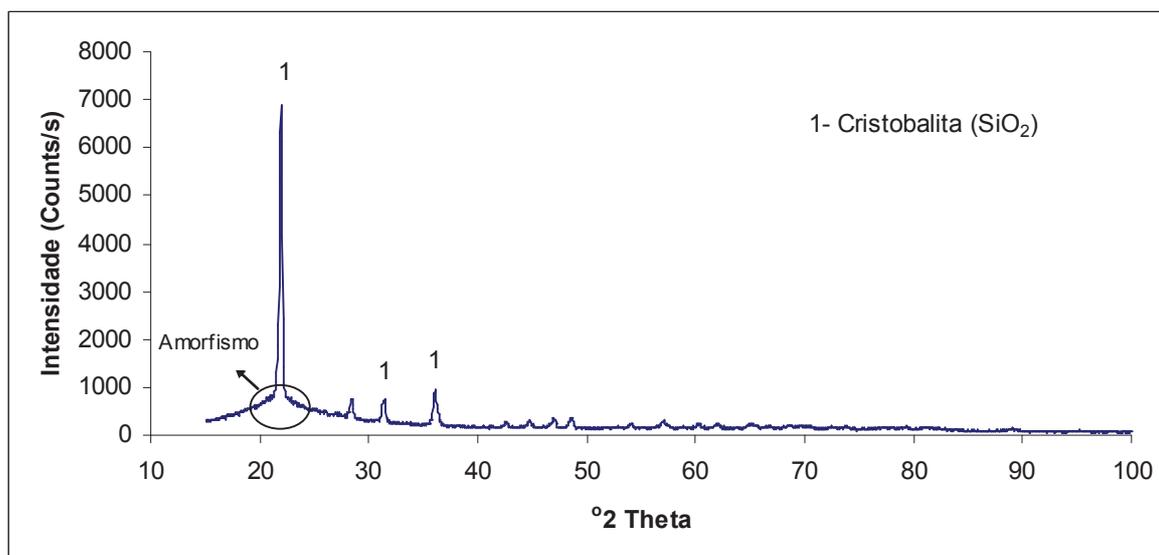


Figura 24 - Difratoograma da CCA Ad. Com. 0,03%, 30 min.
 Fonte: Elaborada pela autora

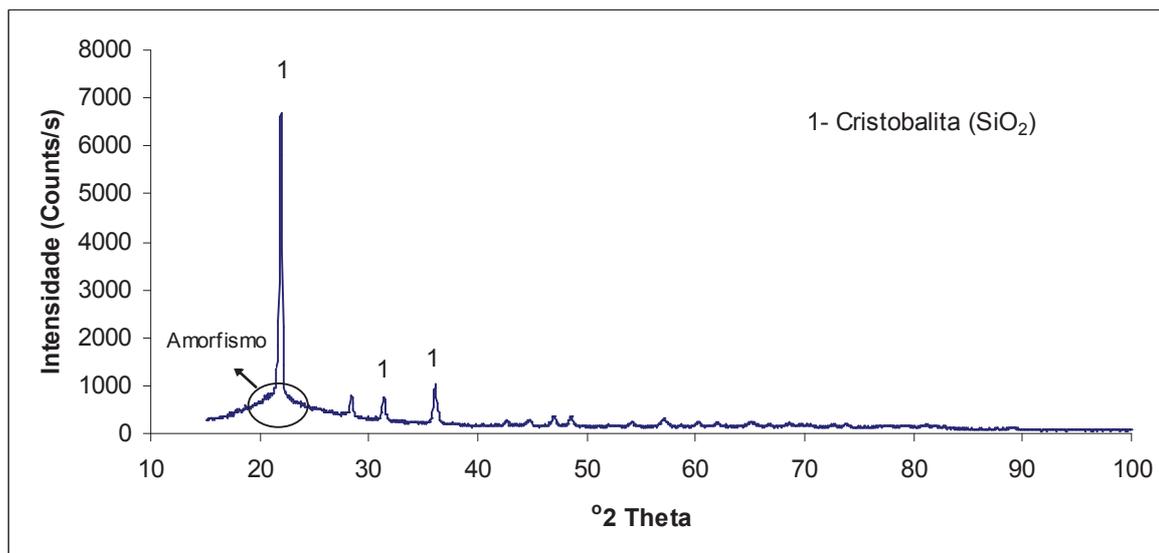


Figura 25 - Difratograma da CCA Ad. Com. 0,045%, 30min
Fonte: Elaborada pela autora

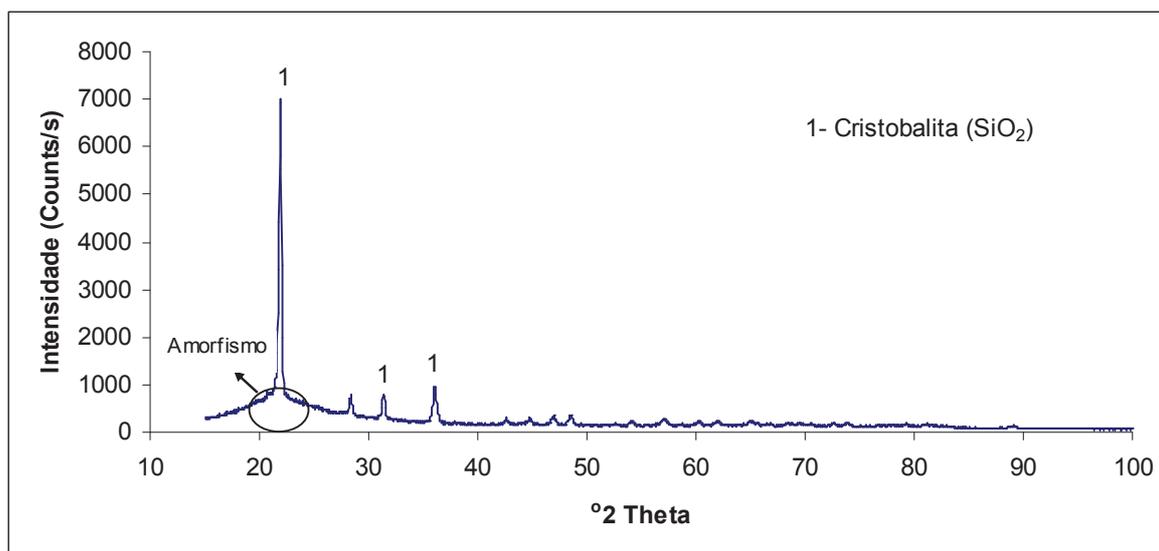


Figura 26 - Difratograma da CCA Ad. Com. 0,06%, 30min
Fonte: Elaborada pela autora

Constatou-se que a CCA, que recebeu 2% do aditivo pó de granalha, quando comparada com a CCA segregada, não apresentou grandes variações na sua composição mineralógica. No entanto as CCA com 6% e 10% apresentaram picos de Quartzo. Isto ocorreu devido à composição do resíduo, que está representada na Figura 22. Os difratogramas das amostras de CCA com aditivo de pó de granalha podem ser observados nas Figuras 27, 28 e 29.

