

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**JOZILENE DE SOUZA**

**Estudo da durabilidade de argamassas utilizando  
cinzas e casca de arroz**

Campina Grande – Paraíba  
2008

**Jozilene de Souza**

**Estudo da durabilidade de argamassas utilizando  
cinzas e casca de arroz**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de concentração: *Desenvolvimento de processos.*

**Orientadores:** Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves  
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Campina Grande/PB  
2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S729e

2008 Souza, Jozilene de.

Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz / Jozilene de Souza. — Campina Grande, 2008.  
f. 160: il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Dr. Gelmires de Araújo Neves e Dr. Heber Carlos Ferreira.

1. Argamassas. 2. Resíduos Agrícolas. 3. Cinzas e Casca de Arroz. 4. Durabilidade. I. Título.

CDU 666.971(043)

**Jozilene de Souza**

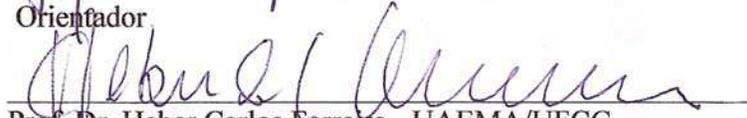
**Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**

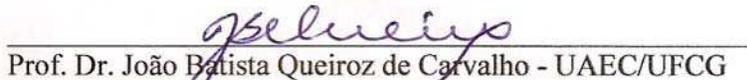
Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos.

APROVADA EM 19/12/2008.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves - UAEMA/UFCG  
Orientador

  
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira - UAEMA/UFCG  
Orientador

  
Prof. Dr. João Batista Queiroz de Carvalho - UAEC/UFCG  
Examinador Interno

  
Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento - UAEAG/UFCG  
Examinador Interno

  
Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes - UAEP/UECG  
Examinador Interno

  
Prof.ª Dr.ª Djane de Fátima Oliveira - DQ/UEPB  
Examinadora Externa

  
Prof.ª Dr.ª Neusa Maria Bezerra Mota - DEC/UnB  
Examinadora Externa

Campina Grande – PB  
Dezembro de 2008

*A um  
ser superior, soberano (DEUS) que nos conduz passo a  
passo com sabedoria e que me deu coragem para enfrentar  
tantas barreiras e estar aqui hoje apresentando este  
trabalho, fruto do meu suor e da minha dedicação e também  
a três grandes pessoas do saber: Professor Heber Carlos  
Ferreira, Professor Gelmires de Araújo Neves e Professor  
João Batista Queiroz de Carvalho. **DEDICO.***

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e por tudo que nos tem proporcionado.

A minha filha, *Thamísia de Sousa Pereira* pelos momentos roubados, pela ausência, nas horas que não pude atender prontamente suas solicitações.

A meus pais, *Jorge e Marli*, e aos meus irmãos, *Josimário, Josinaldo, Lili e Jorginho*, pelo apoio, carinho e amizade afetuosa, com os quais divido momentos inesquecíveis.

Aos meus orientadores Professores Dr. Gelmires de Araújo Neves e Dr. Heber Carlos Ferreira, pela parceria oferecida, compreensão, dedicação e por proporcionar-me a oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

Ao Professor Dr. João Batista Queiroz de Carvalho, pela atenção, compreensão e pelas conversas e conselhos, nos momentos críticos dessa jornada.

À Professora Dr<sup>a</sup> Djane de Fátima Oliveira, que me incentivou, nas horas de vacilo, de desânimo, sempre acreditando no meu trabalho, meu obrigado pela grande contribuição na formatação deste trabalho.

A ATECEL, Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior, pelo apoio técnico para obtenção dos dados, na utilização de seus equipamentos e espaço físico (laboratórios).

Aos laboratoristas, Francisco Santana, Seu Eugeniano, Joselito e a Engenheira Solange Patrício pela colaboração e apoio nos ensaios de laboratório e por compartilhar seus conhecimentos.

Aos alunos bolsistas: Isabelle, Camila, Thiago e Franklin, toda minha gratidão e carinho pela enorme ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de pós-graduação em Engenharia de Processos da UFCG, pelo profissionalismo e pela contribuição direta para a realização deste trabalho.

À Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, pelo apoio dos laboratórios, onde realizei boa parte dos ensaios deste trabalho.

Aos colegas de estudo e outros: Norma, Hely, Valmir, Walter, Geovana e Paulo, Patrícia, Renê, Sileide, Susana, Hermes, Frank Neto, Fábio, pelo coleguismo, atenção e apoio.

A Romualdo e Heber Júnior, meu agradecimento pelas dúvidas tiradas.

Ao CEFET – RR, pela minha liberação para que eu pudesse estar aqui fazendo esta tese.  
*A todos os citados o meu muito obrigado.*

## PUBLICAÇÕES

Souza, J.; Bezerra, I. M. T.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C. – **Avaliação do desempenho de argamassas com substituições de sílica ativa e metacaulim quando submetidas a processo de cura em meio ácido.** Evento: IV Semana Científico-Pedagógica e Tecnológica do CCT (IVSCPT)/UEPB. Campina Grande/PB. Abril de 2006.

J. Souza (1); G. R. Meira (2); E. O. Villar. – **Comportamento de argamassas com adições pozolânicas submetidas a ataque ácido.** Evento: IX Congreso Latinoamericano de Patología y XI Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Quito/Ecuador. Setembro de 2006. [www.conpat2006.com](http://www.conpat2006.com).

Souza, J.; Bezerra, I. M. T.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Carvalho, J. B. Q.; Souza, A. J. D. e Oliveira, N. M. S. – **Comportamento mecânico de argamassas com substituição do agregado miúdo por casca de arroz.** Evento: 1º SINRES, -1º Simpósio Nordeste sobre Resíduos Sólidos – Gestão e Tecnologia de Reciclagens. Campina Grande/PB-DEMA/CCT/UFCG. Abril de 2007. <http://www.dema.ufcg.edu.br/>.

Souza, J.; Bezerra, I. M. T.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Carvalho, J. B. Q.; Souza, A. J. D. e Oliveira, N. M. S. – **Avaliação de Argamassas com Cinza e Casca de Arroz.** Evento: 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador/BA – ABCERAM. Junho de 2007. [http://www.abceram.org.br/asp/51cbc/51cbc\\_int\\_01txt.asp](http://www.abceram.org.br/asp/51cbc/51cbc_int_01txt.asp).

Souza, J.; Meira, G. R.; Carvalho, J. B. Q.; Bezerra, I. M. B. – **Avaliação de argamassas com substituições de cimento Portland ARI por 10% de sílica ativa e 10% de metacaulim quando expostas ao meio ácido.** Evento: 49º Congresso Brasileiro de Concreto/IBRACON. Bento Gonçalves/RS. Setembro de 2007. [http://ibracon1.locaweb.com.br/eventos/49cbc/resumo\\_novo.asp](http://ibracon1.locaweb.com.br/eventos/49cbc/resumo_novo.asp).

Souza, J.; Bezerra, I. M. T.; Neves, G. A.; Carvalho, J. B. Q.; Ferreira, H. C.; Sá Pinto, T. S. - **Influência da cinza e casca de arroz no comportamento mecânico de blocos de concreto sem função estrutural.** Evento: 52º Congresso Brasileiro de Cerâmica/ ABCERAM. Florianópolis/SC. Junho de 2008. [http://www.abceram.org.br/asp/52cbc/52cbc\\_int\\_01txt.asp](http://www.abceram.org.br/asp/52cbc/52cbc_int_01txt.asp).

Souza, J.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Lira, H. L.; Bezerra, Nóbrega, F. F. – **Aplicação de resíduos agrícolas em blocos de concreto para construção civil sem função estrutural.** II Mostra Científica da ANPG/XXI Congresso da Associação Nacional de Pós-Graduandos Campina/SP. Julho de 2008. [www.anpg.ogr.br/revista](http://www.anpg.ogr.br/revista).

Souza, J.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Lira, H. L.; Bezerra, I. M. T.; Carvalho, J. B. Q. **The effect of ash from rice husks on the mechanical Behavior of concrete blocks without structural Application.** Presented at CIGR- International Conference of Agricultural Engineering – XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola/ CONBEA 2008. Brazil. August 31 to September 4, 2008. [www.acquacon.com.br/icae](http://www.acquacon.com.br/icae).

## RESUMO

O Brasil está, atualmente, entre os maiores produtores de grãos do mundo, em especial o arroz. Com o beneficiamento deste produto são geradas grandes quantidades de resíduos (casca) que ocasionam problemas ambientais, pela deposição inadequada no meio ambiente e por seu longo tempo de degradação. A incorporação destes resíduos industriais a componentes para construção civil, como concretos e argamassas, é uma das possíveis soluções para o aproveitamento de subprodutos poluentes estando em acordo com os princípios da sustentabilidade. Este trabalho tem como objetivo estudar a durabilidade de argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduos de cinza da casca de arroz substituindo parte do aglomerante e casca de arroz substituindo o agregado miúdo, através do envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem. Inicialmente foi realizada com as matérias-primas convencionais e alternativas uma caracterização física, química e mineralógica através dos seguintes ensaios: análise granulométrica por peneiramento e difratometria a laser, área específica, massa unitária, análise química, difração de raios X, análise térmica diferencial e gravimétrica. Para avaliar a durabilidade pelo método do envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem, foram confeccionados corpos-de-prova de argamassas convencionais e argamassas alternativas nos traços 1:4; 1:6 e 1:8 incorporando 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de resíduo de cinza de casca de arroz em substituição ao aglomerante e 10%, 20% e 30% de casca de arroz em substituição ao agregado miúdo por períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias. As propriedades físico-mecânicas determinadas foram: absorção de água, densidade aparente e resistência. Os resultados dos ensaios de caracterização das matérias-primas convencionais (cimento e agregado miúdo) e alternativos (cinza e casca de arroz) encontram-se dentro dos padrões estabelecidos pelas normas da ABNT, indicando superfície específica e índice de finura da cinza de casca de arroz bem superior a do cimento empregado. Os resultados evidenciaram que a cinza de casca de arroz é predominantemente amorfa e tem alta pozolanicidade de acordo com as especificações da ABNT, possibilitando seu uso em concretos e argamassas pelas suas características de grande finura. Em relação ao comportamento mecânico, foram encontrados valores superiores dos corpos-de-prova alternativos incorporados com cinza de casca de arroz em relação aos convencionais mesmo quando expostos ao envelhecimento acelerado, enquanto os corpos-de-prova das argamassas incorporados com casca de arroz apresentaram valores dentro das especificações da ABNT e inferiores aos convencionais, comprovando a viabilidade técnica da utilização destes resíduos, uma vez que não se evidenciou influência na durabilidade, além de ser uma medida ecologicamente correta.

Palavras-chave: Argamassas, resíduos agrícolas, cinza e casca de arroz, durabilidade.

## **ABSTRACT**

Brazil is one of the greatest producers of grain in the world, especially in rice. With the industrialization of this product great amount of waste (husk) is generate and cause environmental problems, by the inadequate discharge in the environment and by the long time to deteriorate. The incorporation of this industrial residue as components to civil construction, as concrete and mortars, is one of the possible solutions to use this pollutants sub products and this is in agreement with the sustainable principle. The aim of this work is to study the durability of the conventional and alternative mortars incorporated with husk rice ash residue by substituting part of the agglomerate and rice husk substituting small aggregate. The durability was study by the accelerate weathering (by wetting and drying cycles). Firstly it was done a physical, chemical and mineralogical characterization of the conventional and alternatives raw materials by the following techniques: particle size by sieving and laser diffraction, surface area, specific mass, chemical analysis, X-rays diffraction, differential thermal analysis and gravimetry. The pozzolanic activity was measured according to the BNT NBR 12653(1997) norm. To evaluate the durability by the accelerate weathering (wetting and drying cycles) it was made body sample with conventional and alternative mortars with traces of 1:4; 1:6 e 1:8 incorporated with 3%, 6%, 9%, 15%, 20% and 30% of ash rice husk residue in substitution of agglomerate and 10%, 20% and 30% of rice husk in substitution to small aggregate, for cure period of 28, 63, 91, 180 and 360 days. The physical and mechanical properties were: water absorption, apparent density, mechanical resistance and mass loss. The results of the conventional (cement and small aggregate) and alternative (ash and husk rice) raw materials characterization are in the standard values established by ABNT norms, indicating surface area and amount of fine particles of the husk rice ash are superior to the cement used. The results put in evidence that the husk rice ash is predominantly amorphous and has high pozzolanicity according to the specifications of the ABNT. This makes possible the use of this ash in concrete and mortars due to the great amount of fine particles. In relation to the mechanical properties, the results shown values superior to the body samples incorporated with husk rice in relation to the conventional even when exposed to the accelerate weathering. To the body samples incorporated with husk rice presented values according to the ABNT specifications and inferior to the conventional ones. It was concluded that the use of these residues are technical viable once did not present influence in the durability and also is an ecological correct action.

Keywords: ash and husk of rice, additions minerals, agricultural waste, mortars and durability.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo geral.....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
1.2 MOTIVAÇÃO DA PESAQUISA.....	21
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>23</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1 MEIO AMBIENTE.....	23
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS .....	25
2.2.1 Reaproveitamento de resíduos .....	27
2.2.2 Materiais alternativos já empregados na construção civil.....	29
2.3 POZOLANA.....	30
2.3.1 Reação pozolânica .....	33
2.4 SÍLICA ATIVA.....	34
2.5 CULTURA DO ARROZ .....	36
2.5.1 Casca de arroz e cinzas da casca de arroz.....	38
2.5.1.1 Casca de arroz (CA).....	39
2.5.1.2 Cinzas de casca de arroz.....	42
2.5.1.3 Influência da queima (temperatura).....	46
2.5.1.4 Influência da moagem .....	49
2.6 POTENCIAL ECONÔMICO.....	50
2.7 CIMENTO PORTLAND .....	51
2.8 ARGAMASSAS .....	53
2.8.1 Tipos de argamassas.....	54
2.8.2 Aplicação da cinza e da casca de arroz em argamassas.....	54
2.9 ESTUDO DA DURABILIDADE.....	55
2.9.1 Envelhecimento acelerado (ciclos de molhagem e secagem).....	59
2.10 CONSIDERAÇÕES .....	61
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>63</b>
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>63</b>
3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	63
3.1.1 Variáveis.....	63
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	65
3.3 METODOLOGIA.....	65
3.3.1 Produção da cinza de casca de arroz.....	67
3.3.2 Estudo da atividade pozolânica.....	67
3.3.3 Caracterização física .....	68
3.3.4 Caracterização mineralógica.....	68

3.3.4.1 <i>Análise química</i> .....	68
3.3.4.2 <i>Difração de raios X</i> .....	68
3.3.4.3 <i>Análise térmica</i> .....	68
3.3.4.4 <i>Granulometria a laser</i> .....	69
<b>3.3.5 Estudo do teor de absorção de água da casca de arroz</b> .....	<b>69</b>
<b>3.3.6 Ensaios Tecnológicos</b> .....	<b>70</b>
3.3.6.1 <i>Estudo da relação água-aglomerante (<math>f_{ag}</math>)</i> .....	71
3.3.6.2 <i>Preparação das argamassas</i> .....	72
3.3.6.3 <i>Moldagem dos corpos-de-prova de argamassa</i> .....	73
3.3.6.4 <i>Ensaio de absorção de água por imersão (ABS)</i> .....	74
3.3.6.5 <i>Avaliação de densidade aparente (DAP)</i> .....	74
3.3.6.6 <i>Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)</i> .....	74
3.3.6.7 <i>Avaliação do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem</i> .....	74
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>76</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>76</b>
4.1 <b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b> .....	76
4.1.1 <b>Matérias primas convencionais</b> .....	76
4.1.2 <b>Matérias primas alternativas</b> .....	81
4.1.3 <b>Conclusões parciais</b> .....	86
4.2 <b>ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CCA</b> .....	87
4.3 <b>ESTUDO DA RELAÇÃO ÁGUA–AGLOMERANTE DAS ARGAMASSAS</b> .....	88
4.4 <b>ENVELHECIMENTO EM CÂMARA ÚMIDA</b> .....	90
4.4.2 <i>Estudo das argamassas com casca de arroz (CA)</i> .....	101
4.5 <b>AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO</b> .....	110
<b>4.5.1 Estudo das argamassas com cinza de casca de arroz (CCA)</b> .....	<b>110</b>
4.5.1.1 <i>Difração de raios X (DRX) – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	110
4.5.1.2 <i>Análise térmica diferencial (DTA) – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	116
4.5.1.3 <i>Absorção de água, traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	122
4.5.1.4 <i>Ensaio da densidade aparente (DAP), traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	125
4.5.1.5 <i>Ensaio de resistência à compressão simples (RCS), traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	126
<b>4.5.2 Estudo das argamassas com casca de arroz (CA)</b> .....	<b>132</b>
4.5.2.1 <i>Difração de raios X (DRX) – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	132
4.5.2.2 <i>Análise termo diferencial (DTA) – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	136
4.5.2.3 <i>Absorção de água – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	140
4.5.2.4 <i>Ensaio da densidade aparente (DAP) – traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	142
4.5.2.5 <i>Ensaio de resistência à compressão simples (RCS), traços 1:4; 1:6 e 1:8</i> .....	143
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>145</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>145</b>
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>148</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS CONSULTADAS</b> .....	<b>149</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coliseu (a) e o Panteão (b), 117 a 138 d.C.....	32
Figura 2.2 – Distribuição percentual da produção de arroz (em casca) por regiões brasileiras no ano de 2004, com destaque para os cinco principais estados produtores.....	38
Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz, queimada a 560°C.....	40
Figura 2.4 – Benefícios obtidos com o aproveitamento da casca de arroz como biomassa e utilização das cinzas como adição mineral para a produção de concreto.....	42
Figura 2.5 – Fluxograma de aplicação de cinza de CCA a partir do beneficiamento do arroz.....	43
Figura 2.6 – Etapas do processo de fabricação de sílica.....	47
Figura 2.7 – Período efetivo de contribuição na resistência.....	48
Figura 2.8 – Valores de superfície específica (B.E.T.) das amostras de cinza.....	48
Figura 2.9 – MEV com o tamanho e formato das partículas de CCA depois da moagem.....	49
Figura 3.1 – Fluxograma das variáveis em estudo.....	64
Figura 3.2 – Fluxograma para o desenvolvimento deste trabalho.....	66
Figura 3.3 – Fluxograma da decomposição dos traços utilizados.....	72
Figura 3.4 – Cronograma dos ciclos de molhagem e secagem.....	75
Figura 3.5 – Processo do envelhecimento acelerado – estufa.....	75
Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica por difratometria a laser do CP.....	77
Figura 4.2 – Difração de raios X do cimento Portland.....	79
Figura 4.3 – Análise térmica diferencial do cimento Portland comum.....	79
Figura 4.4 – Curva granulométrica da areia utilizada.....	81
Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA.....	82
Figura 4.6 – Difração de raios X da cinza de casca de arroz.....	84
Figura 4.7 – Análise térmica diferencial da cinza de casca de arroz (CCA).....	85
Figura 4.8 – Casca de arroz no estado natural (a) e no estado úmido (b).....	86
Figura 4.9 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.....	90
Figura 4.10 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.....	91
Figura 4.11 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.....	92
Figura 4.12 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.....	94
Figura 4.13 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.....	94