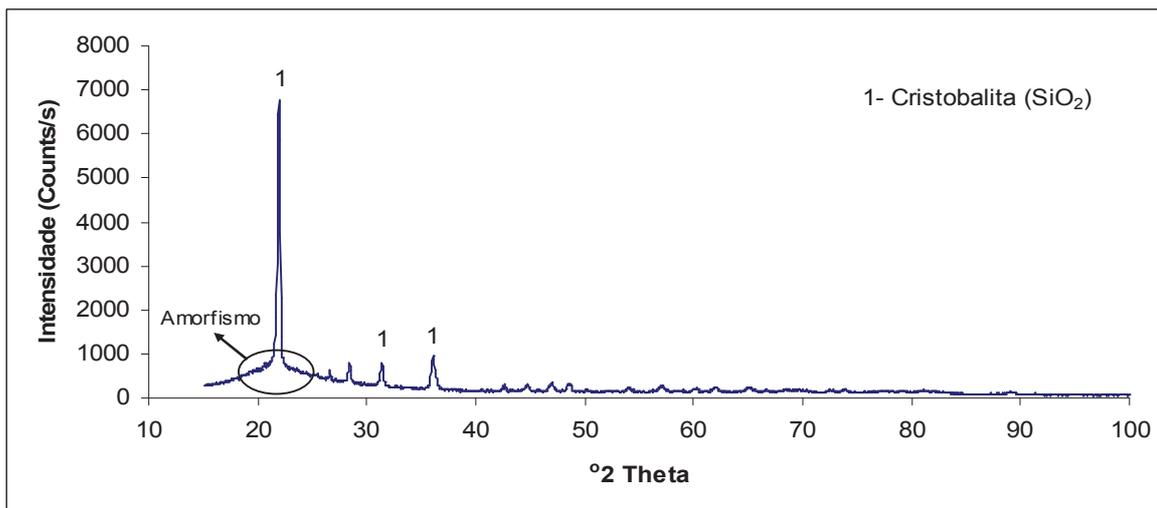


Figura 27 - Difratoograma da CCA Ad. PG 2%, 30min.
Fonte: Elaborada pela autora

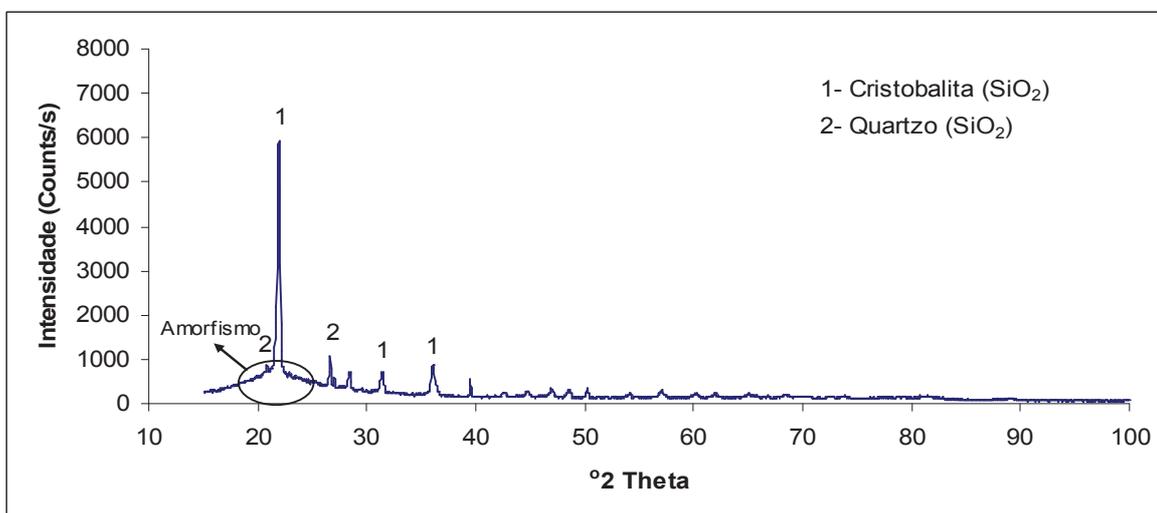


Figura 28 - Difratoograma da CCA Ad. PG 6%, 30min.
Fonte: Elaborada pela autora

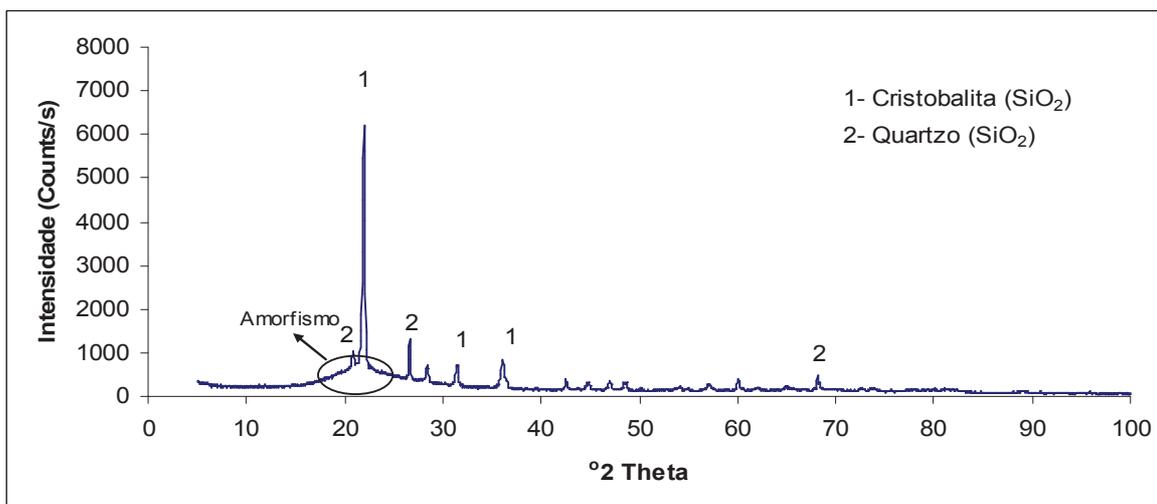


Figura 29 - Difratoograma da CCA Ad. PG 10%, 30 min.
Fonte: Elaborada pela autora

Os resultados de DRX apontaram a presença de fase cristalina em todas as amostras de CCA, porém, este fator não influenciou a qualidade da CCA. Os autores Prudêncio *et al.* (2003) e Kieling (2009) constataram, através de avaliação de vários estudos relacionados a esta questão, que o desempenho da CCA mesmo com fases cristalinas é satisfatório.

4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise da microestrutura da CCA, sem e com aditivo, foi feita através de Microscopia Eletrônica de Varreduras (MEV). As Figuras 30, 31 e 32 apresentam a morfologia observada para as amostras CCA Moída, CCA Ad. Com. e a CCA Ad. PG. Devido as CCA apresentarem uma granulometria muito fina após a moagem, quando aderida na fita do porta-amostra ficam no formato da mesma. Portanto, se a fita do porta amostra ficar sobressalente aparecem formas arredondadas, conforme indicado na figura 31. Mas este fator não interfere no resultado da análise.

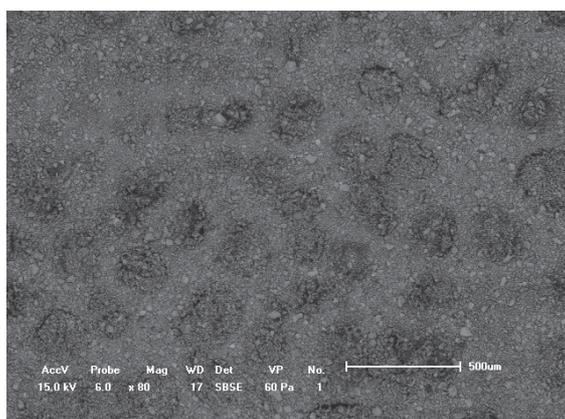


Figura 30 - Micrografia CCA Moída (aumento de 80X).

Fonte: Elaborado pela autora

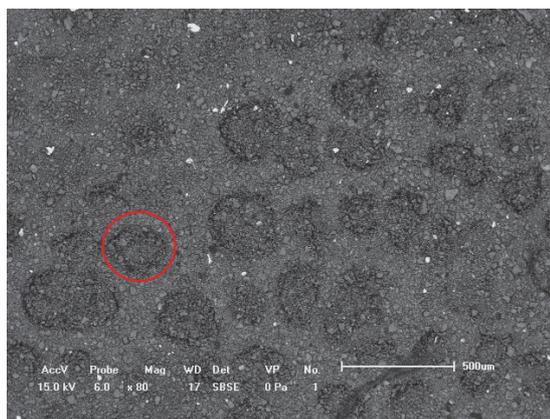


Figura 31 - Micrografia CCA Ad. PG10% (aumento de 80X).

Fonte: Elaborado pela autora

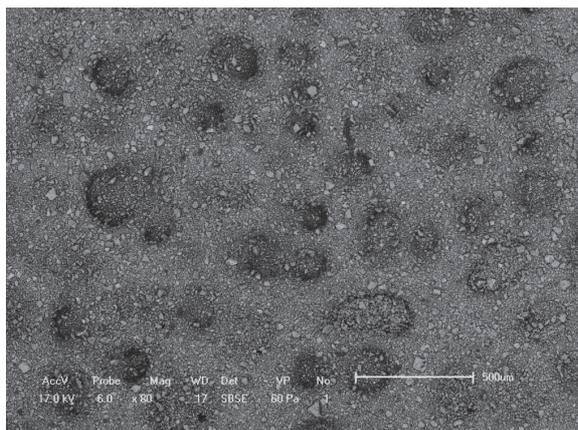


Figura 32 - Micrografia CCA Ad. Com., 0,06%
(aumento de 80X).

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando as micrografias das CCAs, percebe-se que a CCA Moída e a CCA Ad. Com. não apresentaram diferença visual em sua microestrutura. Mas quando comparadas com a CCA Ad. PG, observa-se que há existência de partículas heterogêneas (pontos brancos que aparecem da figura 31), que devem ser materiais provavelmente metálicos ou magnetita (Fe_3O_4) decorrentes da composição do aditivo Pó de granalha. Para uma melhor comparação entre as amostras, foi realizada uma espectrometria por dispersão de energia (EDS) de toda a região existente nas micrografias das CCA (Tabela 12), que permite avaliar a composição química, de caráter indicativo, das amostras moídas.

Tabela 12 - EDS para CCA Moída, CCA Ad. Com. e CCA Ad. PG

Elemento	% (massa) CCA Moída	% (massa) CCA Ad. Com. 0,06%	% (massa) CCA Ad. PG 10%
C	11,156	16,509	10,708
O	62,850	61,754	56,537
Na	nd	0,201	0,242
Mg	0,252	0,231	0,299
Al	0,385	0,333	0,464
Si	23,699	19,777	29,048
P	0,229	0,184	nd
K	1,097	0,880	1,373
Ca	0,332	0,131	0,444
Fe	nd	nd	0,885
Total	100	100	100

nd = não detectado

Fonte: Elaborado pela autora

Comparando os resultados de EDS, pode-se concluir que a CCA Moída e CCA Ad. Com. são muito semelhantes em sua composição química. Em relação à CCA Ad. PG, a composição química também não varia muito comparada com a CCA Moída, com exceção do Fe. A presença de ferro na CCA Ad. PG era esperada, pois este resíduo é oriundo do processo de jateamento de granalha das peças de ferro fundido, assim como um maior percentual de Si em função da sua presença no PG.

Para avaliar interação do aditivo pó de granalha com a CCA, foi realizada uma análise de MEV mais detalhada das fases da CCA Ad. PG 10% (Figuras 33 e 34) e do Resíduo PG, e também foram analisadas via EDS, conforme os pontos indicados nas Figuras 35, 36, 37, 38 e 39. Na Tabela 13 e 14 são apresentados os resultados das análises via EDS.

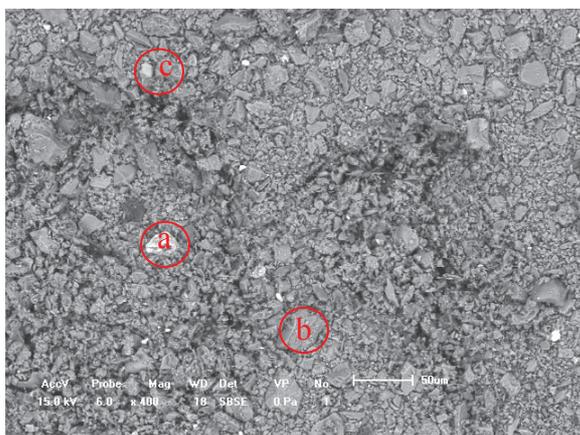


Figura 33 - Micrografia CCA Ad. PG
(aumento de 400X)
Fonte: Elaborado pela autora

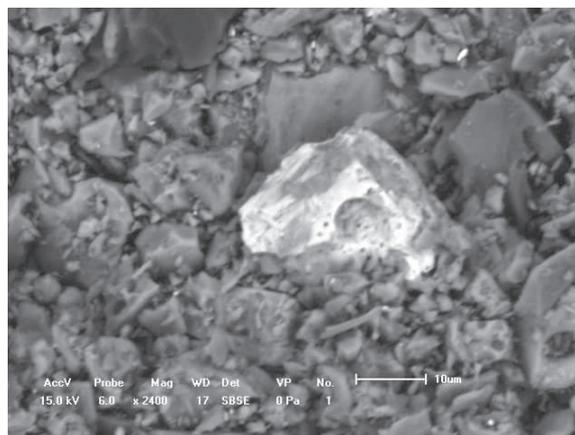


Figura 34 - Ponto a CCA Ad. PG
(aumento de 2400X)
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13 - EDS do Ponto a Identificado no Resíduo PG

Elemento	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
% (massa) Ponto a	4,371	60,199	0,424	3,857	2,790	18,740	0,298	0,373	5,034	2,651	1,263

Fonte: Elaborado pela autora

Os pontos identificados na Figura 33 são provavelmente provenientes da adição do resíduo PG. O ponto a, que pode ser melhor observado na Figura 34, tende a ser material proveniente da areia verde utilizada no processo de fundição

que ficou aderida à peça jateada. Ribeiro (2008), quando analisou a areia verde de fundição, encontrou elementos químicos semelhantes.

O Ponto *b* (Figura 33) refere-se ao mesmo material observado nas Figuras 36 e 38 do resíduo PG, sendo provavelmente grão de areia. O Ponto *c* (Figura 33) provavelmente é uma plaqueta de ferro, sendo observado material semelhante no Ponto 2 encontrado na micrografia do resíduo PG (Figura 37). A Figura 35 apresenta uma micrografia referentes ao resíduo PG.