Figura 4.14 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.....	95
Figura 4.15 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.....	95
Figura 4.16 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.....	96
Figura 4.17 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.....	96
Figura 4.18 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.....	97
Figura 4.19 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.....	99
Figura 4.20 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.....	100
Figura 4.21 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.....	101
Figura 4.22 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.....	102
Figura 4.23 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.....	105
Figura 4.24 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.....	105
Figura 4.25 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 28 dias.....	105
Figura 4.26 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 360 dias.....	105
Figura 4.27 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 28 dias.....	106
Figura 4.28 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 360 dias..	106
Figura 4.29 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.....	107
Figura 4.30 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.....	108
Figura 4.31 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.....	109
Figura 4.32 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4; 1:6 e 1:8.....	109

Figura 4.33 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.....	111
Figura 4.34 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 91 dias.....	111
Figura 4.35 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 180 dias.....	112
Figura 4.36 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.....	112
Figura 4.37 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.....	113
Figura 4.38 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 91 dias.....	113
Figura 4.39 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 180 dias.....	114
Figura 4.40 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.....	114
Figura 4.41 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.....	115
Figura 4.42 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 91 dias.....	115
Figura 4.43 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 180 dias.....	116
Figura 4.44 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.....	116
Figura 4.45 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.....	117
Figura 4.46 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 91 dias.....	117
Figura 4.47 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 180 dias.....	118
Figura 4.48 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.....	118
Figura 4.49 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.....	119
Figura 4.50 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 91 dias.....	119
Figura 4.51 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 180 dias.....	120
Figura 4.52 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.....	120

Figura 4.53 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.....	121
Figura 4.54 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 91 dias.....	121
Figura 4.55 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 180 dias.....	121
Figura 4.56 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.....	121
Figura 4.57 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.....	122
Figura 4.58 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.....	123
Figura 4.59 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.....	124
Figura 4.60 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.....	127
Figura 4.61 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.....	129
Figura 4.62 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.....	131
Figura 4.63 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.....	133
Figura 4.64 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 91 dias.....	133
Figura 4.65 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 180 dias.....	133
Figura 4.66 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.....	133
Figura 4.67 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 28 dias.....	134
Figura 4.68 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 91 dias.....	134
Figura 4.69 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 180 dias.....	134
Figura 4.70 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 360 dias.....	134
Figura 4.71 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 28 dias.....	135
Figura 4.72 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 91 dias.....	135

Figura 4.73 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 180 dias.....	135
Figura 4.74 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 360 dias.....	135
Figura 4.75 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.....	137
Figura 4.76 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 91 dias.....	137
Figura 4.77 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 180 dias.....	137
Figura 4.78 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.....	137
Figura 4.79 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 28 dias.....	138
Figura 4.80 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 91 dias.....	138
Figura 4.81 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 180 dias.....	138
Figura 4.82 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 360 dias.....	138
Figura 4.83 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 28 dias.....	139
Figura 4.84 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 91 dias.....	139
Figura 4.85 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 180 dias.....	139
Figura 4.86 – Curvas DTA dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 360 dias.....	139
Figura 4.87 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.	140
Figura 4.88 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas alternativas incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.....	141
Figura 4.89 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.....	143

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 – Composição química elementar de amostras de casca de arroz.....	39
Tabela 2.2 – Quantidade de cinzas gerada por resíduo agrícola.....	41
Tabela 2.3 – Influência do tempo de moagem na superfície específica e pozolanicidade da CCA.....	50
Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados nesta pesquisa.....	70
Tabela 3.2 – Estudo do fator água-aglomerante. $f_{ac}$ .....	71
Tabela 3.3 – Dosagens empregadas na moldagem das argamassas.....	73
Tabela 4.1 – Resultados das propriedades físico-mecânicas do cimento.....	76
Tabela 4.2 – Composição química do cimento Portland CII-F 32.....	78
Tabela 4.3 – Ensaios para caracterização do agregado miúdo (AM).....	80
Tabela 4.4 – Resultados das propriedades físicas da cinza de casca de arroz.....	81
Tabela 4.5 – Composição química da cinza de casca de arroz (CCA).....	83
Tabela 4.6 – Caracterização da casca de arroz (CA).....	85
Tabela 4.7 – Absorção por imersão em água da casca de arroz (CA).....	86
Tabela 4.8 – Exigências químicas para o índice de atividade pozolânica.....	87
Tabela 4.9 – Exigências físicas para o índice de atividade pozolânica.....	88
Tabela 4.10 – Estudo do fator água-aglomerante para as argamassas convencionais e alternativas, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, incorporadas com cinza de casca de arroz (CCA).....	88
Tabela 4.11 – Estudo do fator água-aglomerante para as argamassas convencionais e alternativas, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, incorporadas com resíduo de casca de arroz (CA).....	89
Tabela 4.12 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28 e 360 dias.....	93
Tabela 4.13 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28 e 360 dias.....	106
Tabela 4.14 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28 e 360 dias.....	126
Tabela 4.15 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28 e 360 dias.....	142
Quadro 1 – Parâmetros a serem identificados nos resíduos.....	28
Quadro 2 – Tipos de cimentos Portland comercializados no Brasil.....	53
Quadro 3 – Fatores de degradação.....	58

## ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABS – teor de absorção de água  
ACI – American Concrete Institute  
 $Al_2O_3$  – óxido de alumínio  
AM – Agregado miúdo  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
At – aluminato tricálcico –  $C_3A$   
B – belita ( $C_2S$ )  
BTUs – British Temperatura Unity (Unidade Inglesa de Temperatura)  
 $CaCO_3$  – calcita  
C – cimento  
 $C_2S$  – silicato dicálcico ou belita  
 $C_3A$  – aluminato tricálcico  
 $C_3S$  – silicato tricálcico ou alita  
 $C_4AF$  – ferroaluminato tetracálcico ou ferrita  
 $Ca(OH)_2$  – hidróxido de cálcio ou portlandita  
CA – casca de arroz  
CCA – cinza de casca de arroz  
CMU – cura em meio úmido  
 $CO_2$  – dióxido de carbono  
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
CSH – silicato de cálcio hidratado  
D<sub>ap</sub> – densidade aparente  
DR<sub>x</sub> – difração de raios X  
DTA – análise térmica diferencial  
E – etringita  
EA – envelhecimento acelerado  
EVA – etileno vinil acetato  
fa/ag – relação água-aglomerante  
FAO – Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para a Agricultura)  
FATMA – Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina  
 $H_2SO_4$  – ácido sulfúrico  
HCL – ácido clorídrico  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ISO – International Organization for Standardization  
ONGs – Organizações não Governamentais  
PAP – fosfato de potássio e amônia  
PETs – politereftalato de etila  
Q – quartzo ( $SiO_2$ )  
QCT – quick condensation test  
RCS – resistência à compressão simples  
S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H)  
T – Tobermonita  
TG – termogravimetria

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

As exigências da norma e a busca por soluções ambientalmente corretas incentivaram a utilização das adições minerais na produção de compósitos à base de cimento. Além das adições minerais reduzirem o custo final da estrutura e melhorarem a resistência mecânica e durabilidade dos compósitos nos quais elas são utilizadas, também podem minimizar problemas ambientais com a incorporação de resíduos industriais poluentes na massa dos compósitos.

Sendo assim, um dos grandes desafios mundiais para o século XXI é a eliminação de resíduos provenientes de qualquer tipo de industrialização. Pesquisas sobre reciclagem de resíduos vêm sendo desenvolvidas no mundo, com grande intensidade desde a década de 50. Segundo Jonh (2000), as razões que motivam esses estudos, em geral, são: esgotamento das matérias-primas não renováveis, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes, redução de custos, melhoria na saúde e segurança da população.

A reciclagem de resíduos é uma das maneiras de diversificar a oferta de matéria- prima para a utilização como materiais de construção, viabilizando reduções de preço. Assim, a reciclagem de resíduos como entulho, resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos de mineração, entre outros, contribuem para a preservação ambiental (LIMA, 2005).

O uso de resíduos, para componentes da construção civil, tem sido um dos temas mais trabalhados e debatidos por pesquisadores nos últimos tempos. Com a possibilidade de se conquistar uma melhor colocação para o setor a partir da adoção e do emprego destes resíduos em traços de concreto e/ou argamassas, pesquisadores vem buscando conscientizar ceramistas, construtores, engenheiros e o próprio mercado consumidor quanto à importância da qualidade deste produto para as habitações, (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al, 2003).

A agroindústria gera, anualmente, uma enorme quantidade de produtos de consumo alimentício. Dentre estes produtos destacam-se os cereais, tais como arroz, trigo, soja e milho que representam as maiores colheitas. Durante o seu processamento esses cereais geram resíduos. Segundo Freire e Beraldo (2005) o arroz está entre os grãos mais produzidos no mundo. A produção mundial de arroz em casca para a safra 2008 está prevista para um record de 666 milhões de toneladas (FAO, 2008). A produção brasileira em 2007 foi de 11.315.900 toneladas, ocupando com isto o 9º lugar na produção mundial (CONAB, 2008). Após o beneficiamento do arroz é gerado um resíduo: a casca de arroz, (LEIRIAS et al, 2005). Uma grande quantidade

desta casca é reaproveitada dentro da própria usina de beneficiamento do arroz, onde a partir da combustão é gerado calor para a parboilização dos grãos. Como resíduo desta combustão é produzida a cinza de casca do arroz.

O Brasil, devido à sua grande extensão territorial e clima favorável, têm forte vocação agrícola e o consumo dessa produção leva ao acúmulo de grande quantidade de resíduos, que são normalmente descartados sem nenhuma preocupação tanto quanto ao seu possível aproveitamento industrial, quanto aos danos ao meio ambiente.

A casca de arroz, de acordo com normas da ABNT, NBR 10004 (2004), é denominada como um resíduo de classe IIa, ou seja, não inerte e não perigoso à saúde humana e ao meio ambiente. O problema é que, quando incinerada em ambiente fechado (caldeiras e fornos, por exemplo), resulta em cinzas que são altamente poluentes, pois esta queima libera CO e CO<sub>2</sub>, gases prejudiciais ao aquecimento global. Outro destino comum da casca é o descarte em lavouras e fundos de rios, liberando, ao se decompor, gás metano - também prejudicial à camada de ozônio, sendo 50% mais nocivo que o CO<sub>2</sub>, (VISCONTE, 2003).

A cinza da casca de arroz, que já é empregada em pesquisas da área de construção civil, como em concretos, tem desempenho comparável com o da sílica ativa, componente comercial necessário na produção de concretos de alto desempenho, usado em lajes, vigas e pilares, porém para esta finalidade é necessário retirar o excesso de carvão que fica na cinza, para torná-la mais pura (mais clara), o que pode tornar o processo oneroso, mesmo tendo a vantagem de substituir em até 40% o volume de cimento utilizado no concreto (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al, 2002).

Então, diante da grande geração de casca de arroz e conseqüentemente das cinzas de casca de arroz, muitos trabalhos são desenvolvidos com o intuito de utilizar, este e outros resíduos, em diversos setores industriais e, no caso deste trabalho, em traços de argamassas para uso na construção civil.

Baseado na potencialidade da industrialização do arroz no Brasil observa-se a necessidade de estudos que permitam o aproveitamento racional do resíduo, para uso como material de construção. Portanto, faz parte deste trabalho avaliar a potencialidade do uso de cinzas e casca de arroz, uma vez que o Brasil é o 9º produtor mundial, segundo dados do CONAB (2008) e IBGE (2005), na confecção de traços de argamassas, como substituição em parte do traço, do aglomerante por cinza de casca de arroz e do agregado miúdo por casca de arroz e avaliar a durabilidade deste produto, observando as propriedades de resistência à compressão simples, absorção de água e densidade aparente, quando expostos a processos de envelhecimento

acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem, comparando os resultados com os da cura em câmara úmida.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar a influência da cinza de casca de arroz e casca de arroz na durabilidade das argamassas incorporadas com percentuais de substituição do aglomerante e do agregado miúdo, em traços distintos, quando submetidas ao envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, tendo como parâmetros de avaliação: absorção por imersão em água, densidade aparente e resistência à compressão simples, curadas por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, comparando estes resultados aos dos corpos-de-prova de argamassas expostas às condições de cura em câmara úmida.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar as matérias-primas convencionais (cimento e agregado miúdo) e as alternativas (resíduos: cinzas e casca de arroz).
- 2) Estudar a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz.
- 3) Determinar o fator água-aglomerante ( $f_{ag}$ ) das argamassas com e sem adições de cinza de casca de arroz e casca de arroz, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, tendo como parâmetro a resistência à compressão simples.
- 4) Estudar o comportamento mecânico de argamassas convencionais, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, como referência, e os mesmos traços com incorporação da cinza de casca de arroz em substituição ao aglomerante nos percentuais de 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% e da casca de arroz em substituição ao agregado miúdo, nos percentuais de 10%, 20% e 30% com a finalidade de avaliar e comparar as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova das argamassas convencionais com as argamassas alternativas.
- 5) Estudar a durabilidade, através do envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem, dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas e comparar os resultados dos parâmetros analisados com os corpos-de-prova das argamassas convencionais (como referência) curados em câmara úmida.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A sociedade moderna torna-se cada vez mais exigente com relação aos materiais de construção disponíveis no mercado. Uma das razões é o crescente desenvolvimento de novas tecnologias. A escolha de um material deixou de levar em conta apenas o custo inicial. Atualmente, fatores como a durabilidade, consumo energético e a interação com o meio ambiente também devem ser levados em conta, até por que eles influenciam diretamente no custo total do produto final. Mehta (1992) apud Tiboni (2007, declarou que a escolha dos materiais no futuro deveria atender ao quádruplo enfoque iniciado pela letra “E”: Engenharia, Economia, Energia e Ecologia.

Com a reciclagem dos resíduos, de uma maneira geral, têm-se os seguintes benefícios: eliminação das despesas com descartes, eliminação dos pontos de deposição (foco de problemas), melhoria das condições visuais ao redor das cidades produtoras, redução da exploração de agregados naturais – com preservação das áreas de solos com potencial produtivo, instalação de nova atividade produtiva – geração de empregos, mudança cultural na cidade e região com valorização das atividades sustentáveis e fontes de novos recursos para as indústrias (OLIVEIRA et al, 2001).

Quanto à utilização de resíduos agrícolas no processo de reciclagem e confecção de materiais para a construção civil, podem-se listar alguns itens que justificam o desenvolvimento deste trabalho.

- 1) A produção mundial de arroz, hoje, é superior a 600 milhões de toneladas. Os maiores produtores mundiais de arroz são China com 33%, Índia com 22% e Paquistão com 7% e o Brasil encontra-se em 9ª colocação na produção mundial de arroz.
- 2) Com, aproximadamente, 12 milhões de toneladas de arroz em casca (CONAB, 2008) o Brasil tem uma cultura arrozeira que visa o abastecimento do mercado interno e, em alguns anos, quando ocorre boa distribuição das chuvas, acontecem pequenas exportações, principalmente pelo Estado do Rio Grande do Sul que juntamente com os Estados de Mato Grosso e Minas Gerais são os maiores produtores deste grão.
- 3) Em pesquisa do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica (USP) listou-se cerca de 500 resíduos que podem ser transformados em material de construção e que são viáveis economicamente, dentre eles os resíduos agrícolas.

- 4) Pelo lado ambiental, sabe-se que, anualmente, 100% do resíduo que é produzido no país vira lixo que, geralmente, não têm um destino definido.
- 5) Pesquisas realizadas por Prudêncio Júnior et al (2002), utilizando uma mistura de cinzas de carvão mineral ou cinzas de cascas de arroz em argamassa e concretos, na fabricação de blocos pré-moldados, concluíram que se podem reduzir, em cerca de 30%, os custos com material, na construção de casas populares.
- 6) Contribuir para a redução do volume de desperdício de matéria-prima através da reciclagem de resíduos agrícolas, colaborando com a preservação dos recursos naturais e, conseqüentemente, amenizar o impacto ambiental ocasionado pela deposição irracional destes resíduos.
- 7) Diante do exposto, considerando-se a grande disponibilidade da casca de arroz e, conseqüentemente, da cinza de casca de arroz no território nacional, justifica-se o presente estudo, ou seja, verificar a adequação do uso desses resíduos como constituintes nos traços para fabricação de argamassas para construção civil.

Desta forma, os benefícios da incorporação da cinza de casca de arroz, em substituindo a percentuais do cimento na produção de concreto e/ou argamassas, pode trazer múltiplos benefícios em diferentes frentes, como segue:

- evita o lançamento clandestino no meio ambiente, reduzindo a poluição do solo e dos cursos d'água;
- reduz o consumo de cimento em concretos e argamassas: diminui a extração da matéria-prima para produção do clínquer;
- reduz a emissão de CO<sub>2</sub> e outros gases na atmosfera que causam o efeito estufa;
- produz concretos e argamassas de maior durabilidade: aumentando a vida útil das estruturas, diminuindo os impactos ambientais e econômicos pela menor necessidade de manutenção e reconstrução das obras de engenharia.

Todos estes benefícios, somados à possibilidade de uso da casca de arroz como biomassa para a produção de energia renovável, dão ainda mais sentido as observações de Mehta e Aitcin (1990), quando dizem que “nenhum concreto deveria ser feito sem adições minerais”, e de Prudêncio Júnior et al (2003), quando relatam que “o não aproveitamento da cinza de casca de arroz não pode mais ser aceito pela sociedade”.

## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 MEIO AMBIENTE

Entende-se por impacto ambiental, uma alteração na qualidade do meio ambiente resultante da modificação de processos naturais ou sociais provocada pela ação humana, ou ainda, como uma alteração na qualidade ambiental em consequência dos efeitos ambientais induzidos através de ações do homem, por exemplo, alteração na qualidade do ar ou das águas (ARAÚJO, 1995 apud NEVES, 2002).

Segundo a resolução do CONAMA (1986) o impacto ambiental pode ser definido como sendo qualquer alteração das características físicas, químicas e/ou naturais do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que direta ou indiretamente afetam:

- a) a saúde, segurança e o bem estar;
- b) atividades sociais e econômicas;
- c) o conjunto de plantas e animais de uma determinada área;
- d) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- e) a qualidade dos recursos naturais.