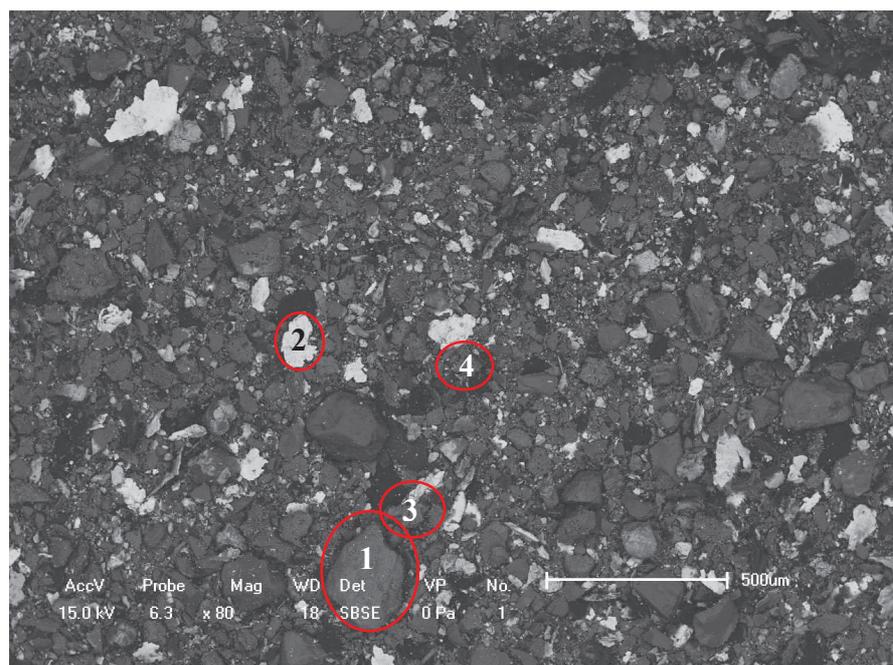


Figura 35 - Micrografia Resíduo PG
(aumento de 80X)

Fonte: Elaborado pela autora

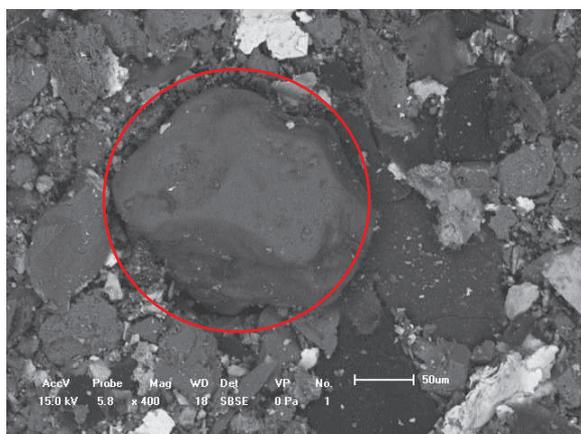


Figura 36 - Ponto 1 identificado na micrografia
Resíduo PG (aumento de 400x)

Fonte: Elaborado pela autora



Figura 37 - Ponto 2 identificado na micrografia
Resíduo PG (aumento de 400x)

Fonte: Elaborado pela autora

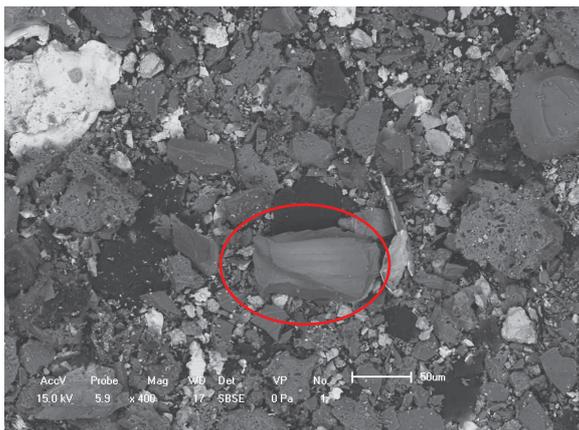


Figura 38 - Ponto 3 identificado na micrografia Resíduo PG (aumento de 400x)
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 39 - Ponto 4 identificado na micrografia Resíduo PG (aumento de 400x)
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 - EDS dos Pontos Identificados no Resíduo PG

Elemento	% (massa) Ponto1	% (massa) Ponto 2	% (massa) Ponto 3	% (massa) Ponto 4
C	12,355	4,056	2,856	10,803
O	58,186	11,845	68,363	38,755
Si	29,459	2,758	27,921	16,717
Na	nd	0,406	0,355	0,783
Mg	nd	0,312	0,205	0,779
Al	nd	0,783	0,300	6,370
P	nd	0,292	nd	nd
Mn	nd	0,847	nd	nd
Fe	nd	78,708	nd	23,087
K	nd	nd	nd	0,819
Ca	nd	nd	nd	0,966
Ti	nd	nd	nd	0,921
Total	100	100	100	100

nd = não detectado

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados da análise indicam que o ponto 1 (Figura 36) e o ponto 3 (Figura 38) podem ser um grão de areia, oriundo do molde de areia que envolve a peça de ferro fundido, pois quando se compara a composição química da areia analisada por Vieira *et. al.* (2008) que possui 86,66% de SiO₂ e as análises de

MEV obtida por Gaspar *et. al.* (2007), que caracterizou areia de fundição via MEV-EDS, os resultados destes autores são semelhantes aos Pontos 1 e 3.

Analisando o ponto 2 (Figura 37), há uma indicação de que seja uma plaqueta de ferro metálico, pois o resultado do EDS apresenta em torno de 78% de ferro. Este material foi provavelmente arrancado pelo atrito entre as esferas de granalha e a superfície da peça de ferro fundido. Estas plaquetas podem ser consideradas muito pequenas (em torno de 50 μ m), pois o processo é controlado para não danificar a superfície da peça em demasia, o que traria problemas dimensionais, e apenas para limpá-la dos grãos de areia aderidos a sua superfície após o processo de vazamento, solidificação, resfriamento e desmoldagem.

Já o Ponto 4 (Figura 39), por ser um material poroso, tende a ser um componente da mistura da areia verde, possuindo também composição química semelhante ao material da figura 34.

4.1.5 Massa Específica

Os valores de massa específica determinada de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), conforme consta no item 3.4.5, para as amostras de CCA sem e com aditivos estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica da CCA

	Tempo de Moagem	Massa Específica (g/cm³)
CCA Moída	30min	2,10
	1h	2,08
	2h	2,11
	4h	2,12
CCA Ad. Com 0,03%	30min	2,05
	1h	2,09
	2h	2,10
	4h	2,10
CCA Ad. Com 0,045%	30min	2,04
	1h	2,07
	2h	2,12
	4h	2,11
CCA Ad. Com 0,06%	30min	2,08
	1h	2,08
	2h	2,07
	4h	2,13
CCA Ad. PG 2%	30min	2,06
	1h	2,08
	2h	2,11
	4h	2,11
CCA Ad. PG 6%	30min	2,08
	1h	2,10
	2h	2,10
	4h	2,14
CCA Ad. PG 10%	30min	2,11
	1h	2,14
	2h	2,14
	4h	2,17

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores da massa específica, mostrados na tabela 9, confirmam a baixa densidade da CCA quando comparado com o cimento utilizado nesta pesquisa (3,11g/cm³). A diferença entre a massa específica do cimento e da cinza variou de 66% a 70%. Este efeito acarretou no aumento do volume da pasta e, conseqüentemente, no de argamassa, sendo necessária uma correção dos traços.

Ao se analisar a massa específica em relação à adição dos aditivos e as concentrações, foi observado que a maior variação comparada com a CCA moída é a CCA Ad. PG 10%, que foi de 0,5%, 2,9%, 1,4% e 2,4% para os tempos de moagem de 30 min, 1h, 2h e 4h, respectivamente. Isto pode ser devido à composição do resíduo PG, e sua massa específica que é de 2,87g/cm³.

Cabe ressaltar que a massa específica se fez necessária, também, para a

realização do ensaio da NBR 5752 - Determinação da atividade pozolânica com o cimento (ABNT, 1992).

4.1.6 Área Superficial Específica

Ao se analisar os dados obtidos no ensaio de BET observou-se, além de uma grande variabilidade, valores que contradiziam conceitos já consolidados da literatura estudada como: quanto menor o diâmetro médio maior será área superficial específica e sendo maior a área superficial será maior o índice de atividade pozolânica. Em função disto, uma segunda via foi analisada, e a variação continuou sendo bastante significativa, colocando em dúvida os resultados. Como foram somente algumas amostras foram analisadas duas vezes, devido ao custo, não foi possível relacionar a área superficial específica com o diâmetro médio das partículas de CCA. No apêndice A encontram-se os resultados deste ensaio e uma discussão isolada dos resultados obtidos.

4.1.7 Distribuição Granulométrica

Na Tabela 16 são apresentadas as distribuições granulométricas das CCA sem e com aditivo.

Tabela 16 - Distribuição Granulométrica das partículas

	Tempo de Moagem	D ₁₀ (m μ)	D ₅₀ (m μ)	D ₉₀ (m μ)	D. Médio (m μ)
CCA Moída	30min	9,03	40,27	80,02	43,07
	1h	5,08	27,30	56,68	29,48
	2h	2,15	10,69	25,46	12,70
	4h	1,53	7,78	19,38	9,38
CCA Ad. Com 0,03%	30min	10,24	42,97	84,62	45,82
	1h	5,79	29,39	60,41	31,77
	2h	2,46	12,64	33,42	15,72
	4h	1,60	7,79	20,02	9,48
CCA Ad. Com 0,045%	30min	10,01	43,07	85,14	45,98
	1h	4,87	25,56	53,69	27,78
	2h	2,29	11,38	30,07	14,22
	4h	1,67	7,74	19,20	9,33
CCA Ad. Com 0,06%	30min	11,08	43,69	92,57	48,59
	1h	5,14	25,42	52,97	27,63
	2h	2,69	13,47	35,64	16,76
	4h	1,66	8,01	19,89	9,67
CCA Ad. PG 2%	30min	9,27	40,17	80,28	43,17
	1h	4,40	25,66	49,20	26,57
	2h	2,28	12,60	31,20	15,24
	4h	1,54	7,88	20,03	9,61
CCA Ad. PG 6%	30min	11,15	40,91	75,31	42,59
	1h	4,79	26,35	48,01	26,53
	2h	2,26	12,72	31,15	15,26
	4h	1,54	8,18	20,62	9,93
CCA Ad. PG 10%	30min	10,17	40,55	77,53	42,81
	1h	4,40	25,38	47,56	25,88
	2h	2,41	13,38	33,39	16,20
	4h	1,59	8,29	20,85	10,06
Resíduo PG	-	6,22	38,33	92,32	44,94

D₁₀: Diâmetro equivalente a 10% de massa acumulada

D₅₀: Diâmetro equivalente a 50% de massa acumulada

D₉₀: Diâmetro equivalente a 90% de massa acumulada

D. Médio: Diâmetro Médio

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se na tabela 16, que os menores diâmetros médios foram obtidos em todas as CCA moídas por 4 horas, independente do uso de aditivo ou não. De acordo com a tabela 3, em relação ao diâmetro da partícula, a CCA com diâmetro médio inferior a 17 μ m pode ser utilizada para diversas aplicações, como por exemplo, no concreto. Portanto, conforme os valores apresentados na tabela 16, todas as CCA deste trabalho a partir de 2 horas de moagem se enquadram no diâmetro necessário para uso. Mas somente as amostras de CCA que foram

moídas por 4h atingiram o diâmetro médio do cimento, que fica em torno de $12\mu\text{m}$ (POUEY, 2006).

Analisando o gráfico da Figura 40, ao se comparar a CCA com aditivo comercial com a moída sem aditivo, percebe-se que o diâmetro da partícula da CCA Ad. Com. começa a reduzir a partir de 1 hora. Este fato pode ser devido ao tipo de aditivo, por ser uma substância derivada de amina. Como estes compostos possuem uma faixa muito vasta de ponto de ebulição, não se pode indicar com certeza qual é o ponto de volatilização, mas sabe-se que existem grupos de aminas que volatilizam entre 17°C a 50°C (RUSSELL, 1994). Pode-se inferir que a moagem com o aditivo comercial, independente da concentração, por 30min não atingiu a temperatura necessária para que este comece a dispersar as partículas. Observa-se que no tempo de moagem por 1 hora, a CCA Ad. PG obteve o diâmetro médio menor independente do teor de aditivo, indicando uma melhor eficiência comparado com o aditivo comercial, mas mesmo assim não atingiu o diâmetro adequado para tornar a CCA um co-produto para aplicação na construção civil, por exemplo.

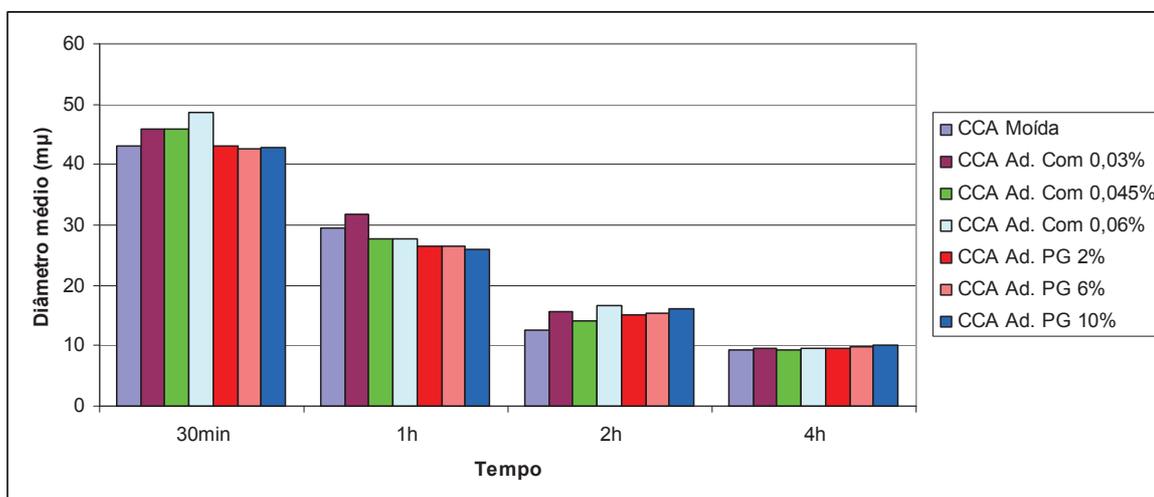


Figura 40 - Comparação do diâmetro médio x tempo das CCA
Fonte: Elaborado pela autora

Outra constatação é que o uso dos aditivos não influenciou significativamente no diâmetro médio das partículas, quando comparado com a CCA moída sem aditivo. Somente para as amostras contendo PG (para todos os teores) e nos tempos de 30 min e 1h, observou-se menores diâmetros médios que na cinza moída sem aditivo. A partir de 2 horas de moagem foi observado

que para todas as amostras moídas (com e sem aditivo), parte do material ficou aderido nas paredes jarro e nas bolas do moinho. Esta aglomeração tende a diminuir a área de contato, trazendo redução da eficiência de moagem conforme mostrado nas Figuras 41 e 42, para 2 e 4 horas de moagem, respectivamente. Este fenômeno pode ter sido mais significativo nas amostras contendo aditivos, pois o diâmetro médio a partir de 2 horas aumenta em relação a CCA moída, apesar de não ter sido possível identificar visualmente esta ocorrência, apontando que o aditivo não foi eficiente.



Figura 41 - CCA moída por 2 horas
Fonte: Elaborado pela autora



Figura 42 - CCA moída por 4 horas
Fonte: Elaborado pela autora

A aglomeração, em relação ao aditivo comercial, pode ter ocorrido devido às características físicas da CCA, por ser um material heterogêneo e poroso pode ter adsorvido mais o aditivo no local onde foi adicionado, impedindo uma boa dispersão. Já o resíduo, por ter uma ação somente física na hora da moagem, ou seja, reduzir o diâmetro médio das partículas, não evitou a aglomeração.

Um dos fatores que levou a optar-se pela utilização do resíduo de pó de granalha, como aditivo facilitador da moagem, foi a distribuição granulométrica deste (Figura 43) que é 1000 vezes menor que a CCA segregada (Figura 16).

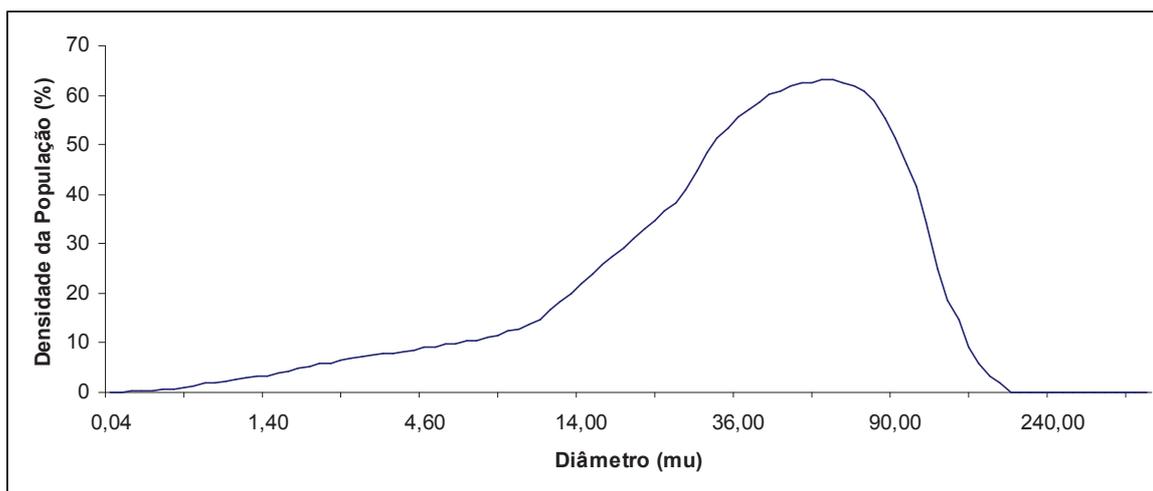


Figura 43 - Distribuição granulométrica do resíduo PG
Fonte: Elaborado pela autora

4.1.8 Índice de Atividade Pozolânica

Para determinar o índice de atividade pozolânica (IAP) das amostras de CCA sem e com aditivos foram utilizados dois métodos norma a NBR 5752/92 e o desenvolvido por Luxan *et. al.* (1989), conforme descrito no item 3.4.8.

4.1.8.1 Índice de Atividade Pozolânica – método NBR 5752/92

Para a realização deste ensaio foi utilizado o cimento tipo CII F-32, que é isento de adição de pozolanas. Suas composições química e física estão apresentadas nas tabelas 17 e 18, conforme descrição fornecida pelo fabricante de acordo com o lote de produção. A massa específica média do CII-F-32 ITAMBÉ é 3,11 g/cm³.

Tabela 17 - Composição química do cimento

QUÍMICOS									
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,07	18,49	2,55	59,79	5,35	3,11	5,42	1,04	1,54	0,62

Fonte: ITAMBÉ (2010)

Tabela 18 – Caracterização física do cimento

FÍSICOS										
Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
							1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
mm	h:min	h:min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
1	03:20	04:00	25,2	3.130	6,8	20,9	9,3	24	31	42,2

Fonte: ITAMBÉ (2010)

Os resultados obtidos para o ensaio de pozolanicidade pelo método NBR 5752 (ABNT, 1992) são apresentados na Tabela 19. Estão destacados em vermelho, na tabela, as CCA que não atingiram o mínimo de 75% de IAP e as que exigiram mais de 110% de água, não se enquadrando na norma NBR 5752 (ABNT, 1992).

Tabela 19 - IAP e Água requerida das CCA

	Tempo de Moagem	IAP	Água Requerida
Referência	-	100,00	100,00
CCA Moída	30min	56,01	120,86
	1h	59,00	120,86
	2h	69,12	112,63
	4h	88,62	100,00
CCA Ad. Com 0,03%	30min	58,92	112,09
	1h	72,77	105,39
	2h	85,54	100,00
	4h	96,42	100,00
CCA Ad. Com 0,045%	30min	61,77	112,50
	1h	78,22	100,00
	2h	94,83	100,00
	4h	104,14	100,00
CCA Ad. Com 0,06%	30min	63,05	112,50
	1h	68,93	107,14
	2h	85,13	100,00
	4h	105,48	98,13
CCA Ad. PG 2%	30min	53,15	116,82
	1h	72,64	112,50
	2h	75,61	103,99
	4h	89,35	100,00
CCA Ad. PG 6%	30min	30,19	112,50
	1h	77,93	104,26
	2h	87,08	110,98
	4h	94,20	100,00
CCA Ad. PG 10%	30min	60,41	112,50
	1h	76,47	104,87
	2h	86,60	104,27
	4h	96,07	100,00

IAP: Índice de Atividade Pozolânica

Fonte: Elaborado pela autora

Para uma melhor compreensão, os resultados da tabela 19 são mostrados nos gráficos das Figuras 44, 45 e 46. Como pode ser observado no gráfico, somente duas CCA atingiram os valores da argamassa de referência: uma foi a CCA Ad. Com. 0,045% em 4h e a outra foi a CCA Ad. Com. 0,06% em 4h, e as duas necessitaram de uma quantidade de água semelhante à argamassa de referência.