Desta forma, todo e qualquer efeito que degrada o meio ambiente, decorrente ou não de um processo industrial deve ser considerado, bem como quaisquer alterações que esses processos de degradação possam causar ao meio ambiente, incluindo efeitos sobre a saúde, condições sócio-econômicas, patrimoniais, culturais e físicos (FELLENBERG, 1980 apud ARAÚJO, 2002).

Segundo o “United Nations Environment Programme” (1999) a população mundial, que era um pouco mais de 2,5 bilhões em 1950, cresceu para quase 6 bilhões em 1999 e a economia mundial também cresceu cerca de cinco vezes nesse mesmo período, contudo a quantidade de recursos naturais é limitada e a natureza não tem grande capacidade de absorver as mais variadas quantidades de resíduos ilimitadamente, portanto fazem-se necessárias medidas preventivas e imediatas para minimizar os problemas ambientais, sendo a reciclagem, uma das principais medidas, (LIDDLE, 1994, apud JONH, 2000),

Com o advento da Revolução Industrial, a capacidade humana de intervir na natureza deu um salto gigantesco e continua a aumentar sem cessar, causando grandes danos ambientais. Entretanto, o constante desenvolvimento da tecnologia oferece aos homens meios para controlar

esses danos. Mas, mesmo que todas as atividades produtivas humanas respeitassem princípios ecológicos básicos, sua expansão não pode ultrapassar os limites ambientais globais que definem a “capacidade de suporte” (carrying capacity) da Terra, sem que ocorram grandes catástrofes ambientais. Como não é conhecida a capacidade de suporte, e é muito difícil determiná-la com precisão, é necessário adotar uma postura preventiva que implica em agir sem esperar que ocorra o desastre ambiental. Com isso o impacto ambiental gerado com a intervenção do homem na natureza, provavelmente causará menos danos (LIMA, 2005).

Sendo a construção civil um dos ramos da atividade tecnológica que tem o maior consumo (volume) de recursos naturais, parece ser o mais indicado a absorver boa parte dos resíduos sólidos, tanto o gerado pela própria construção civil (entulho), como os provenientes de outras atividades. Sob este ponto de vista e associando-se a ele a necessidade de atender às exigências de manejo e do gerenciamento adequado dos resíduos sólidos, gerados pelas mais diversas atividades industriais e agrícolas, que vêm sendo impostas, principalmente nas últimas décadas, pelas leis ambientais, pelos movimentos ecológicos em todo o mundo, e pelas tarifas ambientais que vêm substituindo as convencionais, o setor da construção civil precisa de gerenciamento da extração dos recursos naturais e maior conscientização da responsabilidade de se fazer um trabalho em longo prazo, com respeito ao meio ambiente e a comunidade.

O desenvolvimento harmônico e sustentável é aquele em que se busca, necessariamente, respeitar o meio ambiente, a partir do uso equilibrado dos recursos naturais – com a necessária economia daqueles não renováveis – propiciando o desenvolvimento de tecnologias que permitam reciclar, cada vez mais, os materiais utilizados na produção de bens de consumo (CHIAVERINI, 1994).

Portanto, o desenvolvimento sustentável implica em uma redução no uso de matérias primas naturais, como também uma mudança em direção a padrões de consumo que não impliquem o crescimento contínuo e ilimitado do uso de recursos naturais per capita. O fechamento do ciclo produtivo, gerando novos produtos, a partir da reciclagem de resíduos, é uma alternativa. Para tanto, a inovação tecnológica para reciclagens eficientes e seguras, que resultem em produtos com qualidades técnicas adequadas e sejam competitivos nos diferentes mercados é um constante desafio, inclusive do ponto de vista metodológico (CAVALCANTE e CHERIAF, 1996).

## 2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Nos últimos anos, uma das grandes preocupações da humanidade, tem sido a preservação da biosfera. A degradação ambiental tem atingido índices alarmantes. O homem em busca de seu conforto social e do avanço tecnológico acaba por produzir uma diversidade de produtos que geram rejeitos durante e após o processo produtivo. Esses rejeitos são conhecidos tecnicamente como resíduos e podem ser gerados de diversas formas. As indústrias e agroindústrias durante seu processo de produção geram resíduos que são depositados, em muitos casos, sem nenhum controle e diretamente no meio ambiente. Esses resíduos acabam por contaminar os solos, os mananciais de água e provocar problemas de saúde, (LEIRIAS et al, 2002).

De acordo com Oliveira (2002), a reciclagem de resíduos pode ser objeto da ação de profissionais com posições bem diferentes:

a) formulador de políticas de gestão ambiental deve ser interessado em selecionar quais os resíduos mais importantes, tanto do ponto de vista da quantidade quanto da agressividade ambiental;

b) pesquisador ou o formulador de políticas públicas deve se interessar em buscar dentre os resíduos existentes na sua região, uma alternativa adequada para a produção de um produto específico e;

c) gerador de um resíduo específico deve buscar alternativas para reciclagem.

A norma da ABNT, NBR 10004 (2004), define resíduos sólidos como sendo os resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultem de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Esta norma classifica os resíduos sólidos da seguinte forma.

### **1. Resíduos Classe I**

*i.* perigosos – resíduos classe I – são aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e radioatividade.

### **2. Resíduos Classe II**

*ii.* não inertes – resíduos classe II A – são aqueles resíduos que podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;

*iii.* inertes – resíduos classe II B – quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, (segundo a norma da ABNT NBR 10007, 2004), e submetidos a um contato

estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, acentuando-se os padrões de aspectos, cor, turbidez e sabor. Como exemplos destes materiais têm-se rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (NBR 10004, 2004 – ABNT).

Reciclar qualquer tipo de material, independente do uso que lhe for dado, representa vantagens econômicas, sociais e ambientais e estão abaixo relacionados.

**Ambientais** – o impacto destes resíduos ao meio ambiente é muito significativo, seja na forma de depósitos irregulares, para os quais a administração pública ou órgãos ambientais, têm de estabelecer uma rotina de correção, seja na forma de bota fora, deixando os gestores públicos reféns de soluções de destinação cada vez mais distantes e custosas. Em qualquer caso, a deterioração ambiental provocada é grande. Os benefícios ambientais com a reciclagem de resíduos são vários, não só por diminuir a deposição em locais inadequados como também por ser uma solução em minimizar a necessidade de extração de matérias-primas virgens, o que nem sempre é adequadamente fiscalizado.

**Econômicas** – reciclar é sempre menos custoso que descartar os resíduos recicláveis. Primeiro por que se pode fabricar um material alternativo com características semelhantes aos dos convencionais e segundo por que este novo produto estará dispensando em, pelo menos, 30% o uso de recursos naturais.

**Sociais** – as empresas da construção civil precisam assumir sua responsabilidade social, na forma de utilizar e indicar o produto com materiais reciclados podendo iniciar seu uso em obras de pequeno porte, tipo habitações populares, depois expandindo sua utilização em qualquer outro tipo de construção, uma vez comprovada sua qualidade e durabilidade. É necessário que a mídia, agentes da saúde, ONGs e a população, como um todo, seja conscientizada a valorizar os produtos reciclados e ecologicamente corretos, no caso de materiais de construção alternativos, esta conscientização deve partir do próprio setor.

Do ponto de vista da viabilidade técnica, o novo produto com uso de material reciclado deve satisfazer os ditames da ABNT e às solicitações a que estará submetido durante sua

utilização. Deve ser funcional para o usuário e com tecnologia simples para ser aplicado. A razão primordial para que qualquer produto tenha absoluto sucesso é, sem dúvida, o próprio usuário, não esquecendo as necessidades da indústria da construção civil e, conseqüentemente, os projetistas, (OLIVEIRA, 2004).

Desta forma, conclui-se que é necessário reciclar para que sejam preservados os recursos naturais não renováveis e que sejam elaboradas leis ambientais severas que dificultem a fabricação de produtos maléficis ao meio ambiente, como também é viável seguir a orientação dos ambientalistas para a redução, reciclagem e reutilização dos resíduos como um todo, evitando assim o sistema de descartes, uma vez que, segundo ENBRI (1994), apud Jonh (1996), a reciclagem de resíduos para a produção de novos materiais, permite:

- i.* redução do volume de extração de matérias-primas;
- ii.* conservação de matérias prima não renováveis;
- iii.* redução do consumo de energia;
- iv.* menores emissões de poluente, como o CO<sub>2</sub>;
- v.* melhoria da saúde e segurança da população.

Sendo assim o processo de reciclagem é muito importante por preservar recursos naturais e meio ambiente, diminuindo o volume de material aterrado ou jogado a céu aberto, evitando-se a poluição do ar, da terra e da água.

### 2.2.1 Reaproveitamento de resíduos

Rocha e Cheriaf (2003) apresentaram alguns conceitos visando um melhor enquadramento quanto ao termo “aproveitamento ou reaproveitamento” de resíduos como materiais de construção. Abaixo, citam-se algumas definições.

**Recuperação** – retirada do resíduo do seu circuito tradicional e tratamento. Exemplo: recuperação de PETs, papéis, do sistema de coleta formal, ou ainda de lodos de tratamento de efluentes destinados à eliminação em aterros controlados.

**Valorização** – dar um valor comercial a um determinado resíduo. Exemplo: vidros para a produção de silicatos e vitrocerâmicos.

Valorização energética – utilização do poder calorífico dos resíduos. Exemplo: casca de arroz usada no processo de beneficiamento e secagem do arroz, madeiras destinadas à queima em caldeiras, incorporação de lodo em matrizes cerâmicas para redução dos tempos de queima, visando à eficiência energética.

**Reciclagem** – introduzir o resíduo no seu ciclo de produção em substituição total/parcial de uma matéria-prima. Exemplo: areia industrial oriunda do processo de extração em pedreiras, reciclagem do resíduo de construção no concreto.

**Reemprego** – novo emprego de um resíduo para uso análogo ao seu primeiro ciclo de produção. Exemplo: incorporação de argamassas ainda no estado fresco, reprocessadas, para produção de uma nova argamassa, uso da água de lavagem de caminhões betoneiras na produção de concretos.

**Reutilização** – aproveitamento de um resíduo, uma ou mais vezes, na sua forma original, sem beneficiamento. Exemplo: reutilização da areia de fundição nos moldes.

Visando ao reaproveitamento dos resíduos, existem tecnologias e procedimentos diversos, mais ou menos sofisticados, mão-de-obra ou capital intensivos, processos incorporados e desenvolvidos no país. Sua escolha, entretanto, deve ser feita tendo em vista se atingir o aproveitamento ambientalmente adequado, ao menor custo possível, (ROCHA e CHERIAF, 2003).

Visando a uma avaliação do potencial de aproveitamento de resíduos, Cheriaf et al (1997), estabeleceram a necessidade de identificação dos parâmetros estruturais geométricos e ambientais dos resíduos, conforme procedimento no Quadro 1:

<b>Caracterização</b>	
<b>Parâmetros estruturais</b>	<b>Parâmetros geométricos</b>
Difratometria de raios X Análise termogravimétrica Análise química Espectrometria infra-vermelho	Granulometria Densidade Superfície específica Microscopia eletrônica varredura
<b>Outros parâmetros</b>	<b>Parâmetros ambientais</b>
Reologia Matéria orgânica Consistência Pureza	Lixiviação de resíduos Solubilização de resíduos Testes adaptados de materiais

Quadro 1 – Parâmetros a serem identificados nos resíduos.

Fonte: Cheriaf et al (1997).

As formas adequadas de aproveitamento de resíduos, ou de subprodutos industriais, como matéria-prima secundária, devem envolver um completo conhecimento do processo, as unidades de geração dos resíduos, a caracterização completa e identificação do potencial de

aproveitamento, identificando as características limitantes do uso e da aplicação, (ROCHA e CHERIAF, 2003).

### **2.2.2 Materiais alternativos já empregados na construção civil**

1) Fibras de coco e de sisal – Toledo Filho (1990) apud Sousa (1993) utilizou fibras de coco e de sisal, misturadas ao solo para melhorar suas propriedades e deu início a estudos neste domínio. Em seguida, Sousa (1993), em sua dissertação de mestrado, deu início a um estudo de solos estabilizados com fibras vegetais, para a fabricação de tijolos prensados.

2) EVA (etileno vinil acetato) – estudos de Silva (2003), em sua dissertação de mestrado, constataram que o emprego de resíduos calçadistas (EVA) na confecção de tijolos prensados, estabilizados com cimento, é uma solução viável para diminuir o descarte do resíduo no meio ambiente.

3) Bambu – uma das vantagens da utilização do bambu como material de construção é o seu baixo consumo energético, ajudando a conservar os recursos naturais e proteger o meio ambiente. O bambu, durante o processo de crescimento, trás benefícios ao meio ambiente enquanto o cimento Portland, durante seu processo de fabricação, lança gás carbônico na atmosfera (BRAGA FILHO, 2004).

4) Entulho da construção civil – várias pesquisas têm sido desenvolvidas na tentativa de aplicar o entulho da construção civil como material alternativo na confecção de produtos para a própria construção civil, como fabricação de blocos, cerâmicas, uso em aterros, em traços de concretos e em fundações, dentre outras.

5) Lodo de esgoto – tem sido aproveitado em escala industrial na produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica e na produção de cimento, também na recuperação de solos em áreas degradadas.

6) Escória de aciaria – reciclagem de escória de aciaria tem grande interesse na construção civil, pois, pode ser usada na produção de cimento, como substituto parcial de clínquer Portland. Usa-se também a escória como base para pavimentos e como agregados, porém existem limitações no emprego como agregado. O problema da escória resulta na expansibilidade de seus óxidos, o que limita seu uso. No Brasil é comum o seu emprego como cascalho para melhorar as condições de tráfego em vias não pavimentadas, (FILEV, 2006).

7) Pneus usados – o reuso do pneu têm tido bastantes aplicações, dentre elas, pode-se destacar:

- pavimentos para estradas – pó gerado pela recauchutagem e os restos de pneus moídos podem ser misturados ao asfalto aumentando sua elasticidade e durabilidade;
- contenção de erosão do solo – pneus inteiros associados a plantas de raízes grandes podem ser utilizados para ajudar na contenção da erosão do solo;
- combustível de forno para produção de cimento, cal, papel e celulose – o pneu é muito combustível, sendo então um grande gerador de energia. Seu poder calorífico é de 12 mil a 16 mil BTUs por quilo, superior ao do carvão.

8) Sucata de vidro – estudos estão sendo feitos no intuito de verificar a possibilidade da utilização de sucata de vidro em substituição a uma porcentagem dos agregados. O vidro é moído e/ou quebrado em cacos – pesquisas vêm sendo feitas para determinar a melhor maneira de inserir o vidro na pasta de cimento. Este tipo de reciclagem proporciona a economia de agregados naturais que são os comumente utilizados para este fim. O principal obstáculo a ser ultrapassado é a reação álcali-agregado que pode ser intensificada uma vez que o vidro é composto de sílica, a qual pode reagir com os álcalis do cimento em meio aquoso. Esta reação tem como produto um gel que sofre expansão em presença de água, o que pode comprometer o desempenho do concreto se não for controlado de maneira adequada, (SANTOS, 2006).

Além das formas de reciclagem citadas acima, existem inúmeras outras, tais como: agregados para leitos de estradas, materiais abrasivos, blocos de pavimentação, cimentos a serem aplicados em encanamentos, tanques sépticos de sistemas de tratamento de esgoto, filtros, janelas, clarabóias, telhas, etc. Todas estas aplicações utilizam a sucata de vidro moída e/ou em cacos (o tamanho do vidro varia conforme a aplicação) adicionada em porcentagens adequadas aos elementos já constituintes, (NELSON, 1996).

### 2.3 POZOLANA

Material pozolânico é definido pela ASTM C 618 (1978) e pela NBR 12652 (ABNT, 1992) como um material silicoso ou silicoso-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença da umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Como exemplo, pode-se citar a cinza volante com baixo teor de cálcio, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e a metacaulinita (MEIRA, 2006).

A norma da ABNT, NBR 12653 (1997) classifica as pozolanas quanto à origem em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são rochas que não necessitam, para seu emprego, de nenhum outro processo além da moagem. Não é simples classificar as pozolanas naturais, pois suas composições e propriedades variam muito. No entanto, com base no principal constituinte químico capaz de reagir com o hidróxido de cálcio, presente nos produtos de hidratação do cimento (Mehta, 1997), sugere uma classificação em quatro categorias: vidros vulcânicos, turfos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados (shales) e diatomitos.

As pozolanas artificiais, na sua maioria, são subprodutos industriais, em geral poluentes, mas de alta capacidade de reação pozolânica. Cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e sílica ativa são alguns exemplos destes materiais. Dal Molin (1995) indica um bom acervo bibliográfico de trabalhos publicados por pesquisadores do mundo inteiro. Mas tanto as pozolanas naturais como as artificiais podem necessitar de um processamento adicional (por exemplo, britagem e moagem) para se adequarem como materiais pozolânicos para uso em cimento, argamassas e concretos.

As cais pozolânicas artificiais, misturas de cais e pozolanas, são materiais alternativos que se destacam de maneira promissora, devido ao seu adequado desempenho mecânico e baixo custo. A mais antiga argamassa hidráulica que se conhece, é a obtida pela combinação de cinzas vulcânicas com cal hidratada e areia. Essa argamassa, foi largamente usada pelos romanos e gregos, chegando suas obras até os nossos dias, chamando-nos a atenção, às vezes, pelo notável estado de conservação que apresentam (SOUZA, 1994).

As pozolanas quando adicionadas a argamassas ou concretos, produzem um produto de baixo custo com características tecnológicas superiores aos desses produtos sem a adição (SOUZA SANTOS, 1989).

Na área restrita aos materiais de construção, apresenta interesse a redução no consumo de cimento Portland e da cal, produtos de elevado consumo energético. A utilização de resíduos industriais potencialmente aglomerantes, como a escória de alto-forno, cinza volante e cinza vulcânica, vêm se consagrando, além das terras diatomáceas e argilas calcinadas, já empregadas, (CINCOTTO e KAUPATEZ, 1998).

A pozolana utilizada na substituição parcial do cimento Portland deve apresentar uma área específica igual ou superior à do cimento Portland. Segundo Zampieri (1989) apud Leal (2004) seria desejável uma área específica com valores próximos a  $750\text{m}^2/\text{kg}$ , para que a atividade

pozolânica fosse alta, entretanto isto implica em equipamentos mais sofisticados e maior custo de energia.