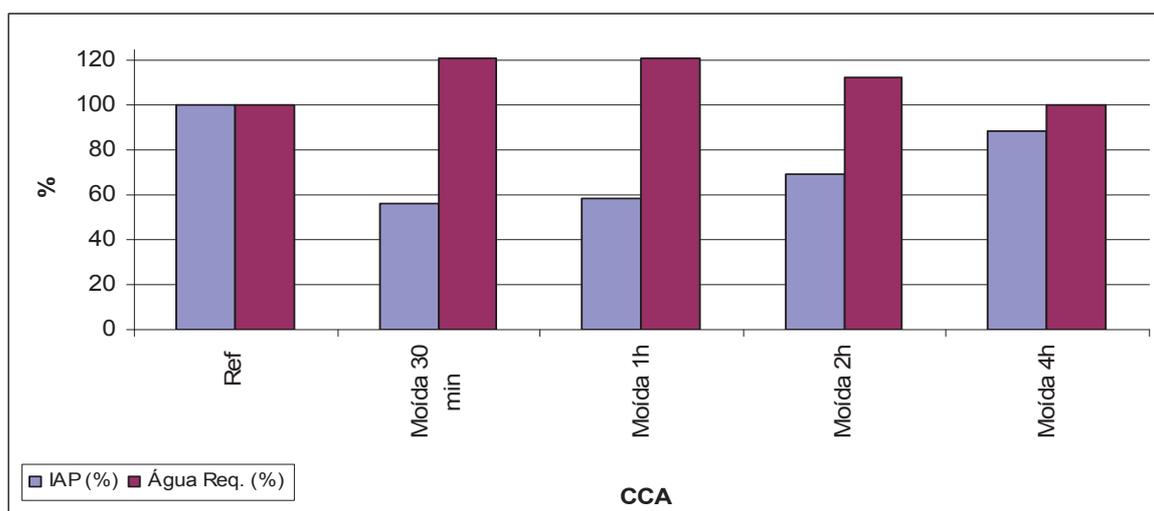


Figura 44 - IAP x Água Requerida da CCA Moída
Fonte: Elaborado pela autora

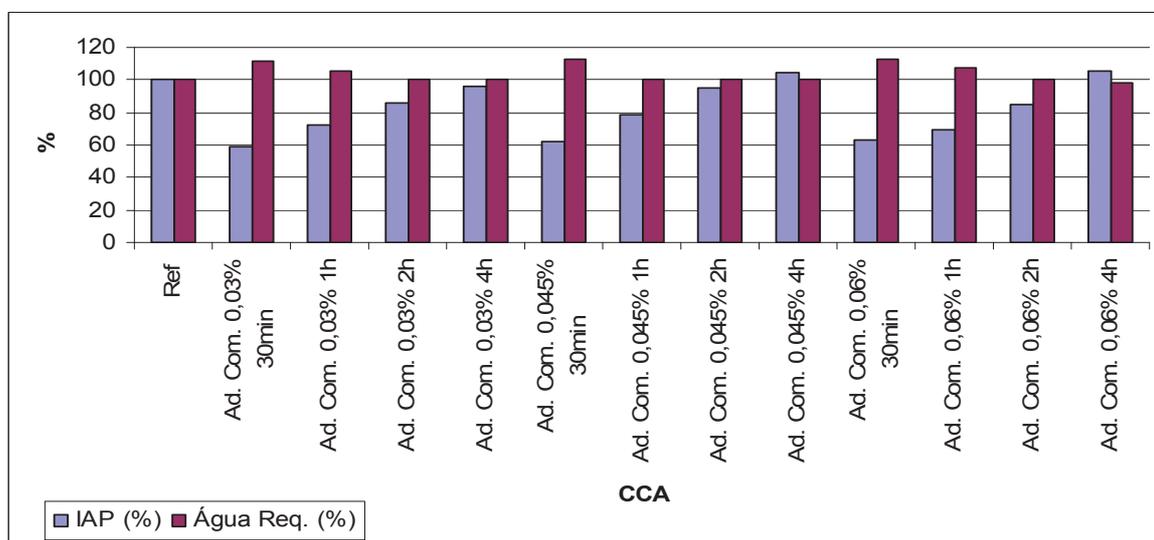


Figura 45 - IAP x Água Requerida da CCA Ad. Comercial.
Fonte: Elaborado pela autora

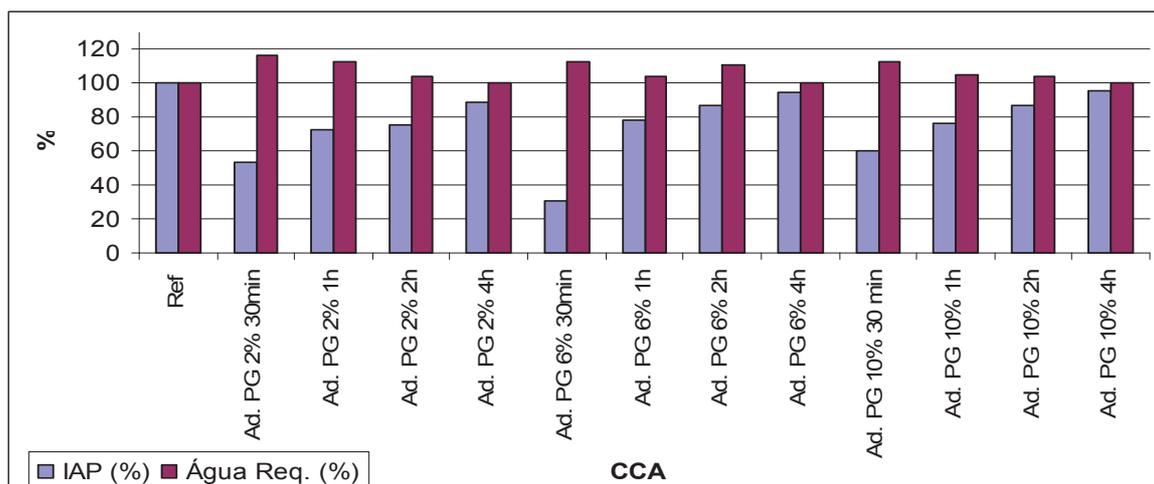


Figura 46 - IAP x Água Requerida da CCA Ad. PG.
Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os resultados da tabela 19, 43% das CCA não atingiram IAP maior que 75% conforme exige a norma NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992). Em relação à quantidade de água requerida, 39% das CCA não alcançaram o requisito desta mesma norma, que é de 110%.

Observou-se que, durante a execução do ensaio, as argamassas com CCA não se comportaram da mesma forma que as argamassas de referência, e um dos fatores esteve relacionado ao comportamento da água nas argamassas com CCA. Durante a moldagem dos corpos de provas (CP) e realização do ensaio de consistência, a água exsudava, conforme apresentado nas figuras 47 e 48. Este efeito pode estar relacionado ao tempo de mistura, e à falta de finos na granulometria da areia.

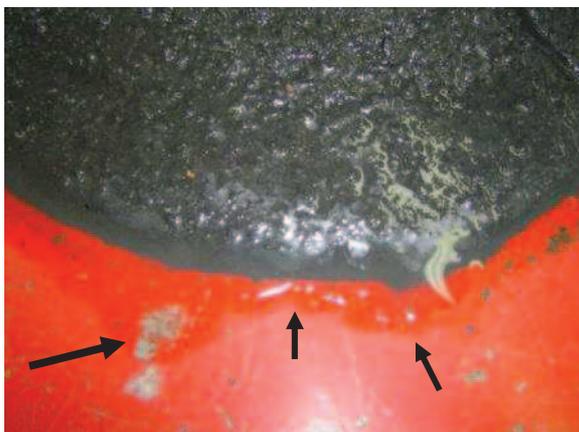


Figura 47 - Argamassa com CCA
Fonte: Elaborado pela autora



Figura 48 - CP com argamassa com CCA
Fonte: Elaborado pela autora

Pouey (2006) sugeriu uma alteração no método da norma NBR 5752 (ABNT, 1992). A autora sugeriu, que seja adotada a mesma relação água/aglomerante da argamassa de referência, e empregado uso de aditivo superplastificante para obtenção da consistência de (225 ± 5) mm. De acordo com os resultados da pesquisa, o novo método foi mais eficiente quando comparado com o método sugerido pela norma, pois as CCA necessitam de mais água para atingir a consistência exigida pela norma, diminuindo assim a resistência à compressão das argamassas.

Rego (2004) também apresenta algumas críticas ao método. Uma delas é a 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 fíler e os pontos de nucleação das partículas de CCA na pasta de cimento.

Ao se comparar o diâmetro médio das CCA, sem e com aditivo, constatou-se que quanto menor o diâmetro maior é a pozolonacidade e observou-se também que o tempo de moagem prevalece sobre aditivo, conforme demonstrado na figuras 49, 50 e 51.

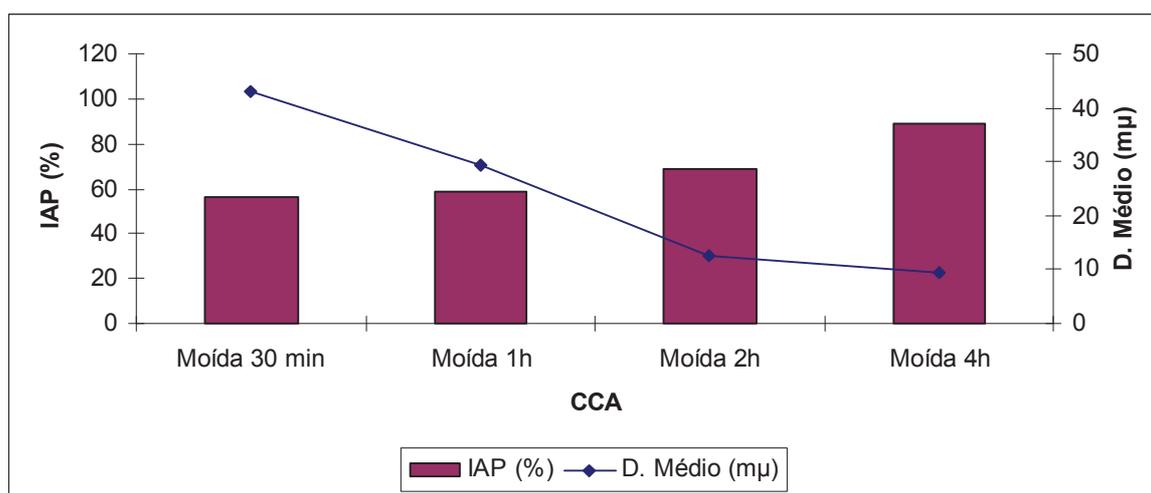


Figura 49 - Diâmetro médio x IAP da CCA Moída
Fonte: Elaborado pela autora

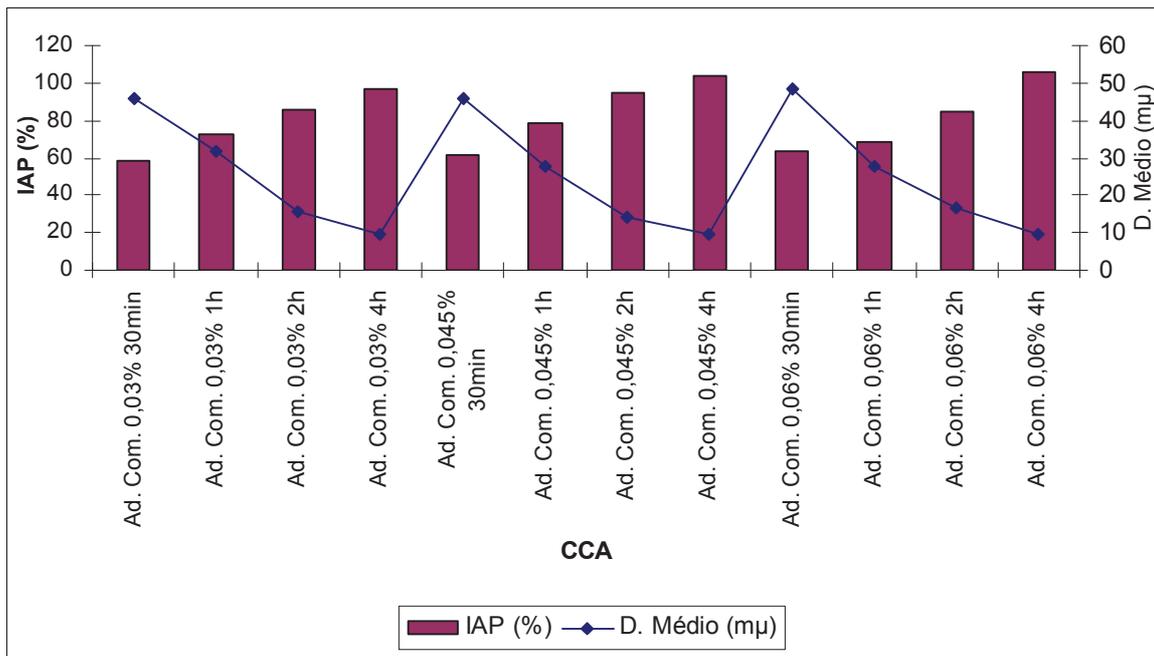


Figura 50 - Diâmetro médio x IAP da CCA Ad. Comercial
Fonte: Elaborado pela autora