Devido seu bom desempenho mecânico e redução nos custos é que, as cais pozolânicas, utilizadas primeiramente pelos gregos e romanos, desde os primórdios da nossa civilização, ressurgem hoje como uma alternativa viável a ser usada em diversos ramos da construção civil, como em argamassas de revestimentos e alvenarias e na fabricação de tijolos manuais e blocos para habitação popular.

Além de Dal Molin (1995), estudos feitos por Massazza (1974) mostram uma das mais completas e detalhadas classificações dos materiais pozolânicos de que se tem conhecimento. Além de ordenar esses materiais de forma bastante lógica, ele teve a preocupação de enquadrar dentro de cada subdivisão proposta, alguns dos mais famosos materiais pozolânicos de que se tem referência na literatura especializada. Já Zampieri (1989), apresentou, em essência, a proposição original de Massazza (1974), acrescida de alguns novos materiais, que só recentemente tiveram comprovada sua atividade pozolânica, os quais são a microssilica, as cinzas de resíduos vegetais e as escórias siderúrgicas ácidas.

As obras antigas, realizadas com pozolanas, existem até hoje como inestimáveis relíquias. Citam-se, por exemplo: o Panteão (Templo dos deuses) e o Coliseu (Figura 2.1), além de obras 8como estádios, basílicas, aquedutos, cisternas, pontes, portos e as mais diversas estruturas que ainda perduram até hoje (CALLEJA, 1958).

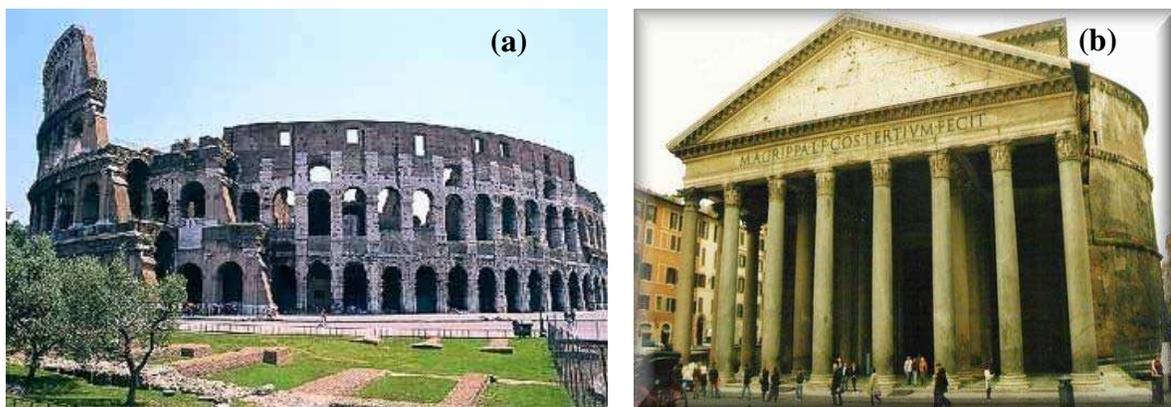


Figura 2.1 – Coliseu (a) e o Panteão (b), 117 a 138 d.C.  
Fonte: Coliseu (2007).

Na antigüidade, tanto gregos como romanos tinham conhecimento de que certos materiais vulcânicos, quando finamente moídos e acondicionados à cal extinta ou hidratada e areia,

proporcionavam argamassas de melhor desempenho mecânico, que exibiam adicionalmente a propriedade de endurecer, mesmo quando submersos em água (LIMA, 1993).

Segundo Bauer (1993) os materiais pozolânicos desenvolvem suas propriedades aglomerantes potenciais em presença do cimento e da água.

Estudos realizados por Silva (1992) concluíram que a atividade pozolânica define aqueles fenômenos que, à temperatura ambiente, transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante. Acreditava-se também que a atividade pozolânica era devido a uma atividade zeolítica, uma vez que vários pesquisadores tinham encontrado materiais zeolíticos em pozolanas, que eram conhecidos por serem capazes de absorver cal no contato com soluções, através de um mecanismo de troca de íons. São considerados materiais pozolânicos, aqueles que reagem quimicamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , em condições normais de pressão e temperatura, formando compostos cimentantes hidráulicos de boa resistência mecânica.

Ainda podem ser citadas duas importantes contribuições na utilização de pozolanas em substituição ao cimento Portland. A primeira é o impacto no custo final do compósito. Através do uso de materiais pozolânicos pode-se prever uma maior economia, uma vez que esses materiais permitem uma redução no consumo final de energia, sendo mais barato que o clínquer de cimento Portland. A outra diz respeito ao benefício ao meio ambiente, pois o uso de pozolanas reduz significativamente a emissão de gases na atmosfera, e recicla resíduos, geralmente depositados a céu aberto, como resíduos cerâmicos, entulhos da construção civil, escórias de alto forno, escórias de aciaria, cinzas da casca de arroz e outros, (LEAL, 2004).

### **2.3.1 Reação pozolânica**

O termo atividade pozolânica compreende todas as reações que envolvem os constituintes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água. Esta definição, apresentada por Massazza (1998), apesar de aproximada, é em geral aceita do ponto de vista teórico e prático. A atividade pozolânica abrange dois parâmetros principais: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que tal combinação se processa. Ambos os fatores dependem da natureza da pozolana e, mais precisamente, da qualidade e quantidade de fases ativas presentes (MASSAZZA, 1988). De forma geral, a combinação  $\text{Ca(OH)}_2$ -pozolana, em presença de água, varia com os seguintes fatores:

- ✓ natureza das fases ativas da pozolana, conforme citado;
- ✓ conteúdo de pozolana na mistura;

- ✓ teor de SiO<sub>2</sub> ativo na pozolana;
- ✓ razão Ca(OH)<sub>2</sub>-pozolana na mistura.

Da mesma forma, a taxa de reação é função da:

- ✓ área superficial da pozolana;
- ✓ relação sólido-água na mistura;
- ✓ temperatura.

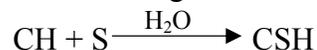
As principais fases ativas das pozolanas são a sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), na forma amorfa, ou seja, estruturas formadas por átomos com orientação somente à curta distância, (VAN VLACK, 1984).

A hidratação do cimento Portland produz hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub>. Tomando-se a alita (C<sub>3</sub>S) como exemplo, a reação de hidratação se dá:



Onde: C = CaO; S = SiO<sub>2</sub> e H = H<sub>2</sub>O, que é a notação adotada pela indústria do cimento.

A reação pozolânica ocorre combinando-se o hidróxido de cálcio disponível com os elementos reativos do material pozolânico. Como a sílica é o principal componente ativo de um material pozolânico, pode-se ilustrar conforme segue:



Observa-se que a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio e forma um silicato de cálcio hidratado.

Segundo Mehta (1997) é importante verificar que a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio, ao passo que a reação de hidratação do cimento Portland produz hidróxido de cálcio.

Na realidade, a reação pozolânica se desencadeia porque a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, pela fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso do vidro vulcânico ou das argilas calcinadas (MONTANHEIRO et al, 2003).

## 2.4 SÍLICA ATIVA

A sílica, pura ou como mineral, é um composto amplamente utilizado na indústria química inorgânica, com grande ênfase na indústria cerâmica, principalmente como matéria-prima para fabricação de vidros, refratários, tubos cerâmicos, isolantes térmicos e abrasivos. Na indústria da construção civil, como componente em cimentos, concretos e argamassa, a sílica tem fundamental importância, pois é responsável pela resistência mecânica, viscosidade e tempo de

endurecimento. Devido a sua vasta aplicabilidade, o conhecimento de suas características é até hoje interesse de estudos para muitos pesquisadores, (HOUSTON, 1972).

A sílica ativa apresenta-se de várias formas como microsílica, fumos de sílica, sílica condensada, entre outros. A sílica ativa, como oficialmente é designada no Brasil, nada mais é que um subproduto industrial constituída, essencialmente, por  $\text{SiO}_2$  no estado amorfo. É um material altamente poluente proveniente do processo de obtenção de ligas de ferro – silício e silício metálico, para fabricação de componentes eletrônicos, (OLIVEIRA FILHO, 1999).

Anteriormente o  $\text{SiO}$ , na forma de vapor, era lançado ao meio ambiente junto com o gás carbônico oriundo da fusão, o que acarretava enormes prejuízos ambientais. No entanto, com o reaproveitamento do monóxido de silício com a finalidade de se transformar em sílica, além de se produzir um material extremamente útil para a tecnologia do concreto, incide ainda sobre ele um benefício ecológico importantíssimo (DAL MOLIN, 1995 apud OLIVEIRA FILHO, 1999).

Para a tecnologia do concreto, a sílica ativa como material pozolânico não é nenhuma novidade, pois segundo Dal Molin (1995) e Diamond (1984), desde o início da década de 50 já se substituía parte do cimento por sílica, com a finalidade de além de economizar energia, propiciar benefícios ecológicos. Porém, somente com a necessidade da obtenção de concretos com características de resistência mecânica, durabilidade e fluidez cada vez mais acentuadas, é que a partir da década de 80, período de desenvolvimento comercial do produto, o interesse por tal material foi intensificado, sendo alvo de pesquisas e conferências no mundo inteiro.

Almeida (1996), apud Oliveira Filho (1999), afirma que a sílica ativa atua nos concretos de duas maneiras distintas: a primeira é quimicamente através da reação pozolânica, ou seja, reagindo com o frágil hidróxido de cálcio para formar os resistentes silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) melhorando assim a resistência da pasta de cimento. A segunda é fisicamente, através do efeito “filler”, ou seja, devido às dimensões de seus grãos, preenchendo os vazios da mistura, contribuindo para melhorar a coesão e compacidade do concreto fresco e também atuando refinando a estrutura de poros do material, agindo como ponto de nucleação dos compostos de hidratação do cimento.

Segundo Dal Molin (1995) a sílica ativa limita a área de crescimento dos produtos de hidratação, fazendo com que ocorra a formação de um grande número de pequenos cristais, ao invés de poucos cristais de grande tamanho.

Monteiro (1985) resume o efeito da sílica ativa na microestrutura dos concretos, da seguinte forma:

- a) reação pozolânica que reduz a quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$  e forma C-S-H;
- b) menor acúmulo de água livre na interface pasta/agregado;
- c) formação de novos pontos de nucleação que dificultarão a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

Tais fatos resultam em sensíveis alterações nas propriedades do concreto e das argamassas tanto no estado físico (trabalhabilidade, coesão, estabilidade, entre outras), como no estado endurecido (resistência mecânica e química, permeabilidade, durabilidade, fluência, entre outras), (Oliveira Filho, 1999). Sendo algumas destas propriedades, objeto de estudo deste trabalho.

Por estas razões justifica-se o interesse de observar os efeitos da adição da sílica, proveniente da cinza de casca de arroz, através da queima da casca de arroz, em traços de argamassas para uso na construção civil, visto que a mesma apresenta propriedades pozolânicas, podendo perfeitamente ser substituída, em parte, pelo cimento Portland.

## 2.5 CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa* L.) está incluído no gênero *Oryza*, importante família das gramíneas. É uma planta anual, cujos órgãos vegetativos e de reprodução desenvolvem-se num determinado período denominado ciclo, sendo um dos cereais mais usados na alimentação humana, tendo uma área de cultivo de, aproximadamente, 130 milhões de hectares em todo o mundo, (HECKLER, 1986).

Até hoje não se pode afirmar, com certeza, qual o país onde surgiu, todavia pode-se afirmar, com segurança, que é uma planta asiática cuja origem provável é a China, Índia ou Indochina. Na China, segundo a história, o arroz é cultivado há mais de cinco mil anos. Na Europa foi introduzido no século VIII, pelos mouros, através da Península Ibérica. Para os Estados Unidos foi levado em 1694 pelo comandante de um navio holandês, sendo ali cultivado, inicialmente, no Estado da Virgínia (GADELHA e BARRETO, 1982).

Com referência ao Brasil, foi trazido por colonos portugueses que o semearam no Estado do Maranhão, onde se desenvolveu de maneira bastante satisfatória. No Rio Grande do Sul, Estado que dispõe de modernas técnicas produtivas, somente foi introduzido em 1892.

Em termos mundiais, o Brasil está entre os dez principais produtores, sendo superado pelos seguintes países, dentre outros: China, Índia, Indonésia, Bangladesh, Tailândia e Japão. Aproximadamente 70% desta produção é proveniente das regiões centrais, envolvendo grande

parte dos Estados de Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais e região sul, destacando-se o Rio Grande do Sul, (FAGUERIA e BARBOSA FILHO, 1980).

No Brasil, o arroz é cultivado praticamente em todo território nacional sob dois sistemas tradicionais de cultivo: de sequeiro e irrigado. O arroz de sequeiro tem uma plantação anual, de acordo com o período chuvoso, já o arroz irrigado, diferentemente do arroz de sequeiro, não sofre o problema de sazonalidade da cultura. Nos últimos cinco anos, Roraima tem apresentado um melhor desempenho, aumentando sua participação na produção da Região Norte. Esse aumento significativo coloca o Estado como o terceiro maior produtor da Amazônia Ocidental, (SEPLAN/RR, 2006). Desta forma, acredita-se, que não faltará matéria-prima para a continuidade dos trabalhos de pesquisa e posterior uso em escala industrial, uma vez que o consumo de arroz pela população mundial é um hábito inquestionável e dificilmente será substituído.

No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento classifica o arroz em dois grupos gerais: arroz em casca e arroz beneficiado. A produção e beneficiamento do arroz é uma das atividades mais tecnificadas do setor agrícola brasileiro. O beneficiamento após colheita do arroz consiste em: secagem, limpeza, descasque, brunição (polimento), classificação, seleção, empacotamento e expedição. Alguns engenhos fazem ainda a parboilização<sup>1</sup> dos grãos de arroz.

A partir do beneficiamento do arroz derivam, além do arroz polido, três subprodutos: grãos quebrados, farelo e casca de arroz. A casca de arroz, que consiste no principal subproduto da indústria arroseira, responde por cerca de 20% do total de arroz. É um material abrasivo, de baixo valor nutritivo e, dada a sua reduzida densidade, seu simples armazenamento e eliminação constituem um grave e dispendioso problema. Atualmente, as indústrias beneficiadoras de arroz empregam praticamente todo montante de casca em processos de co-geração de energia (DELLA et al, 2005b)

A rizicultura ocupa lugar de destaque em nosso país, como lavoura de subsistência e é explorada em todo território, podendo-se citar como grandes produtores: Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais, conforme mostra a Figura 2.2.

---

<sup>1</sup> A parboilização é um tratamento hidrotérmico que cozinha parcialmente os grãos ainda em casca. Este processo faz com que parte das vitaminas e sais minerais passe do farelo para o interior do grão, aumentando seu valor nutricional (LUDWIG, 2004).

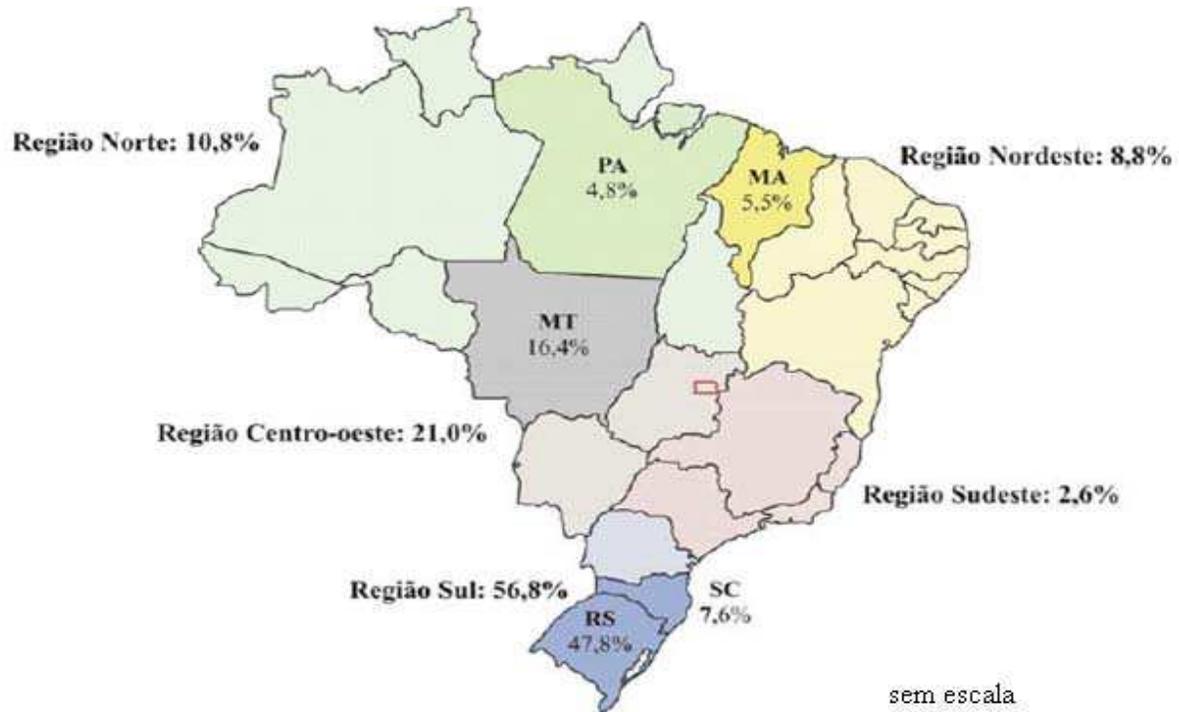


Figura 2.2 – Distribuição percentual da produção de arroz (em casca) por regiões brasileiras no ano de 2004, com destaque para os cinco principais estados produtores.

Fonte: IBGE (2006).

### 2.5.1 Casca de arroz e cinzas da casca de arroz

Nos dias atuais, a continuidade do uso, sem controle, de matérias primas naturais, pela construção civil, poderá ocasionar escassez destes recursos, devido à exploração indiscriminada de jazidas minerais. Diante disso, pesquisadores buscam identificar características pozolânicas em vários materiais, sendo que a maioria é rejeito industrial poluente. Como exemplo, apresentase: a sílica oriunda da fabricação de ligas ferro-silício ou silício metálico; a sílica extraída da casca do arroz; a cinza volante; a escória de alto forno; a escória de aciaria; a cinza da casca de arroz; do bagaço de cana-de-açúcar e da espiga de milho; o pó de resíduos cerâmicos, dentre outros, (GRANDE, 2003).

Como se pode ver, dentre os resíduos que vêm sendo estudados com propriedades pozolânicas, encontram-se os materiais que são objetos de estudo desta pesquisa: casca do arroz e as cinzas da casca de arroz.

### 2.5.1.1 Casca de arroz (CA)

A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas, ou celulares, que são silicosas. A composição química da casca de arroz depende do tipo de solo, tipo e percentual de fertilizante e tipo de arroz. Segundo Dafico (2001), os elementos mais comuns presentes na casca de arroz são: silício, sódio, potássio, cálcio, cobre, manganês e zinco.