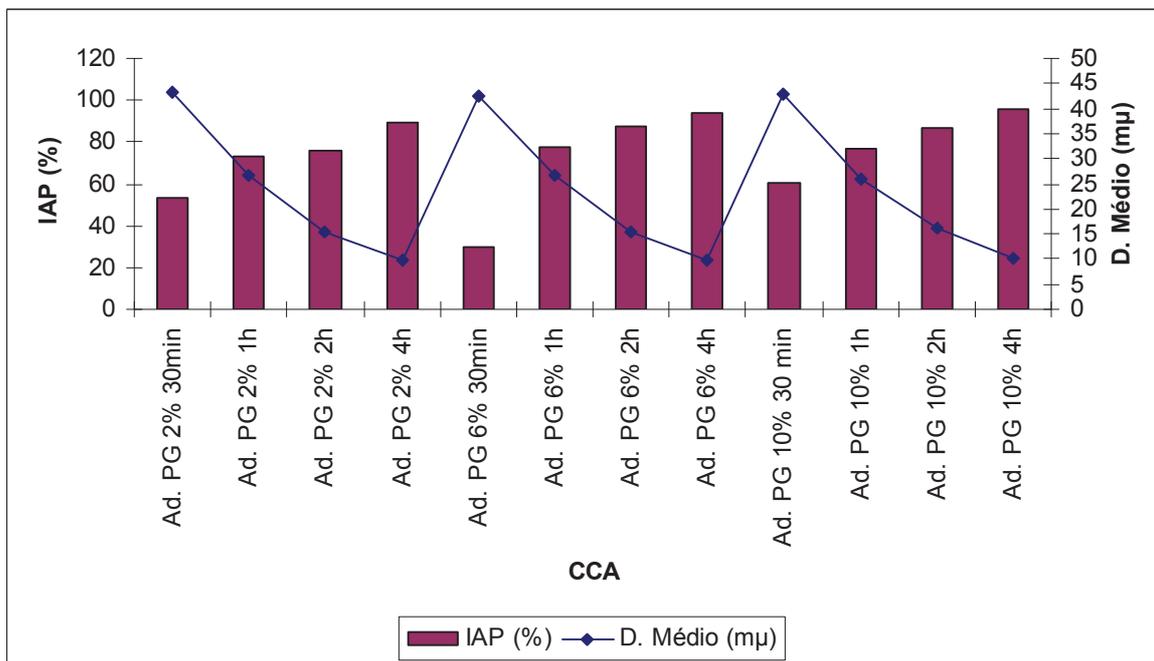


Figura 51 - Diâmetro médio X IAP da CCA Ad. Pó de Granalha
Fonte: Elaborado pela autora

4.1.8.2 Índice de Atividade Pozolânica – método de Luxan (1989)

A determinação da atividade pozolânica, desenvolvida por Luxan (1989), foi realizada através da medição da condutividade elétrica do material, conforme descrito no item 3.4.8.

Os resultados obtidos para o ensaio de condutividade elétrica das CCA, sem e com aditivos, são apresentados na figura 52, 53, 54.

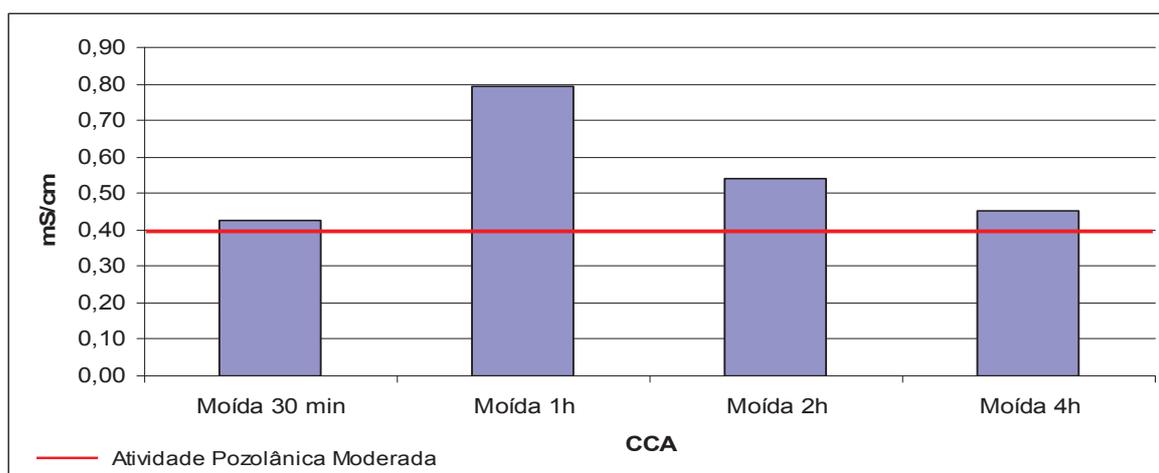


Figura 52 - IAP das CCA Moídas
Fonte: Elaborado pela autora

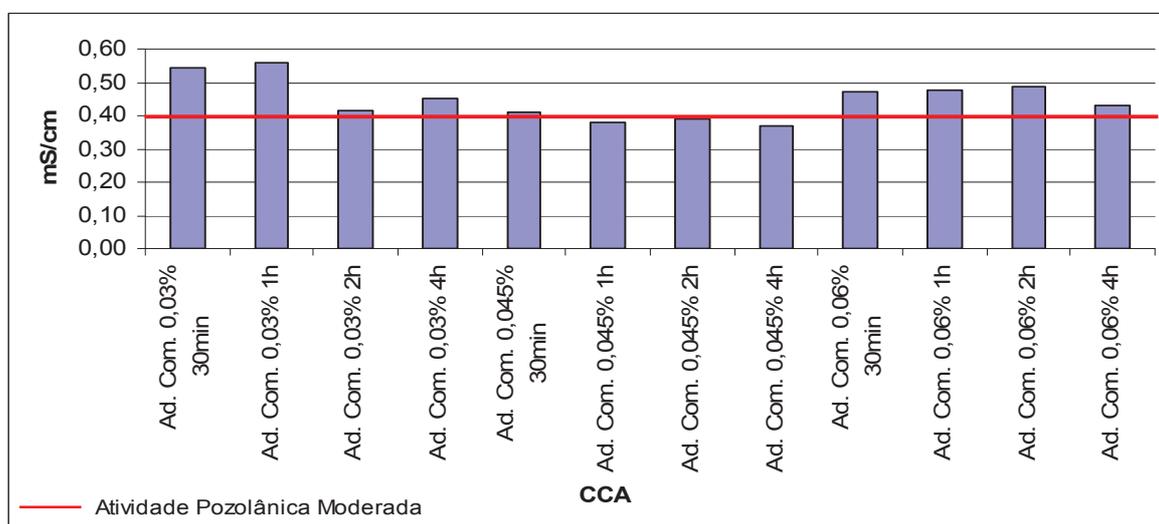


Figura 53 - IAP das CCA Ad. Com.
Fonte: Elaborado pela autora

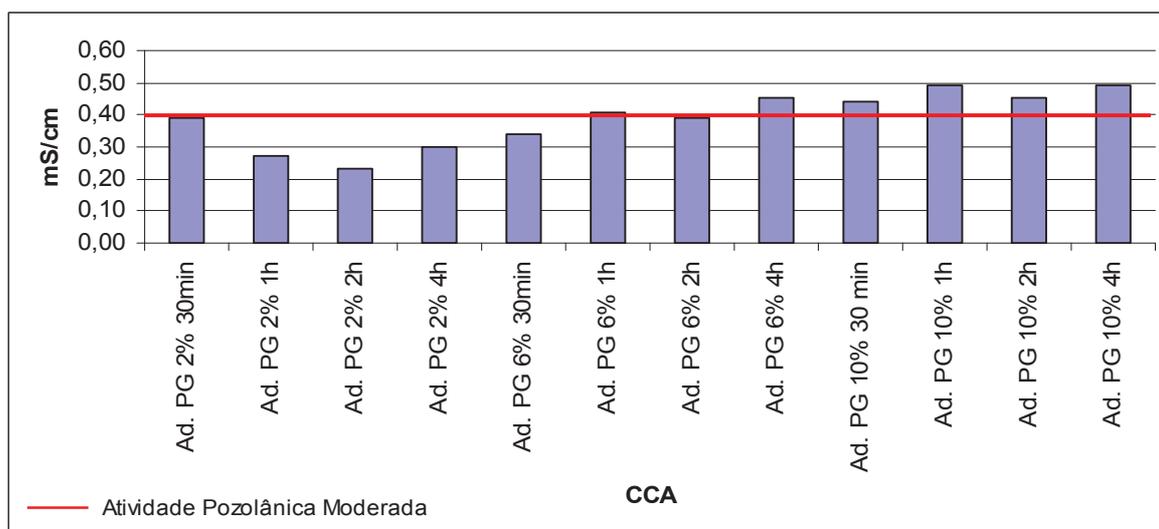


Figura 54 - IAP das CCA Ad. PG
Fonte: Elaborado pela autora

Conforme os resultados obtidos nos ensaios de condutividade elétrica, 32% das amostras são consideradas sem atividade pozolânica, apresentando variação inferior a 0,4mS/cm. Os outros 68% são classificados como material com atividade pozolânica moderada, apresentando variação entre 0,4 e 1,2 mS/cm.

Segundo Kieling (2009), a variação da condutividade elétrica pode estar relacionada mais com a área de superfície específica das partículas, do que com o teor e a qualidade de sua fase ativa.

Comparando os dois métodos utilizados neste trabalho para medir a atividade pozolânica, o ensaio desenvolvido por Luxan (1989) tende a ser mais vantajoso de acordo com Kieling (2009) e, Dafico e Prudêncio Jr. (2002), pois o resultado do ensaio é obtido num tempo menor. Analisando os valores na tabela 20, o método de condutividade elétrica indica que 68% das CCA analisadas possuem atividade pozolânica moderada, ou seja, ficam dentro da faixa de 0,4 a 1,2mS/cm. Já o método da norma NBR 5752 (ABNT, 1992) mostra que 53% das CCA atingiram o limite mínimo de 75% para serem consideradas pozolânicas. Além deste método possuir vários fatores que podem influenciar negativamente nos resultados, como granulometria da areia (poucos finos), a substituição do cimento pela CCA deve ser feita em volume, em função de que esta absorve mais água devido a porosidade dos seus grãos. Este é um fator favorável para o estudo como material adsorvente (KIELING, 2009).

Tabela 20 - Comparação entre Condutividade Elétrica e IAP

	Tempo de Moagem	Condutividade Elétrica (mS/cm)	IAP (5752/1992) (%)
CCA Moída	30min	0,43	56,01
	1h	0,80	59,00
	2h	0,54	69,12
	4h	0,45	88,62
CCA Ad. Com 0,03%	30min	0,55	58,92
	1h	0,56	72,77
	2h	0,42	85,54
	4h	0,45	96,42
CCA Ad. Com 0,045%	30min	0,41	61,77
	1h	0,38	78,22
	2h	0,39	94,83
	4h	0,37	104,14
CCA Ad. Com 0,06%	30min	0,47	63,05
	1h	0,48	68,93
	2h	0,49	85,13
	4h	0,43	105,48
CCA Ad. PG 2%	30min	0,39	53,15
	1h	0,27	72,64
	2h	0,23	75,61
	4h	0,30	89,35
CCA Ad. PG 6%	30min	0,34	30,19
	1h	0,40	77,93
	2h	0,39	87,08
	4h	0,46	94,20
CCA Ad. PG 10%	30min	0,44	60,41
	1h	0,50	76,47
	2h	0,46	86,60
	4h	0,50	96,07

IAP: Índice de Atividade Pozolânica

Fonte: Elaborado pela autora

De forma geral, em relação à composição química das CCA não há grandes variações quando comparadas às cinzas com e sem aditivo, observando-se o mesmo comportamento em relação às demais características.