Segundo Hwang e Chandra (2002), a constituição química da casca de arroz varia com a espécie cultivada, tipo de solo, fatores climáticos e fertilizantes empregados. A Tabela 2.1 apresenta análises elementares de amostras distintas de cascas de arroz, estudadas pelos referidos autores, onde se observam pequenas variações no que se refere às quantidades de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e cinza.

Tabela 2.1 – Composição química elementar de amostras de casca de arroz.

Amostra	Quantidade (% , em massa)					
	C	H	O	N	S	Cinza
1	38,3	5,7	39,8	0,5	0,0	15,5
2	39,4	5,5	36,1	0,5	0,2	18,2
3	39,5	5,5	37,7	0,8	0,0	16,5

Fonte: Hwang e Chandra (2002)

Estima-se, atualmente, um crescimento na produção mundial de cem milhões de toneladas de arroz a cada ano, o que gera um volume considerável de casca de arroz, tanto internamente como mundialmente (HABITARE, 2002).

Várias metodologias para minimização de resíduos e impactos causados por estes têm sido desenvolvidas as quais têm como objetivo principal encontrar uma solução que seja economicamente viável, ambientalmente correta e tecnicamente eficiente.

Uma das primeiras utilizações da casca de arroz foi como fonte alternativa de energia renovável, a qual vem sendo empregada como combustível vegetal, pelas próprias empresas beneficiadoras de arroz como alternativa de energia para a secagem e parboilização do cereal, tendo como inconveniente o não aproveitamento das cinzas, que são depositadas em terrenos baldios ou lançadas em cursos de água, provocando poluição e contaminação de mananciais.

De acordo com Leirias et al (2005), a casca de arroz vem sendo utilizada como biomassa para a geração de energia térmica em indústrias cerâmicas e alimentícias devido seu alto poder calórico, cerca de 16.720 kJ/kg. Segundo Della et al (2005a) para cada tonelada de arroz em casca, aproximadamente 20% corresponde à casca de arroz e 4% corresponde a cinza de casca de

arroz. Se toda esta casca de arroz, produzida no Brasil, for utilizada como matriz energética geraria, atualmente, cerca de 530 toneladas de cinzas de casca de arroz ao ano.

Já existem algumas pesquisas com a cinza de casca de arroz, resultado da queima da casca, mas, até então, a casca tem servido mais como fonte alternativa de energia, porém esta não é a única vantagem da utilização da biomassa (material vegetal como a casca do arroz, o bagaço da cana, os resíduos de madeira, entre outros), enquanto combustível.

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992). O silício contido na casca de arroz ocorre, geralmente, em uma forma amorfa hidratada de sílica, com uma estrutura em estado similar vítrea (opalina) ou na forma de gel (HOUSTON, 1972). Quando sofre combustão a casca é transformada em cinza, sendo que a lignina e a celulose podem ser removidas, permanecendo uma estrutura celular e porosa, com elevada superfície específica (50.000 a 100.000 m<sup>2</sup>/kg) e grande quantidade de sílica. A Figura 2.3 mostra uma micrografia da cinza de casca de arroz após queima de 560°C.

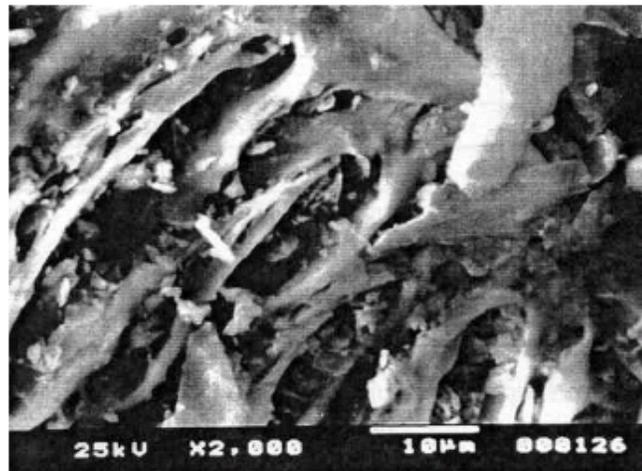


Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz, queimada a 560°C.  
Fonte: Silveira (1996).

Della (2001) relata que através da evolução tecnológica do beneficiamento do arroz, a casca resultante, devido ao seu alto poder calorífico e custo praticamente nulo, está cada vez mais substituindo a lenha empregada na geração de calor para secagem dos grãos de arroz, como resultado deste processo de combustão incompleta surge a cinza de casca de arroz. Esta cinza, por ser rica em sílica (SiO<sub>2</sub>) é uma potencial fonte alternativa de matéria-prima para a aplicação em diversas áreas, principalmente na indústria cerâmica e componentes da construção civil.

A casca de arroz é freqüentemente considerada um problema ambiental. Entretanto, este material pode ser usado como aditivo em concretos e argamassas, podendo ser empregados na produção de peças para painéis de alvenaria. Martinez (2003) mostrou que painéis de alvenaria, feitos com adição de casca de arroz, empregados para paredes de vedação, têm o mesmo desempenho de painéis tradicionais de blocos cerâmicos. Neste caso, além do benefício da redução de custo pela utilização de um rejeito reciclado, tem-se o ganho de qualidade de construções industrializadas. O material produzido em escala industrial tem dimensões estáveis e regulares e superfícies lisas. Desta forma, podem-se modular as construções de forma a obter um maior rendimento. As faces lisas podem ser pintadas após a aplicação de uma camada de gesso ou massa corrida para garantir um acabamento de boa qualidade.

Já no estudo da adição da casca de arroz em traços para confecção de blocos, estes blocos serão mais leves que a alvenaria tradicional de blocos cerâmicos ou de concreto, o que permite empregá-los em edifícios com redução de peso na estrutura (SOUZA et al, 2008).

A queima da casca deste cereal produz uma quantidade significativa de cinzas. A Tabela 2.2 mostra que nenhum outro cereal produz tanto resíduo quanto o arroz e, conseqüentemente, tanta cinza após queima.

Tabela 2.2 – Quantidade de cinzas gerada por resíduo agrícola.

<b>Cereal</b>	<b>Parte da planta</b>	<b>Cinza (% em peso)</b>
Milho	Folha	12
Arroz	Casca	20
Arroz	Palha	14
Cana-de-açúcar	Bagaço	15
Girassol	Folhas e talo	11
Trigo	Folhas	10

Fonte: Malhotra e Mehta (1996).

Não obstante os benefícios econômicos e ambientais destacam-se a possibilidade de projetos de venda de carbono equivalente através dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo<sup>2</sup> (MDL) pela geração de energia por fonte renovável em substituição a matérias-primas fósseis. Esta prática de desenvolvimento sustentável vai de encontro ao objetivo principal de alcançar a estabilização das concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera ao nível que impeça uma

<sup>2</sup> O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo foi definido no Artigo 12 do Protocolo de Quioto e regulamentado pelos Acordos de Marraqueche. Dispõe sobre atividades de projetos de redução de emissão de gases de efeito estufa ou aumento de remoção de CO<sub>2</sub>.

interferência antrópica perigosa no sistema climático de acordo com o Protocolo de Quioto (CORDEIRO, 2006).

Quando utilizada de forma correta, a casca de arroz pode se tornar uma importante aliada na busca do desenvolvimento sustentável, uma vez que pode ser utilizada como fonte alternativa e renovável de energia (queima da casca como combustível), e as cinzas geradas no processo de combustão podem ser incorporadas ao concreto e às argamassas, como pozolanas, em substituição parcial ao cimento, conforme ilustrado na Figura 2.4.

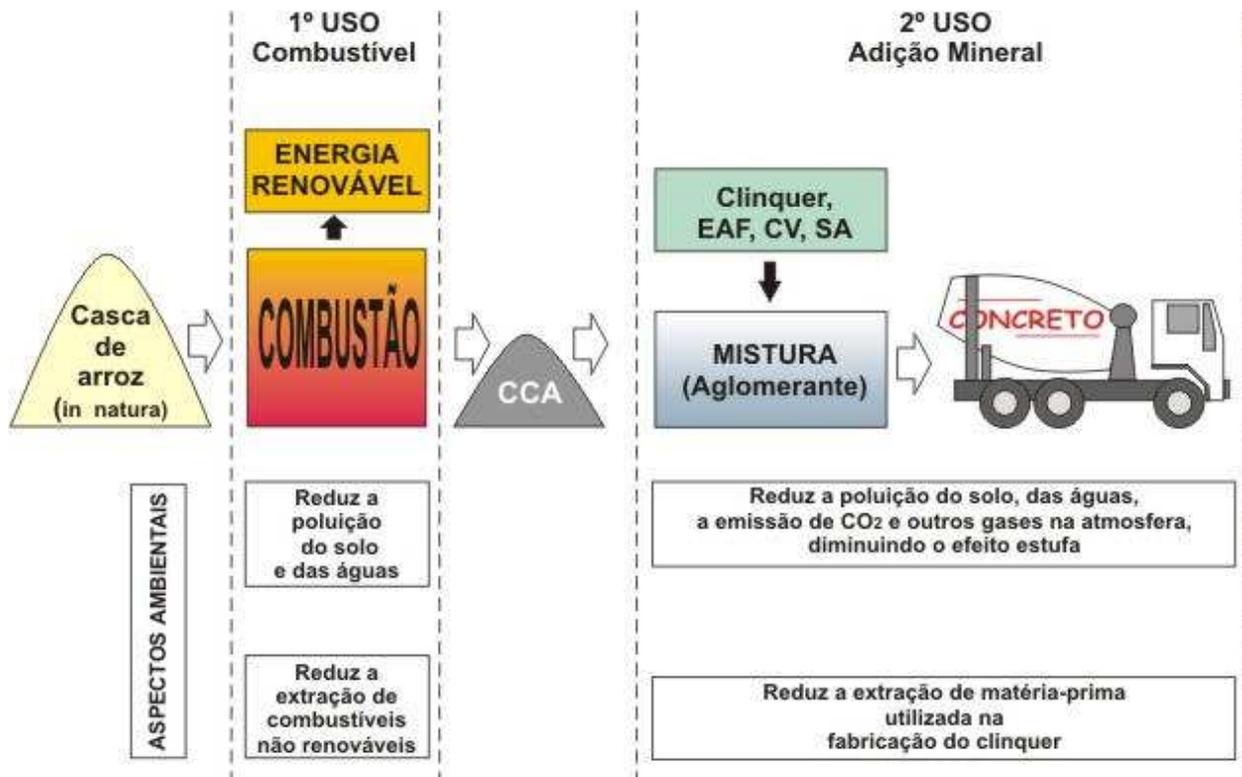


Figura 2.4 – Benefícios obtidos com o aproveitamento da casca de arroz como biomassa e utilização das cinzas como adição mineral para a produção de concreto.

Fonte: Tiboni (2007).

### 2.5.1.2 Cinzas de casca de arroz

Segundo Ferreira (2003) a cinza de casca de arroz é um dos produtos de origem vegetais mais utilizados em pesquisas de potencial aglomerante, dentre as cinzas vegetais. Os principais motivos que levam a isto são:

1) a quantidade de cinza produzida após a calcinação da casca de arroz é uma das maiores dentre os vegetais;

- 2) a sílica da casca de arroz apresenta estrutura alveolar e com grande área específica;
- 3) o arroz é plantado em grandes quantidades em todo o mundo.

A Figura 2.5 mostra um fluxograma para obtenção da cinza de casca de arroz a partir do beneficiamento do arroz e suas diversas aplicações.

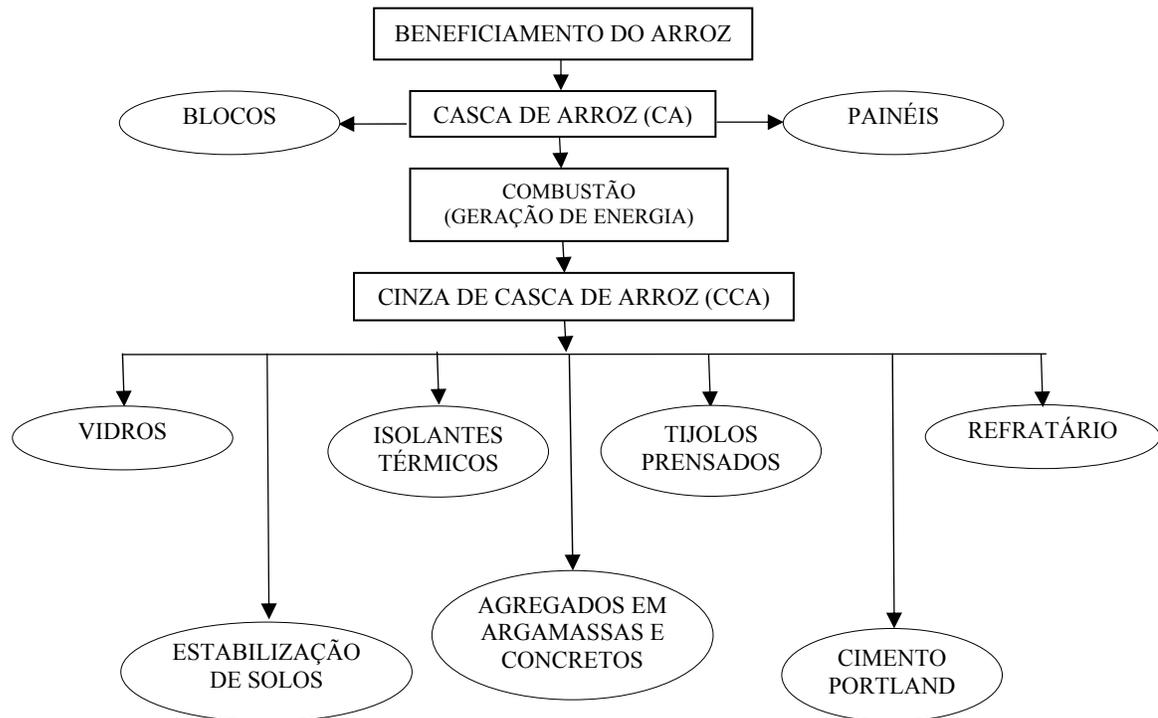


Figura 2.5 – Fluxograma de aplicação de CCA a partir do beneficiamento do arroz.

Fonte: Malhorta e Mehta (1996).

A cinza de casca de arroz é um subproduto proveniente da combustão (controlada ou não) da casca de arroz que, quando moída finamente, adquire propriedades pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento para formar compostos cimentantes semelhantes àqueles da hidratação do cimento.

De acordo com Prudêncio Júnior et al (2003) a cinza da casca de arroz é composta basicamente por dióxido de silício, ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ), em proporções que giram em torno de 90%. Outros compostos como  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{Cl}$  podem ser encontrados em sua composição, porém em quantidades muito pequenas.

A utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico vem sendo imensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos EUA, mas só a partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho (CAD) a preocupação em se obter um máximo de pozolanicidade do material se tornou premente, (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al, 2003).

No Brasil as principais pesquisas utilizando cinza de casca de arroz foram iniciadas pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas S. A.), na década de 80, com o objetivo de reduzir a alcalinidade do cimento (FREIRE, 2005).

O uso de adições de origem mineral, como a cinza da casca de arroz, que é considerada como pozolana, está recebendo maior atenção por parte dos pesquisadores, em função das vantagens técnicas que apresenta, quando empregada em substituição à parte do cimento Portland em concretos e também por ser um material abundante e de baixo custo quando comparado ao preço de outros tipos de sílica, (WEBER, 2001).

Em cada tonelada de arroz são extraídos 200 kg de sílica que, atualmente, é jogado no lixo. O aproveitamento deste material significa, para as indústrias, a redução das importações e a possibilidade de melhorar e ampliar a oferta de produtos. No caso do concreto e das argamassas, por exemplo, o uso da sílica aumenta, consideravelmente, a resistência à compressão simples, estudo este que será mostrado nesta pesquisa.

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de utilizar esse produto em setores industriais, em especial, na indústria da construção civil. A UFSC é uma das universidades com pesquisas neste campo. Os resultados obtidos, por pesquisadores desta Instituição, mostraram que a cinza da casca de arroz é uma excelente pozolana, com desempenho comparável ao da sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-sílico e/ou do silício metálico) um componente comercial necessário na produção de concretos de alto desempenho, (ABRABI, 2007).

No Brasil, a grande maioria dos trabalhos sobre o uso de cinzas de casca de arroz como material pozolânico foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em indústrias beneficiadoras do cereal. Em alguns casos, quando as empresas possuíam queimadores de leito fluidizado, a temperatura de queima era controlada para evitar a formação de sílica cristalina. Nos demais casos, os 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 cinza de casca de arroz é uma excelente pozolana, com desempenho comparável ao da sílica ativa. Os trabalhos nacionais constataram ainda que esse desempenho foi satisfatório mesmo para cinzas que exibiram picos cristalinos nos ensaios de difração de raios X, (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al, 2003).

A eficiência da cinza da casca de arroz como material pozolânico está relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes da combustão não controlada geralmente contêm uma

grande proporção de minerais de sílica não reativos (cristalinos) e de baixo valor pozolânico, devendo ser micronizadas para desenvolver a atividade pozolânica. Já a queima controlada, com temperaturas entre 500 a 700 °C possibilita a obtenção de cinzas amorfas de alta pozolanicidade (DAL MOLIN et al, 2004).

Sensalle (2000) fez um estudo comparativo das propriedades mecânicas do concreto de alta resistência com emprego da cinza de casca de arroz, onde estudou a influência desta cinza nas propriedades mecânicas de concretos de alta resistência e de concretos convencionais com vistas a definir algumas propriedades básicas do material: resistência à compressão simples e à tração, módulo de deformação, relação água/cimento (cimento + cinza de casca de arroz) e do percentual de adição, onde concluiu que o concreto com cinza de casca de arroz possui excelente comportamento mecânico e que o emprego de cinza de casca de arroz residual na produção de concreto mostrou potencialidade como material cimentício suplementar.

Em trabalho publicado em 1972, Houston faz uma listagem de 262 referências sobre as possibilidades de emprego da cinza de casca de arroz. No Brasil, atualmente, merecem destaque trabalhos desenvolvidos por: Cincotto et al (1998), Dafico (2001), Weber (2001) e Santos (2003).

Apesar de ainda vários pesquisadores desconsiderarem a cinza de casca de arroz residual como material pozolânico (que na mistura com cal hidratada resulta em produtos cimentícios de alta resistência), pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) demonstraram que é possível reciclar cinzas produzidas em processos de queima não controlada e transformá-las em cinzas de alto desempenho (HABIRATE, 2002). A cinza de que trata este artigo pode ser de carvão mineral, de palha de arroz, de bagaço de cana, etc. Estas cinzas são ricas em sílica e em materiais pozolânicos. Neste caso, uma grande vantagem sobre o solo cimento é a eliminação de um produto poluente e que consome recursos financeiros para a sua disposição.

A despeito de ser este um assunto relativamente antigo e dos resultados de pesquisas de Dafico (2001), Visconte (2003), Leirias et al (2005) e Grande (2003), mostrarem o excelente potencial como pozolanas, as cinzas resultantes da queima da casca de arroz não têm sido muito utilizadas para produção de concreto tanto no Brasil quanto no exterior. Isso pode ser atribuído ao fato de que as cinzas de boa atividade pozolânica geralmente possuem teores elevados de carbono (acima de 5%), produzindo uma coloração cinza-escura no concreto, pouco aceita no mercado consumidor. Por isso, os trabalhos mais recentes sobre o assunto (Dafico, 2001; Weber, 2001; Santos, 2003) têm se concentrado na busca de cinzas de baixo teor de carbono que apresentem elevados desempenhos como pozolanas.

Por outro lado, pesquisas realizadas por Rossignolo et al (2004) indicaram que a utilização de sílica ativa acarreta melhoria de desempenho das propriedades dos concretos, especialmente as relacionadas à durabilidade (objeto de estudo deste trabalho) e à resistência mecânica.

Apesar do sucesso do uso das cinzas de casca de arroz em concretos de alto desempenho, em substituição parcial ao cimento, pouco se estudou com respeito à durabilidade deste produto (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al, 2002). Espera-se que sua aplicação na confecção de argamassas para alvenaria, em aplicações de reboco, chapisco ou emboço, bem como para assentamento de materiais, onde as propriedades mecânicas requeridas são bem inferiores às exigidas para o concreto, resulte em um produto durável e de boa qualidade, além de sua importância, por causa do baixo custo e disponibilidade do material, sendo uma solução adequada aos problemas ambientais.

#### 2.5.1.3 *Influência da queima (temperatura)*

A temperatura é uma das variáveis que mais vai afetar as características físicas e químicas da cinza, tanto pela sua magnitude quanto pelo tempo de exposição a que a amostra é submetida.

Hanafi et al (1980), ao estudarem a produção de cinzas da casca de arroz com temperaturas de queima entre 500°C e 1400°C (tempo de residência de 3 h), verificaram que a pozolana produzida a 600°C apresentou o maior valor de superfície específica (274.200 m<sup>2</sup>/kg). Os autores observaram redução da superfície específica da cinza na faixa entre 600°C e 900°C, fato atribuído ao aumento do tamanho das partículas. No caso específico do aumento da temperatura de 800°C para 900°C, há ainda a influência do processo de nucleação da sílica para a formação dos cristais de cristobalita.

Mehta (1992) mostrou que quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa (400 a 600°C) e o tempo de exposição à temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa. A cinza nestas condições apresenta forma angular, estrutura altamente celular e superfície específica elevada, de 40.000 a 110.000m<sup>2</sup>/kg (por absorção de nitrogênio), e diâmetro médio geralmente inferior a 45µm.

A queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica (teor maior que 90%), normalmente em forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica é amorfa, caracterizada por uma alta reatividade (CHANDRASEKHAR et al, 2003).

As três fases polimórficas da sílica cristalina na pressão atmosférica são quartzo  $\alpha$ , quartzo  $\beta$ , tridimita e cristobalita. A forma mais estável na temperatura ambiente é o quartzo  $\alpha$ , que se

transforma em quartzo  $\beta$  à 573° e permanece estável até 870°. Entre 870°C e 1470°C persiste a forma tridimita e de 1470°C até 1713°C ela se modifica para a cristobalita. Acima de 1713°C ocorre a fusão da sílica (DAFICO, 2001).

A estrutura da sílica vítrea é metaestável e, portanto, tem a tendência de mudar lentamente para a forma cristalina, de menor energia livre, que é mais estável. Se a temperatura for mantida acima de 870°C por um longo período, a sílica vítrea se cristaliza em cristobalita e, eventualmente, em tridimita se as condições forem favoráveis, isto é, na presença de íons catalisadores (principalmente íons alcalinos), processo este conhecido por devitrificação (DAFICO, 2001).

A queima parcial da casca de arroz causa a decomposição da parte orgânica e quebra da ligação com o Si (Chandrasekhar et al, 2003) gerando uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, de cor preta. Quando inteiramente queimada, resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima, Figura 2.6.



Figura 2.6 – Etapas do processo de fabricação de sílica: a) casca; b) queima 1; c) queima 2 e d) cinza da casca de arroz.

Fonte: Tiboni (2007).

Mehta (1992) atribui à alta reatividade da CCA queimada controladamente às propriedades das partículas de serem bastante porosas e, assim, não necessitam de um longo período de indução para ativação da superfície em meio alcalino. A consequência disto, é que a CCA reage rapidamente com o hidróxido de cálcio formando C-S-H, ou seja, a reação não é tão lenta quanto se espera de uma reação pozolânica comum. Ainda segundo Mehta (1992), quando a CCA é altamente pozolânica, o período de cura pode ser reduzido para se atingir as resistências mecânicas requeridas em comparação com outras adições, (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Período efetivo de contribuição na resistência.

Fonte: Tiboni (2007), adaptado de Mehta (1992).

Segundo Cordeiro (2006) os valores de superfície específica das cinzas ilustrados na Figura 2.8, são dependentes do tratamento térmico empregado. Os diferentes teores de carbono, o arranjo estrutural dos compostos presentes na cinza e a formação de novas fases cristalinas determinam a variação da relação entre área superficial e massa. Observa-se aumento da superfície específica à medida que a temperatura de queima é acrescida até 600°C, onde a cinza com maior superfície específica é obtida. A partir de 600°C, observa-se expressiva queda da superfície específica, provavelmente em decorrência da formação das fases cristalinas, que se mantém entre 5.000 m<sup>2</sup>/kg e 6.000 m<sup>2</sup>/kg até a temperatura de 900°C.

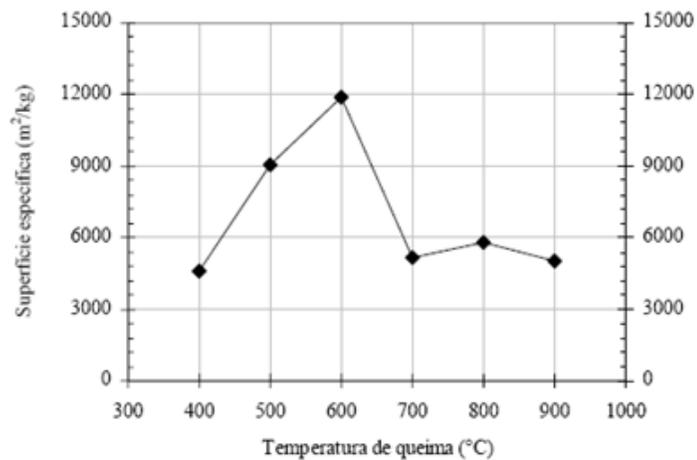


Figura 2.8 – Valores de superfície específica (B.E.T.) das amostras de cinza.

Fonte: Cordeiro (2006).

Nas cinzas produzidas a partir de 600°C foi verificado um decréscimo da superfície específica, sendo mais pronunciada para a amostra produzida a 900°C, que apresentou superfície específica de 6.210 m<sup>2</sup>/kg, provavelmente em virtude do colapso de sua estrutura porosa ocorrido durante a queima. Hanafi et al (1980) ressaltam que a formação da cristobalita por si só reduz

significativamente a superfície específica das partículas em consequência do crescimento dos cristais.

Com relação às condições de queima, a maioria dos pesquisadores já citados, a exemplo de Cordeiro (2006) e Tiboni (2007), concordam com Mehta no que diz respeito às temperaturas, as quais devem situar-se entre 500 e 700°C para não haver cristalização da sílica.

#### 2.5.1.4 Influência da moagem

O grau de moagem é um fator importante, pois modifica propriedades físicas da cinza da casca de arroz, como a superfície específica e finura. Estas propriedades estão diretamente ligadas à trabalhabilidade. No caso das CCA, a moagem torna as partículas, que são originalmente aciculares, mais próximas ao formato esférico (Figura 2.9).

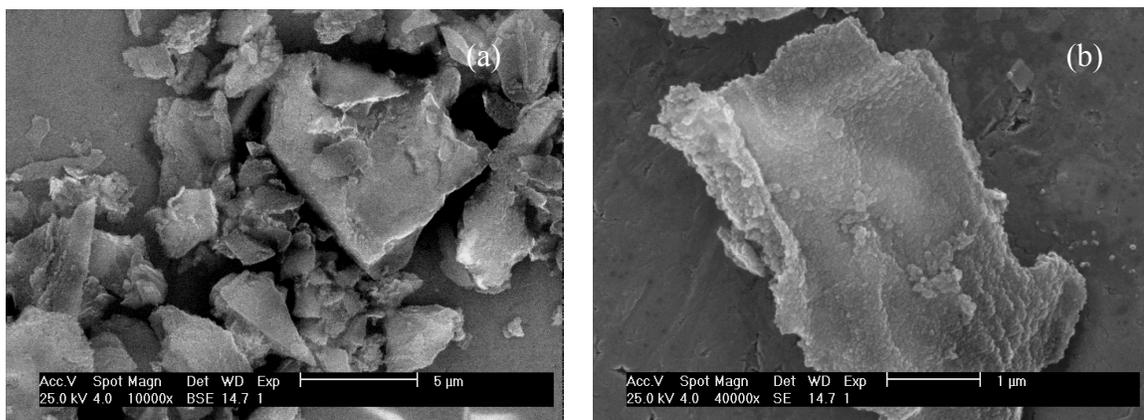


Figura 2.9 – Micrografias de microscopia eletrônica de varredura da cinza da casa de arroz.  
Fonte: Menezes, 2008.

Bui et al (2005) estudaram a alteração na superfície específica em função do tempo de moagem. O tempo de moagem variou de 3 a 70 minutos. Medindo-se a superfície específica das amostras, os autores concluíram que ela se apresenta em ascensão até o tempo de 30 minutos, depois disto há diminuição.

Guedert (1989), num estudo similar, com tempos de 1, 2, 4 e 8 horas encontrou superfícies específicas e pozolanicidade cada vez maiores com o tempo de moagem.

Santos (2003) encontrou os resultados expostos na Tabela 2.3 que demonstram um aumento da superfície específica com o aumento do tempo de moagem. Já a pozolanicidade apresentou aumento até 4 horas de moagem, posteriormente apresentou decréscimo. A autora concluiu que o tempo de moagem leva a diferentes áreas específicas e influenciam de forma significativa na

atividade pozolânica do material e que existe um tempo de moagem ótimo para que a CCA atinja a máxima pozolanicidade. A partir deste tempo ótimo, há aumento demasiado da área específica, o que pode dificultar a dispersão da pozolana na argamassa. Todavia, esse tempo de moagem ótimo pode ser bastante alto, levando a um consumo muito grande de energia.

Tabela 2.3 – Influência do tempo de moagem na superfície específica e pozolanicidade da CCA.

<b>Tempo de moagem</b>	15min	30min	1h	2h	4h	6h	8h	10h	20h
<b>Superfície Específica Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	827	1087	1376	1604	1614	1772	2275	2589	2899
<b>IAP (%)</b>	62	83	106	113	126	123	119	118	115
<b>NBR 5752 (1992)</b>									

Fonte: Santos (2003).

Bui et al (2005) ensaiaram concretos com adição de CCA em que variaram a finura do cimento. Concluíram que a finura da cinza, para que o concreto atinja melhores resultados em termos de resistência à compressão simples, deve estar de acordo com a finura do cimento, isto é, o tamanho médio das partículas do cimento e da cinza deve ser distinto a fim de fornecer um aglomerante bem graduado, bem empacotado.

## 2.6 POTENCIAL ECONÔMICO

Mudanças ocorridas ao longo do tempo no processo de beneficiamento do arroz obrigaram as próprias usinas a gerarem energia para a secagem do produto, o que pode ser feito com a própria casca do arroz em vez da utilização de madeira, que é mais custosa e ecologicamente incorreta. Um combustível comumente empregado na queima do arroz é o diesel. A substituição total ou parcial deste combustível pela casca de arroz traz a vantagem da redução da quantidade de um material fóssil não renovável. O valor energético da casca de arroz é aproximadamente 16.720kJ/kg, o que significa que 1 tonelada de casca é equivalente a 0,48tf de carvão. Além disso, a casca de arroz é um produto renovável, o que faz com que a sua utilização esteja em acordo com os princípios da sustentabilidade (DELLA et al, 2006).

O processo de combustão da casca de arroz gera um grande volume de resíduos sem valor comercial e que podem se tornar agentes poluidores do ar e da água. Para minimizar o problema, órgãos ambientais, como o FATMA de Santa Catarina, têm exigido a instalação de um sistema constituído de silo separador e decantação para reter a cinza junto às beneficiadoras.

A utilização da casca de arroz como combustível é duplamente vantajosa, pois além de poupar a natureza com a substituição de combustíveis comuns pela casca, como acima mencionado, ainda provoca menos danos à atmosfera. Isto por que segundo Rovere (2003), a

deposição da casca de arroz em aterros sanitários resulta em emissões de metano para a atmosfera. A disposição da casca em aterros custa à indústria R\$50,00/tf.

A aplicação da CCA em compósitos à base de cimento tem como maior vantagem econômica a redução da utilização do cimento. O clínquer é a matéria-prima do cimento que mais necessita de energia (1450°C). Com a substituição de parte do cimento por cinza da casca de arroz, a economia se daria pela troca de um produto industrializado de custo relativamente alto por um “lixo industrial”, sem valor comercial e poluente.

As indústrias de beneficiamento de arroz poderiam se poupar de multas aplicadas por órgãos ambientais e possíveis indenizações por problemas de saúde causados pela má disposição do resíduo se este fosse utilizado como adição e ainda gerando renda suplementar para as mesmas.

Algumas empresas estrangeiras já demonstraram interesse na comercialização da cinza da casca de arroz, o que demonstra o grande potencial econômico do material.

E, do ponto de vista econômico a cinza da casca de arroz tem um futuro promissor, tendo em vista que o Brasil encontra-se entre os dez maiores produtores de arroz do mundo, colhendo mais de 13 milhões de toneladas, anualmente

## 2.7 CIMENTO PORTLAND

Petrucci (1998) define o cimento Portland como material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica.

Neville (1997) relata o processo de fabricação do cimento Portland que consiste, de maneira sucinta, em moer a matéria-prima, misturá-la em determinadas proporções e submetê-la à queima em fornos rotativos a elevadas temperaturas. O produto obtido na queima é o clínquer que é finamente moído. Para controlar a pega e o endurecimento, é acrescentado o gesso. Esse material pode receber outras adições, posteriormente, como a escória de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas ativas, etc.

O clínquer, quando reduzido a pó, tem composição química específica e propriedades físicas de cimento, contendo basicamente uma série de compostos anidros, dos quais os principais são:

- 1) silicato tricálcico ou alita ( $C_3S$ );
- 2) silicato dicálcico ou belita ( $C_2S$ );
- 3) aluminato tricálcico ( $C_3A$ );
- 4) ferroaluminato tetracálcico ou ferrita ( $C_4AF$ ).

O conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores (calor liberado e velocidade) que constituem essa reação é de grande importância para o uso prático do cimento Portland.

$C_3S$  – reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação; propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração;

$C_2S$  – responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e propicia alto desprendimento de calor, libera cerca de 40% de massa de hidróxido de cálcio (CH);

$C_3A$  – proporciona o desenvolvimento de resistências em idades mais avançadas, com baixa liberação de calor, produz cerca de 18% em massa de CH;

$C_4AF$  – desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque de sulfatos.

A resistência à compressão cresce com a concentração de cimento, quanto maior a quantidade de cimento adicionada a um solo ou a uma argamassa, mais resistente será o produto confeccionado, porém o consumo de cimento onera o produto final. Por outro lado, as argamassas empregadas na construção civil não requerem resistências à compressão simples tão elevadas, valores variando de 0,1MPa a 8,0MPa, podendo-se conseguir, substituindo o percentual de cimento por um material alternativo, que não venha prejudicar as propriedades mecânicas estabelecidas pelas normas.

A durabilidade dos materiais a base de cimento está relacionada com a estabilidade dimensional, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e natureza das ligações entre os seus diversos componentes (inorgânicos, sólidos, líquidos, cristalinos, não cristalinos). Um melhor entendimento sobre a relação entre a microestrutura e o desempenho dos materiais à base de cimento é importante para a compreensão dos fenômenos relacionados à sua durabilidade. Fenômenos associados ao desenvolvimento de resistência mecânica e à sua diminuição decorrem de processos na interface das partículas (ISAIA, 1995).

O mercado nacional dispõe de onze tipos básicos de cimento Portland, todos produzidos pela indústria brasileira de cimento. O Quadro 2 apresenta estes tipos de cimento com suas nomenclaturas e conteúdos de constituintes específicos em normas.

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filer Calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	-	-	-
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	-	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	-	6-14	0-10
Composto com Filer	CPII-F	25, 32, 40	94-90	-	-	6-10
Alto Forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	-	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	-	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	-	-	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Quadro 2 – Tipos de cimentos Portland comercializados no Brasil

Fonte: Meira, 2006. (- sem valor)

## 2.8 ARGAMASSAS

As argamassas são uma mistura de cimento, areia, água e, em alguns casos, de outro material como cal, saibro, barro, caulim, etc. As argamassas, assim como o concreto, também são moles nas primeiras horas, e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade.

Utilidades das argamassas:

- assentar tijolos e blocos, azulejos, ladrilhos, cerâmicas e tacos;
- impermeabilizar superfícies;
- regularizar, (tapar buracos, eliminar ondulações, nivelar e aprumar) paredes, pisos e tetos;
- dar acabamento às superfícies (liso, áspero, rugoso, etc.).

### 2.8.1 Tipos de argamassas

As argamassas são classificadas, segundo a sua finalidade, em:

#### 1) Argamassas para assentamento

As argamassas para assentamento são usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Servem também para a colocação de azulejos, tacos, ladrilhos e cerâmica.

#### 2) Argamassas para revestimento

As argamassas para revestimentos são aplicadas como revestimento na forma de chapisco, emboço e reboco. Todas as paredes e tetos devem receber uma camada de chapisco, qualquer que seja o acabamento. Sem o chapisco, que é a base do revestimento, as outras camadas podem descolar e até cair. Em alguns casos, como em muros, esse é o único revestimento.