Com relação aos tempos de moagem, tanto o aditivo comercial, quanto o resíduo, utilizados como auxiliar de moagem, não apresentaram um desempenho favorável em relação ao referência, pois a partir de 2 horas houve aderência do material no corpo moedor e nas paredes do jarro. Também foi constatado que o aditivo comercial só atingiu um diâmetro médio menor que o da CCA moída sem aditivo somente no tempo de 1 hora.

O baixo desempenho apresentado pelo aditivo químico pode estar relacionado, entre outros, à temperatura de ebulição do aditivo em função da

composição química e à eficiência da dispersão somada às características da porosidade da cinza.

Constatou-se, que no tempo de moagem de 1 hora, a CCA com o resíduo PG obteve o diâmetro médio menor independente do teor de aditivo, indicando uma melhor eficiência comparada com o aditivo comercial.

Em relação à pozolanicidade, foi verificado que a IAP está inversamente relacionada com o diâmetro médio e que o tempo de moagem tem maior influência na atividade pozolânica que os próprios aditivos utilizados.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o uso de aditivos para melhorar a eficiência da moagem da CCA, valorizando-a como co-produto. Para isto foram escolhidos 4 tempos de moagem e 2 tipos de aditivos, um comercial utilizado para moagem de cimento e um resíduo da indústria metal-mecânica. Foram realizados 9 ensaios físicos e químicos, totalizando uma matriz de 316 amostras analisadas. Desta forma, são tecidas as considerações finais referentes ao escopo deste trabalho, conforme segue.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que o resultado obtido pela segregação granulométrica corrobora para a importância desta etapa, conforme sugerido por Kieling (2009), pois resulta numa CCA com distribuição granulométrica mais regular, retirando materiais cristalinos e casca não queimada. Outro aspecto importante detectado foi que o sistema de queima da casca de arroz, que originou a cinza utilizada neste trabalho, está mais eficiente, pois houve uma redução de 2% de material contaminante, comparado com as amostras coletadas anteriormente à amostragem utilizada para este trabalho.

Baseados nos resultados dos ensaios, foi possível concluir que os aditivos utilizados na moagem da CCA não influenciaram significativamente na redução do diâmetro das partículas, porém quando moída por 1 hora, a CCA com Ad. PG obteve melhor resultando, indicando uma melhor eficiência comparada com o aditivo comercial, mas não atinge o diâmetro ideal utilizável.

Mesmo que neste trabalho o uso dos aditivos SIKA-GRIND 200 e pó de granalha não reduziram significativamente o diâmetro médio das partículas. O uso de aditivos para reduzir o tamanho de grão da CCA deve ser melhor estudado para qualificá-la como matéria prima na construção civil.

Em relação à composição química da CCA moída com aditivo de moagem, pode-se concluir que não houve alteração significativa. A CCA com aditivo

comercial não apresentou nenhuma alteração independente das concentrações do aditivo. Porém, quando analisado a CCA com o pó de granalha, é detectada a presença de ferro na ordem de 0,28 a 1,31%, mas em baixa concentração oriundo do processo de jateamento de peças de ferro fundido. O aparecimento deste elemento, não impede que o resíduo seja utilizado, pois a maioria das CCA possuem este elemento em sua composição e outros materiais utilizados na construção civil, como escória e sílica ativa também contêm ferro.

Os resultados do IAP indicaram que a condutividade elétrica mostra-se como um ensaio mais vantajoso que o ensaio de argamassa, pois o método de condutividade elétrica indica que 68% das CCA analisadas possuem atividade pozolânica moderada, contra 53% do método com argamassa. Assim como o método 5752 (ABNT, 1992), o da condutividade elétrica (Luxan, 1989) também possui fatores que podem influenciar o resultado, como a quantidade de sílica amorfa existente na amostra. Porém, se houver uma adaptação na norma 5752 para a CCA e realizar a quantificação do material amorfo existente na amostra para se ter um melhor parâmetro na hora da medição da condutividade elétrica, estes dois ensaios, complementarmente, poderão resultar em uma melhor forma de se determinar o índice de atividade pozolânica.

Pode-se considerar também, sobre o IAP, que conforme diminuiu o diâmetro médio das partículas aumentou a pozolanicidade da argamassa com CCA.

Este trabalho além de uma vasta caracterização física e química das CCA sem e com aditivo, também traz ganhos para as questões ambientais, pois além de buscar uma melhor eficiência para o processo de moagem da CCA, estudou a utilização de um outro resíduo como aditivo, evitando assim que mais um resíduo seja enviado para aterro industrial. A medida que cresce a importância da reciclagem deste co-produto, CCA da queima de casca de arroz, normas deverão ser adaptadas ou construídas no sentido de melhor caracterizá-la e padronizá-la para uso.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final do trabalho verificou-se a necessidade de alguns estudos que

poderiam complementar esta pesquisa, e contribuir para uma melhor compreensão das características da CCA. Então, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Determinar de forma quantitativa o grau de amorfismo da CCA com foco na sílica, considerando que somente o teor de sílica amorfa influencia na reatividade da cinza de casca de arroz. Considera-se assim a necessidade de técnicas complementares para atingir este objetivo como DRX com Rietveld, e a técnica do PAYA, que discute uma norma estabelecida (UNE 80225/1993).

- Verificar a utilização de outros resíduos ricos em óxidos com dureza maior que a CCA como auxiliar de moagem, no sentido de resolver o fenômeno da aglomeração, livres de contaminantes menor dureza como carbono.

- Verificar se há possibilidade de aumentar as concentrações dos aditivos utilizados nesta pesquisa para obter melhores resultados.

- Estudar e sugerir alterações no método de determinação do Índice de Atividade Pozolânica norma NBR 5752 (ABNT, 1992), para que este método se torne mais justo quando analisados materiais como a CCA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMESTO, L.; BAHILL, A; VEIJONEN, K; CABANILLAS, A; OTERO, J. Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidised Bed. *Biomass and Bioenergy*, v. 23, p. 171-179, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 120: **Materiais para Fundição – Determinação da Perda ao Fogo**. São Paulo: ABIFA, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 081: **Materiais para Fundição – Determinação da Distribuição Granulométrica**. São Paulo: ABIFA, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752. Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com o cimento –Índice de atividade pozolânica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214. Areia normal para ensaio de cimento**. Rio de Janeiro: ANBT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215. Determinação da Resistência a compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996

BARBOSA, M. B. **Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho**. 2006.147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNESP, São Paulo, SP, 2006.

BHATTACHARYA, A.K.; MANDAL, S.N.; DAS, S.K. Adsorption of Zn(II) from aqueous solution by using different adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, v.123, p. 43–51, 2006.

BREHM, F. A. **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil**. 2004. 90p.Tese (Doutorado em engenharia). UFRGS, Porto alegre, RS 2004.

BYK - ADDITIVES E INSTRUMENTS. DISPERBYK-2000 DISPERBYK-2001. **Folha Técnica W224**. 2009.

- CALLISTER, W. D.. **Materials science and engineering : an introduction**. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- CHAVES, T. F.; QUEIROZ, Z. F. de; SOUSA, D. N. R. de; GIRÃO, J. H. S.; RODRIGUES, E. de A. Uso da Cinza da Casca do Arroz (CCA) Obtida da Geração de Energia Térmica como Adsorvente de Zn(II) em Soluções Aquosas. **Revista Química Nova**. v. 32, No. 6, p.1378-1383, 2009.
- CHOI, H.; LEE, W.; KIM, S.. Effect of grinding aids on the kinetics of fine grinding energy consumed of calcite powders by a stirred ball mill. **Journal Advanced Powder Technology**. v. 101. p 31-42. 2009.
- COSTA, H. M. da; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R.; FURTADO, C. R. G.. Cinética de vulcanização de composições de borracha natural com incorporação de cinza de casca de arroz. **Polímeros**. v. 13, n.2, p. 102-106. 2003.
- DAFICO, D. de A.; PRUDÊNCIO Jr, L. R.. **Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana**. In. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais do IX ENTAC. Foz do Iguaçu, 2002.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA D.. Caracterização de Cinza de Casca de Arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de Sílica. **Revista Química Nova**. Vol. 24, No. 6, p. 778-782, 2001.
- DELLA, V. P.; HOTZA D.. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da Cinza De Casca De Arroz. **Revista Química Nova**. Vol. 29, No. 6, p. 1175-1179, 2006.
- DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**, 2ª ed. 578p. Editora Reverté S.A.. Barcelona 1982.
- FALKENSTEIN, R.. **Case Pirelli**. In. IX Conferência Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Inovadoras. Anais do IX Conferência ANPEI. Porto Alegre, 2009.
- FERNANDES, A. **Síntese de Zeólita e Wolastonita a partir de cinza de casca de arroz**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). USP, São Paulo, SP, 2006.
- FERRO, W. P.; SILVA, L. G. A.; WIEBECK, H.. Uso da cinza da casca de arroz como carga em matrizes de poliamida 6 e poliamida 6.6. **Polímeros**. v.17, No.3, p. 240-243. 2007.
- FOLETTI, L. F.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JUNIOR, U.L.; JAHN, S.L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055-1060. 2005.
- GASPAR, R. C.; CALHEIRO, D.; OLIVEIRA K. R. de; BREHM, F. A.; MORAES, C. A. M.. **Caracterização de areia de fundição via Tratamento de regeneração termo-mecânico**. In: 62º Congresso Anual da ABM. Anais do 62º Congresso Anual da ABM. p. 3713 – 3724. Vitória, 2007.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS. Porto Alegre, RS, 2001.

HUANG, S.; JING, S.; WANG, J.; WANG, Z.; JIN, Y.. Silica white obtained from rice husk in a fluidized bed. **Advanced Powder Technology**. v. 117, p.232-23. 2001.

INOUE, T.; MIYAZAKI, M.; KAMITANI, M.; KANO, J.; SAITO, F.. Dechlorination of polyvinyl chloride by its grinding with KOH and NaOH. **Advanced Powder Technology**. v. 16, No. 1, pp. 27–34. 2005.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA. **Área, Produção e Produtividade – Safra 2009/2010**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/uploads/anexos/1294330441Area_Producao_e_Produtividade.pdf>. Acesso em 31 jan. 2011.

KATSIOTI, M.; TSAKIRIDIS, P. E.; GIANNATOS, P.; TSIBOUKI, Z.; MARINOS, J.. Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance. **Construction and Building Materials**. Ed. 23; p. 1954–1959. 2009.

KIELING, A. G.. **Influência da Segregação no Desempenho de Cinzas de Casca de Arroz como Pozolanas e Material**. 2009. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2009.

KIELING, A. G.; BREHM, F. A.; MORAES, C. A. M.. Utilização de cinza de casca de arroz na remoção de cromo hexavalente. **Estudos Tecnológicos**. v. 2, p. 351-362, 2009.

KIELING, A. G.; MORAES, C. A. M.; BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.. **Influência do Processo de Combustão nas Características das Cinzas de Cascas de Arroz**. In: 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2010, Bento Gonçalves. Anais do 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. v. 1. p. 1-8. Caxias do Sul : A&S Criação, 2010.

KRUG, Francisco José; NÓBREGA, Joaquim Araújo; OLIVEIRA, Pedro Vitoriano de. Espectrometria de Absorção Atômica Parte 1. Fundamentos e atomização com chama. USP. 2004. Disponível em: <<http://web.cena.usp.br/apostilas/krug/AAS%20geral%20parte%201%20revisada.pdf>>. Acessado em setembro de 2010.