Sobre o chapisco é aplicada uma camada de massa grossa ou emboço, para regularizar a superfície. Por último, vai a massa fina ou o reboco, que dá o acabamento final. Em alguns casos não é usado o reboco, por motivo de economia.

Azulejos, ladrilhos e cerâmicas são aplicados sobre o emboço. O acabamento de paredes mais econômico é o cimentado liso, aplicado diretamente sobre o chapisco. O chapisco, o reboco e o emboço não são usados em pisos. Se a superfície for muito irregular, convém aplicar inicialmente uma argamassa de regularização ou nivelamento.

### 2.8.2 Aplicação da cinza e da casca de arroz em argamassas

A casca de arroz é um dos resíduos mais versáteis que existe e pode virar aglomerado na produção de chapas de madeira, com baixo custo e altíssima qualidade. Pesquisadores evidenciaram que a casca do arroz também pode ser utilizada nos compostos de argamassa e cimento para a fabricação de pré-moldados. Isso pode reduzir até trinta por cento do custo da fabricação de casa populares, (PINHEIRO, 2007).

Trabalhos desenvolvidos propondo o uso dessa matéria-prima evidenciaram a sua adequação para fins de obtenção de materiais de construção. Na confecção de compósitos biomassa vegetal - cimento Portland, a casca de arroz, a exemplo de outras biomassas vegetais, responde pela leveza e pelas características de isolamento termo acústico do compósito; ao cimento Portland cabe a tarefa de envelopar a biomassa vegetal. A massa específica aparente do material é da ordem de  $1.850 \text{ kg/m}^3$  (dependendo do traço adotado) e sua resistência à compressão simples situa-se em torno de 9,0 MPa, (ZUCCO, 1999; BERALDO e TOJAL, 2001).

Martinez et al (2005), com a finalidade de reduzir impactos ambientais e gerar uma solução alternativa para as habitações populares, desenvolveram pesquisas com a utilização da casca de arroz na confecção de painéis de fechamento verticais em substituição aos tijolos cerâmicos, onde verificou as propriedades físicas e mecânicas, concluindo a viabilidade técnica e ambiental do produto.

## 2.9 ESTUDO DA DURABILIDADE

Considerando a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil dos produtos da construção civil e o elevado custo das obras civis, a avaliação da *durabilidade* é certamente o aspecto mais importante do desenvolvimento de um novo material (JONH, AGOPYAN e PRADO, 1997).

Sendo a habitação um bem de alto valor agregado, a principal característica que se deseja dela (ou a exigência do usuário) é a sua *durabilidade* e a *vida útil* de forma a poder se prever o tempo necessário para realização de manutenções ou substituição do produto.

Então para melhor entendimento, segue, segundo (Silva, 2002), algumas definições:

a) *durabilidade* é a capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço, para o qual foi projetado e construído, durante determinado período de tempo. A durabilidade do produto pode ser avaliada pelo seu tempo de vida em anos ou pela sua resistência a agentes que afetam seu desempenho;

b) *vida útil* é o período de tempo que, um material, componente construtivo ou edificação, mantém seu desempenho acima dos níveis aceitáveis, desde que sofram manutenções rotineiras.

Observaram-se na literatura consultada, que os estudos e pesquisas dos materiais, basicamente concentram-se nas suas propriedades mecânicas. A durabilidade dos materiais à base de cimento é um assunto que somente nos últimos tempos têm ganhado ênfase e, devido a sua importância, já absorve grande parte da atenção dos engenheiros e pesquisadores de maneira cada vez mais crescente, principalmente na produção de um novo produto. Segundo Oliveira (2004), nos últimos anos, tem-se realizado diversos estudos no sentido de se conhecer melhor algumas das propriedades dos materiais constituintes do concreto, assim como os aspectos que influenciam sua durabilidade. Estes estudos buscam, cada vez mais, alcançar a qualidade para que, desse modo, sejam projetadas estruturas mais duradouras.

Cada vez mais presente nas discussões, acerca das exigências dos compósitos à base de cimentos, a durabilidade é dada por um conjunto de fatores, relevando desde as suas propriedades

físicas e químicas até ao ambiente exposto. O Comitê 201 do ACI (American Concrete Institute) define como durabilidade do concreto de cimento Portland a capacidade deste resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou a qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Todavia, nenhum material é eternamente durável, a manutenção das estruturas sempre existirá independente dos materiais dos quais são constituídas. Hoje se observa uma preocupação maior com a qualidade de serviços e produtos para que resulte num menor custo de produção e de manutenção. Mehta e Monteiro (1994) definem que um material atingiu o final de sua vida útil quando as suas propriedades, sob dadas condições de uso, deterioraram a tal ponto que a continuação de seu uso é considerada como insegura ou antieconômica.

A tecnologia das estruturas de concreto segue para uma maior durabilidade com a adoção de concretos com resistências mais elevadas, apresentando reduzida relação a/c e baixa permeabilidade, controle de ações deletérias como a reação álcali-agregado, retrações hidráulica e plástica, etc. Sem dúvida alguma, a permeabilidade é a principal propriedade frente à durabilidade de concretos, sejam convencionais ou reciclados. As degradações químicas como a carbonatação, ataques por sulfatos e cloretos, etc., são proporcionais à permeabilidade do concreto.

A reação álcali-agregado tem ocasionado grandes preocupações no meio técnico, uma vez que pode comprometer a durabilidade de uma estrutura de concreto. Esta reação trata-se de uma manifestação patológica que se desenvolve em longo prazo, os principais efeitos desta reação são: fissuras, movimentações diferenciais causadas por expansões e perda de estanqueidade do concreto. Esta reação ocorre através de um processo químico onde alguns constituintes minerais como o feldspato, a calcedônia e a sílica amorfa do agregado reagem com hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, pozolanas e agentes externos, que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto, como produto da reação forma-se um gel higroscópico expansivo (NEVILLE, 1997).

Zordan (1997) mediu também a permeabilidade do ar de concretos com agregados reciclados e concluiu que as amostras ensaiadas apresentam valores de permeabilidade muito próximos dos resultados obtidos com o concreto de referência. Portanto, a durabilidade de concreto, seja ele convencional ou não, está diretamente relacionada com a permeabilidade do concreto, entre outras propriedades.

O estudo da durabilidade deve ter como base uma metodologia, a qual sugere que se faça a avaliação da capacidade de uma construção, ou de suas partes, de atender as necessidades dos usuários ao longo do tempo (JONH, 1987).

Para avaliação da durabilidade é possível recorrer a três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado (molhagem e secagem), ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso.

Os ensaios de envelhecimento acelerado envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a velocidade das reações químicas. Como na maioria das vezes a correlação destes resultados com os de envelhecimento natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa. Não é possível projetar um método de envelhecimento acelerado sem o conhecimento prévio e preciso dos fatores de degradação relevantes. Os ensaios de envelhecimento natural consistem em exposição de corpos-de-prova ao ambiente em questão. Quando se tratam de fatores climáticos o ensaio é, normalmente, feito por exposição com ângulo de 30° na direção norte (para o caso do hemisfério sul) (JONH, AGOPYAN e PRADO, 1997).

Os estudos de deterioração em uso envolvem o monitoramento de uma ou mais construções em condições reais de uso. É o que produz resultados mais confiáveis, desde que a amostra em análise seja considerada representativa e que se possa dispor de tempo suficiente para este fim (JONH, 1987).

Os indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da queda de desempenho do produto em uso. A seleção desse indicador é etapa importante do estudo, pois deve ser de fácil mensuração e, preferencialmente, correlacionado com o desempenho. Após cada período de degradação deveriam ser repetidos todos os ensaios e avaliações de desempenho relativo às demais necessidades dos usuários, mas este procedimento é dispendioso e desnecessário, porque, na maioria das vezes, a degradação afeta apenas o desempenho relativo a algumas necessidades, (OLIVEIRA, 2004).

Com respeito às características ambientais e a avaliação de desempenho propõe-se que o novo material (bloco alternativo) considerado como vedação ou estrutural, com e sem revestimento (com e sem proteção), deve ser durável, quando exposto às condições externas típicas do Brasil, portanto exposto a efeitos de chuva e sol (molhagem e secagem – quick condensation test – QCT). O material deve também resistir à exposição prolongada a umidade, típica de área de banheiro, incluindo a de águas servidas, como água com sabão e outros resíduos

normalmente presentes nas habitações. A simulação dessa situação pode ser feita através de ensaios acelerados de molhagem e secagem (OLIVEIRA, 2004).

Segundo John e Ângelo (2002) a avaliação da durabilidade inicia-se pelo entendimento dos fatores de degradação do produto, compreendido como todos os agentes capazes de provocar transformações no produto, de tal ordem que afetem o seu desempenho ou a sua capacidade de impacto no ambiente e os mecanismos pelos quais estes agem. Trata-se de conhecimento específico de ciências e engenharia de materiais. A ASTM 632 E apresenta uma lista de fatores de degradação, incluindo fatores de carga, fatores ambientais, fatores biológicos e fatores de uso e incompatibilidade física ou química com os produtos do entorno (Quadro 3).

Fatores ambientais:	Fatores de incompatibilidade:
Radiação	Química
Temperatura	Física
Água	Fatores Biológicos:
Constituintes do ar e poluentes	Roedores
Gelo/degelo	Fungos
Vento	Bactérias
Fatores de carregamento:	Fatores de uso:
Deformação lenta	Desgaste
Fadiga	Atividades de manutenção
Água e seus derivados	Projeto
Cargas de uso	

Quadro 3 – Fatores de degradação.

Fonte: John e Ângelo (2002).

Entendidos os fatores e mecanismos de degradação relevantes nas diferentes aplicações do produto, são realizados ensaios de envelhecimento natural, envelhecimento acelerado e envelhecimento em uso. O primeiro objetivo desses ensaios é confirmar os mecanismos de degradação previstos. Uma vez confirmados esses mecanismos de degradação, são selecionados indicadores de degradação, variáveis mais facilmente quantificáveis, que permitem acompanhar a evolução da degradação com o tempo e que podem ser correlacionadas com o desempenho do produto, e os ensaios prosseguem.

A finalidade do estudo de durabilidade é estimar a vida útil, definida como o período durante o qual o produto vai apresentar desempenho satisfatório, nas diferentes condições de uso. Trata-se de um processo complexo e demorado, no entanto fundamental.

Sendo hoje, vários tipos de resíduos aproveitados na elaboração de novos materiais de construção, materiais alternativos, é condição fundamental a avaliação do comportamento desses materiais, no quesito durabilidade, sem descartar as demais propriedades que já vêm sendo avaliadas.

### **2.9.1 Envelhecimento acelerado (ciclos de molhagem e secagem)**

A durabilidade dos compósitos com adições minerais alternativas é considerada, por diversos autores, como sendo o problema mais crítico destes compósitos. Conhecer a vida útil em função do uso é uma pergunta ainda sem respostas.

Flauzino (1998) apresentou as metodologias que vêm sendo utilizadas pelo IPT, relativas à durabilidade dos materiais. Este autor relatou que a validação da vida útil consiste em se medir o grau de envelhecimento, ao longo do tempo, de uma característica relevante do material ou componente, característica esta escolhida de acordo com a natureza do material e com a função do componente na edificação. O autor relatou os agentes de degradação que afetam a durabilidade dos materiais, distribuindo-os em quatro grupos: agentes provenientes da atmosfera, do solo, relativos ao uso e decorrentes do projeto. Estas metodologias, desenvolvidas para avaliação da durabilidade de materiais e componentes das edificações de forma geral, abordam as seguintes etapas: identificação das propriedades e dos agentes agressivos e determinação do comportamento antes e após exposição ao envelhecimento natural e/ou acelerado.

Jonh et al (1997) discorrendo sobre os agentes de degradação em compósitos, explicam que os principais agentes que podem degradar os compósitos são: hidratação do cimento, a água e a temperatura.

Estudando compósitos desenvolvidos com fibras de sisal, Agopyan et al (1997) realizaram ensaios acelerados de durabilidade com ciclos alternados de molhagem e secagem, ensaios de carbonatação e ensaios de envelhecimento natural.

Freire (1999), referindo-se ao trabalho de Mehta (1997) sobre resistência de cimentos hidráulicos produzidos a partir de cinza de casca de arroz, enumerou várias alternativas de ensaios de durabilidade, tais como:

- Ensaios de durabilidade em corpos-de-prova cilíndricos de concreto moldado com cimento comum e cimento de cinza de casca de arroz, imersos em solução de ácido láctico a 2%, por um período de 7 dias;

- Ensaio de imersão em solução a 1% de ácido clorídrico, ácido acético e ácido láctico por um período de 8 meses;
- Ensaio de imersão por um período de 1.500 horas em solução de HCL (ácido clorídrico) ou  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico) a 5%.

Estes ensaios indicaram que corpos-de-prova de cimento e cinza de casca de arroz são mais resistentes sob todas as condições estudadas, enquanto que cimentos comuns se enfraquecem e até mesmo se desintegram em alguns casos.

Gram (1988) aplicou ensaios de envelhecimento acelerado em placas de compósitos com sisal. Os ciclos de molhagem e secagem utilizados pelo autor foram de 6h.

Akers e Studinka (1989) estudaram o envelhecimento acelerado em placas de concreto, com ciclos de 8h em imersão em água a 20°C e 9h em estufa a 80°C, descansando por 1h para baixar a temperatura. Os autores avaliaram as propriedades mecânicas e físicas dos materiais ensaiados e observaram um aumento da resistência quando comparados aos expostos ao meio ambiente normal, concluindo que este aumento pode ser atribuído ao aumento de massa específica dos compósitos.

Lee et al (1990) apresentaram um estudo do envelhecimento realizado em painéis pré-fabricados usados em paredes e muros. Os painéis foram submetidos a ciclos alternados de molhagem e secagem, consistindo da exposição, durante 3h a uma chuva fina e posterior secagem ao ar, durante 1h a 60°C.

Jonh (1994) apresentou uma técnica de utilização de cimentos de escória sem clínquer para fabricação de painéis pré-moldados, realizando estudos de durabilidade através de ensaios de envelhecimento acelerado e ensaios de envelhecimento natural. O ensaio de envelhecimento acelerado consistiu de ciclos de molhagem e secagem (QCT), compreendendo 8h de molhagem e 8h de secagem, num total de 680h. A perda de resistência observada foi julgada tecnicamente irrelevante.

Savastano Júnior (2000) reportaram ensaios de envelhecimento acelerado baseados na prescrição da ASTM G – 53, empregando ciclos de duração, sendo 4h sob luz ultravioleta e 4h sob aspersão de água potável. A simulação, assim como a manutenção dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório, levou a aumentos na resistência atribuídos ao favorecimento na hidratação do aglomerante empregado. O autor considerou, então, os ciclos pouco válidos para a simulação do envelhecimento dos compósitos, recomendando a utilização de ciclos por

umedecimento por imersão e secagem por aquecimento, em conjunto com a utilização da carbonatação acelerada.

Silva (2002) planejou seus ensaios de envelhecimento acelerado visando simular ação das intempéries através de ciclos molhagem e secagem, sendo 6h de imersão em água potável seguida de 6h de secagem em estufa com circulação de ar à temperatura de 60°C, realizando 10, 20 e 40 ciclos.

Segundo a ASTM D1037 (1990), a temperatura, além de ser a responsável pela ativação da oxidação, é também a responsável pela velocidade da ação de degradação. Os ensaios desenvolvidos para este caso, também chamados de envelhecimento acelerado, consistem basicamente em se colocar uma amostra numa estufa com temperatura controlada. A temperatura é aumentada gradativamente até que ocorra a deterioração da amostra, definida como alteração na aparência, peso, dimensão ou outra propriedade característica do material.

Farias Filho (2007) estudou argamassas produzidas com resíduos de construção civil e granito, através do envelhecimento natural e acelerado, por ciclos de molhagem e secagem e verificou, após 60 dias de cura, alterações no comportamento mecânico das argamassas.

## 2.10 CONSIDERAÇÕES

A literatura consultada é unânime ao afirmar que é importante a análise da durabilidade em materiais em geral e, particularmente, em materiais alternativos de construção. Alguns trabalhos recentes já oferecem subsídios ao estudo da durabilidade através do processo de envelhecimento acelerado, porém verifica-se, diante dos trabalhos citados anteriormente, que não existe um consenso no que se refere à quantidade de ciclos de molhagem e secagem aos quais os materiais serão expostos.

Verifica-se que a análise de durabilidade em materiais alternativos encontra-se, ainda, em fase inicial, apesar do tema não ser recente, havendo um longo caminho a ser percorrido. A durabilidade dos compósitos com adições minerais e seu comportamento em serviço, são respostas que ainda precisam ser dadas, assim como a determinação de sua vida útil em serviço, porém esta etapa leva bastante tempo.

A extração da sílica da casca de arroz, além de aproveitar um resíduo agrícola normalmente desprezado e poluente, é um recurso renovável inédito na construção civil, servindo de alternativas às sílicas obtidas como resíduos da produção de ligas de ferro-silício ou silício metálico, que têm um custo elevado. A tendência do aproveitamento integral de resíduos pelos

diversos setores é uma necessidade cada vez maior na indústria moderna, especialmente quando esta busca a certificação ISO 14000.

Desta forma este trabalho serve como subsídio ao estudo da adição ou substituição da casca e cinza de casca de arroz em compósitos à base de cimento, neste caso, as argamassas, usadas na construção civil, podendo esta cinza atuar como uma pozolana de boa qualidade, dependendo de suas propriedades, tempo e temperatura de queima, processo de moagem, dentre outras.

## CAPÍTULO III

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário definir as variáveis independentes e as dependentes. As variáveis de estudo foram definidas com base nos objetivos da pesquisa. Como a finalidade deste trabalho baseia-se em estudar a durabilidade de argamassas, convencionais e com incorporação de resíduos, desconsideraram-se algumas variáveis, relacionadas às propriedades do concreto, por terem mais relevância para o concreto armado, devido à presença de armaduras.

##### 3.1.1 Variáveis

As variáveis independentes são as variáveis que, uma vez definidas, serão mantidas fixas até o final do experimento, ou seja, as variáveis que são funções dos materiais a serem utilizados, dos traços dos corpos-de-prova das argamassas e do período de cura a que foram ensaiados, assim como das demais condições pré-estabelecidas, sendo: tipo de CCA (amorfa ou cristalina), percentual de substituição do aglomerante por cinza de casca de arroz (CCA), percentual de substituição do agregado miúdo por casca de arroz (CA) e tipo de cura.

As variáveis dependentes foram determinadas como sendo: consumo de cimento, relação água-aglomerante, resistência à compressão simples, absorção de água, densidade aparente, análise térmica diferencial e difração de raios X. As variáveis dependentes estão relacionadas com o acompanhamento da durabilidade dos corpos-de-prova de argamassa, através do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem. A Figura 3.1 apresenta as variáveis em estudo.