LUXÁN, M. P. Rapide evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. v.19. p. 63-68. 1989.

LUZ, Adão Benvindo. SAMPAIO, João Alves. ALMEIDA, Salvador L. M. de. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.858p.

MACHADO, J. G. M. da S.. **Estudo de caracterização e avaliação da influência do tempo na redução carbotérmica do pó de aciaria elétrica**. 2004. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

MACHADO, M. M.; ALFARO, E. de F.; FERRO, Waldir P.; SILVA, L. G. A.. **Estudo da viabilidade da substituição do talco por cinza da casca de arroz como carga em Polipropileno**. In: 9 Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais do 9 Congresso Brasileiro de Polímeros. Campina Grande, 2007.

MASUERO, A. B.. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 252f. Tese (Doutorado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre, RS, 2001.

MAHVI A.H.; ALAVI, N.; MALEKI, A.. Application of Rice Husk and its Ash in Cadmium Removal from Aqueous Solution. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. Issue: 5; Vol: 8 p. 721-725; 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MICCO, G.; NETTI, P.A.; NICOLAIS, L.; COLLINA, A.; ASTARITA, G.. A Novel approach for grinding operation scale-up. **Chemical Engineering Science**. Ed. 55; p.1347-1356. 2000.

NAIR, D. G.; JAGADISH, K.S.; FRAAIJ, A.. Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing. **Cement and Concrete Research**. vol. 36 , p. 1062–1071. 2006.

OLIVEIRA. H. J.; LABRINCHA, J. A. Esmaltes e Engobes para Monoporosa. **Cerâmica Industrial**. v. 7. p. 25 -29. 2002.

Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação – **FAO. Rice Market Monitor – April 2010**. v. XIII. Issue nº 1. 2010. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/012/al186e/al186e00.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2010.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; MELLADO, A.; ORDONEZ, L.M.. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**. v. 31. p. 227 – 231. 2001.

PEDROZO. E. C.. **Estudo da utilização de cinza de casca de arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFSM. Santa Maria, RS, 2008.

POSSA, M. V.. **A importância da reologia da polpa no beneficiamento de partículas finas por processos de ciclonagem e de Moagem**. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia - Coordenação de Tratamento de Minérios – CTM. Rio de Janeiro. 2002.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.

PRUDÊNCIO Jr., L. R. SANTOS, S.. DAFICO, D. de A.. **Cinza da casca de arroz. Coletânea Habitare**. v. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. ANTAC, Porto Alegre, RS, 2003.

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S. D.; DAL MOLIN, D. C. C.. **Adição de cinza de casca de arroz no concreto: benefícios de durabilidade**. In. VI encontro tecnológico da engenharia civil e arquitetura. Anais do VI ENTECA. Maringá, 2007.

REGO, J. H. S. **Viabilidade técnica da utilização da Cinza de Casca de Arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. 2001. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFG. Goiânia, 2001.

RIBEIRO, R. A. C.. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFPR. Curitiba. PR, 2008.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P.; MAHACHAI, R.. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**. vol. 16, p. 242. no. 2, April 2009.

RUSSEL, J. B.. **Química Geral**. 2 ed. v. 2. São Paulo: Makron Books, 1994.

SALAS, A.; DELVASTO, S.; GUTIERREZ, R. M. de; LANGE, D.. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 39. Issue: 9 p. 773-778. 2009.

SALVADOR, Vera Lúcia Ribeiro. **Introdução a Técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X**. Apostila. Shimadzu. 2007.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFSC, Florianópolis, SC, 1997.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia). UFSC, Florianópolis, SC, 2006.

SIKA. Produto SikaGrind-200. **Ficha Técnica de Produto**. 2005.

SILVA, M. G. da. **Cimentos Portland com Adições Mineraias**. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2v. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007.

SILVA, C. A. R. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. 115f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVEIRA, A. A.. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** 1996. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), UFRGS. Porto Alegre, RS, 1996.

SKOOG, WEST, HOLLER, CROUCH. **Fundamentos de Química Analítica.** Tradução da 8ª Edição norte-americana, Editora Thomson, São Paulo-SP, 2006.

SOUZA, J. de. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz.** 2008. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). UFCG, Campina Grande, 2008.

TASHIMA, M. M.. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 81f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), UNESP, São Paulo, SP 2006.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA M. B.. **Influence of Rice Husk Ash in Mechanical Characteristics of Concrete.** In. IV International ACI/CANMET Conference on quality of concrete structures and recent advances in concrete materials end testing. Anais do IV HPC. Olinda, 2005.

UMAMAHESWARAN, K.; BATRA; V. S.. Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes. **Fuel.** v. 87, Issue 6; p. 628-638. 2007.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; BARRETO, C. G. W.; CARVALHO, E. A. de; PEITER, C. C. Substituição de areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas: Teste industrial. **Revista Cerâmica.** v. 54 p. 480-486. 2008.

WELLENKAMP, F. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão.** 56p. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

APÊNDICE A – RESULTADO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

A determinação da Área Superficial Específica das CCA sem e com aditivo foi feita de acordo com os métodos especificados no item 3.4.6. Os resultados são apresentados na Tabela 21 e nas Figuras 55 e 56.

Tabela 21 - Área Superficial Específica

	Tempo de Moagem	Área Superficial Específica (m²/g)	
CCA Moída	30min	27,641	28,730
	1h	28,238	25,239
	2h	21,429	27,060
	4h	13,147	25,127
CCA Ad. Com 0,03%	30min	24,069	
	1h	24,147	
	2h	28,017	
	4h	30,109	
CCA Ad. Com 0,045%	30min	22,139	
	1h	28,008	
	2h	23,958	
	4h	26,496	
CCA Ad. Com 0,06%	30min	20,051	
	1h	19,4	
	2h	26,125	
	4h	12,728	
CCA Ad. PG 2%	30min	18,444	
	1h	25,168	
	2h	20,533	
	4h	19,966	
CCA Ad. PG 6%	30min	27,305	
	1h	24,147	
	2h	22,951	
	4h	24,064	
CCA Ad. PG 10%	30min	6,746	
	1h	11,321	
	2h	19,802	
	4h	27,056	
Resíduo PG	-	5,404	

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os resultados da tabela 21, pode-se concluir que os melhores valores de área superficial específica da CCA com relação ao uso de aditivos, foram a CCA com 0,03% de aditivo comercial e a CCA com 6% de aditivo pó de granalha. Apesar da CCA Ad. Com. 0,03% atingir maior área superficial específica, a CCA Ad. PG 6% obteve uma maior área no menor tempo de moagem, tendendo ser mais eficiente, como pode ser melhor observado nas

figuras 55 e 56.

Devido à baixa área superficial específica encontrada para CCA Moída 4h, foi realizado novo ensaio com novas amostras para todas as CCA Moídas, percebeu-se que houve alterações para todos os resultados, apontando que este ensaio possui uma variação de análise, portanto o ideal para ter valores mais precisos seria analisar no mínimo em três vias e utilizar uma média destes.

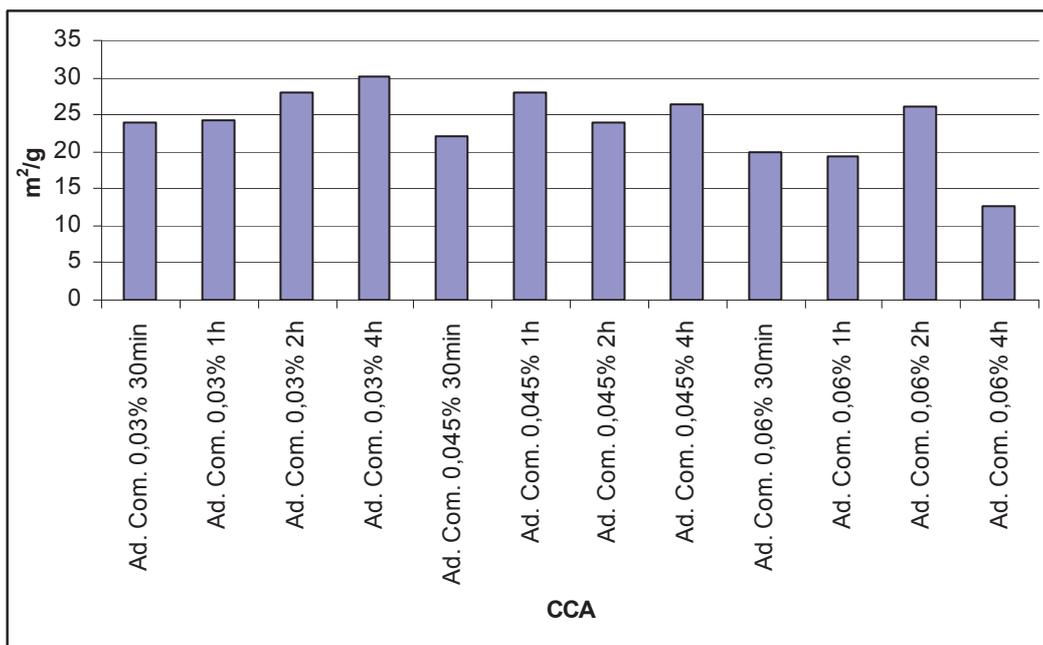


Figura 55 - Área Superficial Específica das CCA com Aditivo Comercial
Fonte: Elaborado pela autora

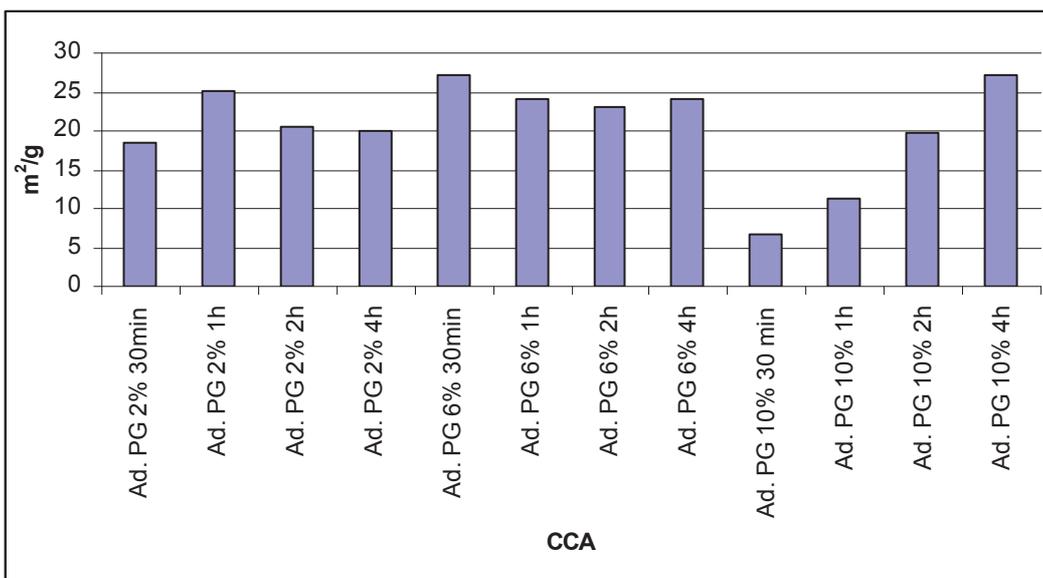


Figura 56 - Área Superficial Específica das CCA com Aditivo Resíduo PG
Fonte: Elaborado pela autora