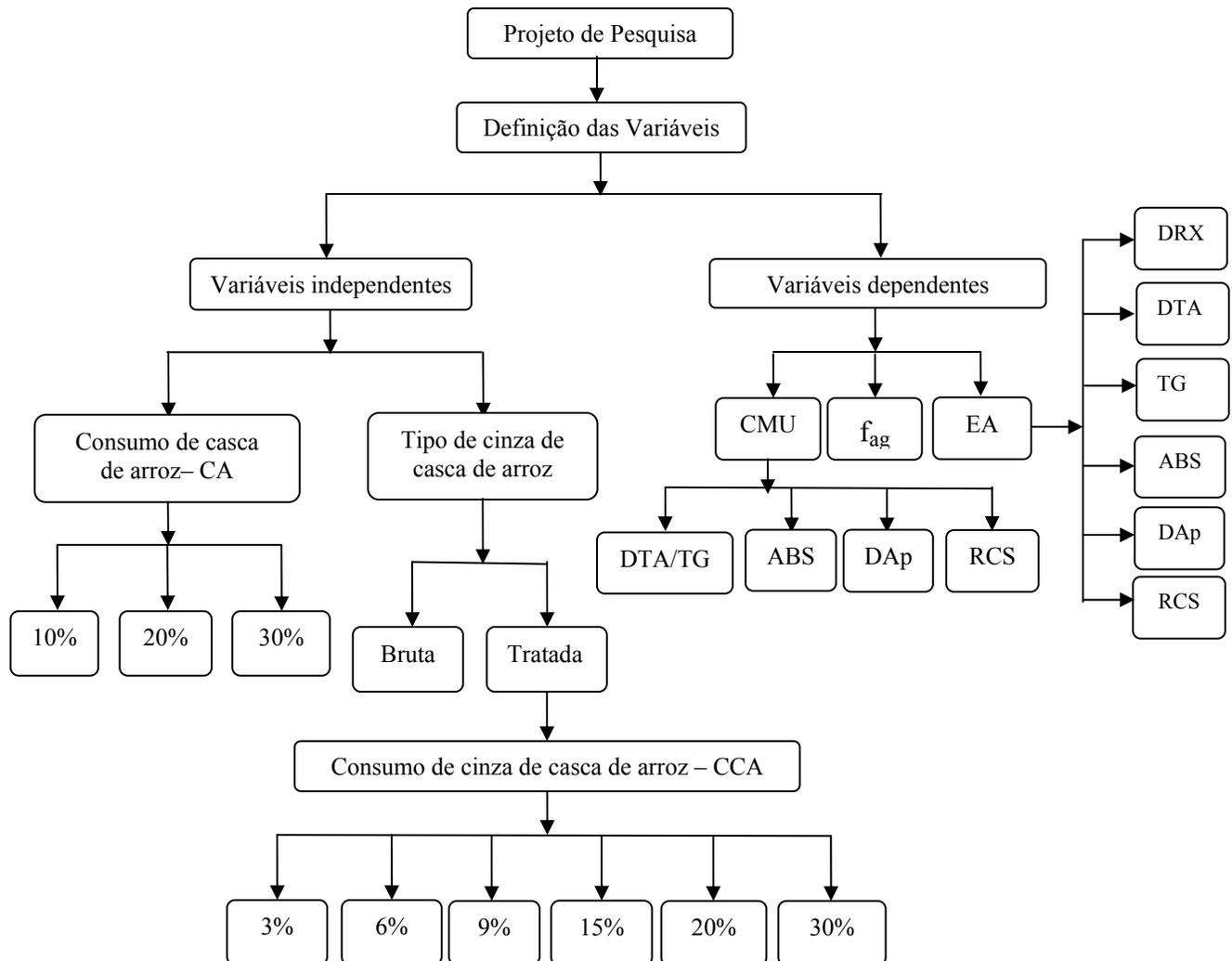


Figura 3.1 – Fluxograma das variáveis em estudo.

LEGENDA: CA = casca de arroz; CCA = cinza de casca de arroz; RCS = resistência à compressão simples; ABS = teor de absorção de água; DAp = densidade aparente; DRX = difração de raios X; DTA = análise térmica diferencial; TG = termogravimetria; CMU = cura em meio úmido; fa/ag = relação água- aglomerante; EA = envelhecimento acelerado.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

a) Cimento (C) – Foi utilizado cimento Portland composto com filler, CPII-F, da marca NASSAU, fabricado pela Companhia de Cimento NASSAU, na cidade de Recife – PE. Este cimento foi escolhido por não apresentar pozolana em sua composição, uma vez que o uso da cinza em substituição à parte do cimento tem este objetivo. O cimento foi adquirido na indústria, sendo todos os sacos de um mesmo lote, e acondicionado em sacos plásticos, para evitar seu envelhecimento.

b) Agregado miúdo (AM) – O agregado miúdo utilizado foi areia oriunda do Rio Paraíba, armazenada e devidamente identificada. Esta areia foi seca em estufa a uma temperatura de 110°C, passada na peneira de abertura 4,8 mm, sendo desprezado o material retido, com a finalidade de diminuir a influência da zona de transição entre o agregado e a pasta.

c) Casca de arroz (CA) – Foi utilizada casca de arroz proveniente da cidade de Caicó/RN, a qual foi armazenada e identificada para posterior uso nos traços de argamassas, em substituição à parte do agregado miúdo.

d) Cinza de casca de arroz (CCA) – A cinza empregada foi proveniente da queima da casca de arroz, em mufla, a temperatura de 600°C por duas horas, em atmosfera oxidante.

e) Água – Foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba, para o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande/ PB.

### 3.3 METODOLOGIA

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma com todas as etapas dos ensaios utilizados nesta pesquisa.

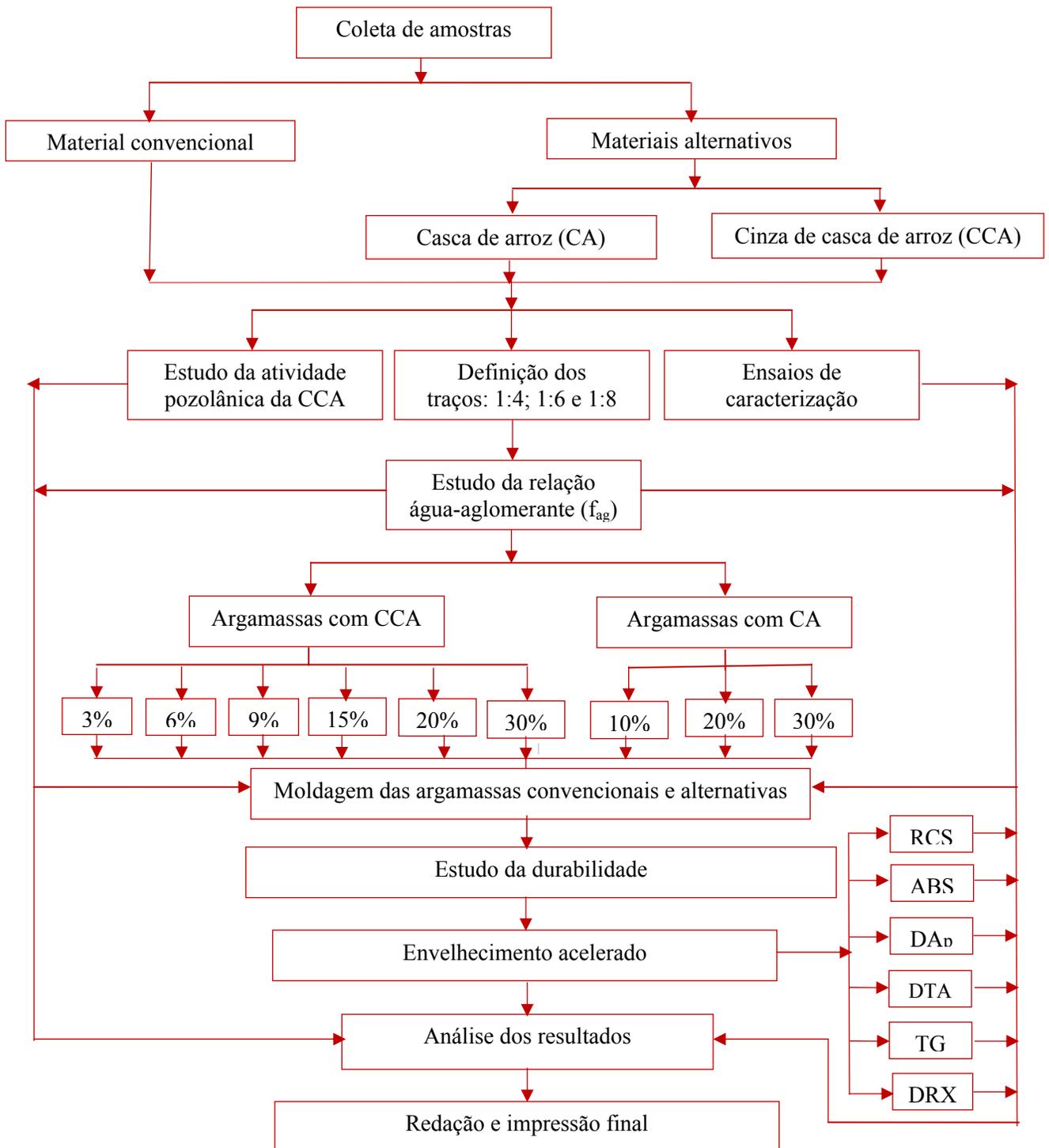


Figura 3.2– Fluxograma para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3.3.1 Produção da cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz, denominada CCA, utilizada neste trabalho, foi produzida através da queima em mufla da marca Quimis, na temperatura de 600°C, por duas horas. Em seguida foi submetida a um processo de beneficiamento em moinho de bolas (Marconi MA 701/21/E), por um período de duas horas e, após esta moagem, o material foi passado em peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e armazenado.

### 3.3.2 Estudo da atividade pozolânica

Para um material ser considerado pozolânico e possa ser substituído pelo cimento é necessário estudo prévio da sua atividade pozolânica. Avaliou-se a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz com o cimento Portland e com a cal, de acordo com o método prescrito pelas normas da ABNT, NBRs 5752 (1992) e 5751 (1992), respectivamente. Conforme recomenda a norma, o ensaio da atividade pozolânica com o cimento foi realizado utilizando-se duas misturas de argamassas, uma mistura com cimento e outra que substitui 35% da massa do cimento Portland pelo material a ser ativado, neste caso a cinza de casca de arroz. O índice de atividade pozolânica (IAP) é dado pela relação entre a resistência à compressão simples da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência. Considerando-se como material pozolânico quando o índice de atividade pozolânica for superior a 75%.

No ensaio de atividade pozolânica com a cal, o resultado é dado através da resistência à compressão simples após 7 dias de cura em ambiente com temperatura controlada. Este ensaio é uma medida direta do grau de pozolanicidade através da determinação da resistência a compressão simples, conforme NBR 7215 ABNT (1996), utilizando corpos-de-prova de argamassas confeccionados com o material que se deseja verificar a atividade pozolânica, neste caso a cinza de casca de arroz, cal, areia e água, curados nos próprios moldes durante  $24 \pm 2$  h a temperatura de  $23 \pm 2$  °C e durante seis dias a temperatura de  $55 \pm 2$  °C, após este período, os corpos-de-prova são rompidos e calcula-se a resistência à compressão simples, que não pode ser inferior a 6,0MPa.

### 3.3.3 Caracterização física

Os ensaios da caracterização física para os materiais empregados foram: finura na peneira ABNT, nº 200 (0,074mm) pela NBR 11579 (1991), massa específica real pelo método da ABNT, NBRs 6474 (1998) e 9776 (1987), massa unitária no estado solto pelo método da ABNT NBR 7251 (1982), superfície específica (Blaine) usando a ABNT NBR 7224 (1984); análise granulométrica por difração de laser (cimento e cinza de casca de arroz), análise granulométrica por peneiramento (areia, segundo norma da ABNT NBR 7217, 1987); e teor de materiais pulverulentos, ABNT NBR 7219 (1982).

### 3.3.4 Caracterização mineralógica

#### 3.3.4.1 Análise química

Realizou-se uma análise química clássica, onde normalmente se determina: perda ao fogo, matéria orgânica e os óxidos presentes, tais como:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ . Estas análises foram realizadas segundo métodos do Laboratório de Análise Mineralis do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande/PB.

#### 3.3.4.2 Difração de raios X

A difração de raios X foi empregada para caracterização mineralógica das matérias-primas convencionais e alternativas e nos produtos de hidratação de pastas. Foi utilizado um Difratorômetro SHIMADZU XRD-6000 (Anexo 1) com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, modo fixe time, com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6s, com ângulo 2 $\theta$  percorrido de 10° a 60°.

#### 3.3.4.3 Análise térmica

Com o objetivo de conhecer o comportamento térmico (estabilidade e decomposição) das matérias-primas convencionais e alternativas e dos produtos de hidratação de pastas, ou seja, as faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações endo e exotérmicas foram realizadas análises termogravimétricas (TG) e termodiferenciais (DTA) através do aparelho de Análises Térmicas, Modelo BP Engenharia, Sistemas de Análises Térmicas, RB 3020, com taxa de aquecimento de 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada foi de 1000°C e o padrão utilizado na DTA foi o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) calcinado.

#### *3.3.4.4 Granulometria a laser*

A análise granulométrica por difração a laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associada com um processo de medida óptica. Neste método é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas.

Para realização desse ensaio as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), dispersas em 250ml de água destilada em agitador a velocidade de 17000rpm por 10min. Em seguida a dispersão foi colocada em um equipamento Modelo 1064 da CILAS, em modo úmido, até atingir a concentração ideal, que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

#### **3.3.5 Estudo do teor de absorção de água da casca de arroz**

Como a casca de arroz tem uma estrutura porosa e, conseqüentemente, absorve muita água, fez-se necessário um estudo prévio do teor de absorção deste resíduo, para ter um controle sobre o fator água-aglomerante da moldagem das argamassas e evitar alterações na quantidade de água da moldagem. Este estudo foi realizado em um período de 24h, onde se verificou o tempo de absorção máxima.

Um resumo de todos os ensaios realizados no desenvolvimento desta pesquisa encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados nesta pesquisa.

AGREGADOS		AGLOMERANTES		ARGAMASSAS
Miúdo	Casca de arroz (alternativo)	Cimento	Cinza de casca de arroz (alternativo)	Argamassas
Secagem	Secagem	Área específica	Área específica	Estudo da relação água-aglomerante
Granulometria	Granulometria	Finura na #200	Finura na #200	Moldagem das argamassas
Massa unitária	Massa unitária	Massa unitária	Massa unitária	Resistência à compressão simples (RCS)
Massa específica real	Massa específica real	Massa específica real	Massa específica real	Absorção (ABS)
Teor de materiais pulverulentos	Estudo do teor de absorção de água da CA	Tempo de pega e RCS	Estudo da atividade pozolânica	Durabilidade: Cura em meio úmido
		Análise térmica: TG e DTA	Análise térmica: TG e DTA	x Envelhecimento acelerado
		Análise química	Análise química	Densidade aparente
		Granulometria a laser	Granulometria a laser	Análise térmica: TG e DTA
		Difração de raios X	Difração de raios X	Difração de raios X

### 3.3.6 Ensaios Tecnológicos

Os ensaios tecnológicos foram divididos em quatro etapas: a primeira consiste no estudo da relação água-aglomerante para as argamassas e definição dos traços. A segunda etapa consiste na moldagem dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e alternativas, incorporadas com resíduos, e avaliação dos parâmetros de absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão simples, quando expostos ao processo de cura em meio úmido, por períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias. A terceira etapa consiste em estudos de caracterização dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e alternativas, através do envelhecimento acelerado (por ciclos molhagem e secagem) com o objetivo de verificar as fases formadas após o envelhecimento. A quarta etapa consiste em estudar a durabilidade através do envelhecimento acelerado (por ciclos molhagem e secagem), avaliando as propriedades de absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão simples, por períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

### 3.3.6.1 Estudo da relação água-aglomerante ( $f_{ag}$ )

O consumo de água em concretos e argamassas com adições minerais depende da forma e superfície específica de suas partículas e da quantidade utilizada como incorporação em substituição ao cimento (DAL MOLIN et al, 2004).

As argamassas tiveram traços variando tanto os teores de cinza e casca de arroz quanto o peso da areia, em relação à proporção de cimento, desta forma fez-se necessário um estudo preliminar da relação água-aglomerante para cada traço, com a finalidade de definir a quantidade de água ideal para a moldagem dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e alternativas, com a incorporação de resíduos.

Para a determinação da relação água-aglomerante a ser empregada confeccionou-se cinco corpos-de-prova cilíndricos (5cm x 10cm) para cada traço de argamassa, variando o fator água-aglomerante, de um valor mínimo a um valor onde atingisse a  $RCS_{máx}$ . Adotou-se como relação água-aglomerante para aquele traço o que apresentasse maior resistência à compressão simples aos 7 dias de cura. A Tabela 3.2 abaixo apresenta um exemplo de como foi realizada esta avaliação. Observa-se que nesta metodologia não se considerou o parâmetro trabalhabilidade.

Tabela 3.2 – Estudo da relação água-aglomerante ( $f_{ag}$ )

Traços		Corpos-de-prova (Q)	$f_{ag}$
Convencional	1:4	5	0,40
		5	0,45
		5	0,50
		5	0,55
Convencional	1:6	5	0,60
		5	0,65
		5	0,70
		5	0,75
Convencional	1:8	5	0,60
		5	0,65
		5	0,70
		5	0,75

$f_{ag}$  = relação água-aglomerante;  $RCS_{máx}$  = resistência à compressão simples máxima.

A variação da relação água-aglomerante adotada inicialmente foi baseada em dados da literatura, principalmente em estudos de Oliveira (2004), onde os teores adotados estão dentro destas faixas de variação, para os mesmos traços estudados. Para cada traço fez-se o estudo com

quatro relações água-aglomerante ou mais, dependendo do comportamento da resistência à compressão simples, aos sete dias de cura.

### 3.3.6.2 Preparação das argamassas

Os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com teores de 10%, 20% e 30% de resíduos de casca de arroz (CA) em substituição ao agregado miúdo foram preparados nos traços 1:4, 1:6 e 1:8 (aglomerante: agregado miúdo: casca de arroz) com relação água-aglomerante variando de acordo com o estudo realizado anteriormente. Porém, deve ser enfatizado que a relação água-aglomerante nos traços com incorporação da casca de arroz foi corrigido com os valores de absorção de água da casca de arroz, uma vez que esta tem um alto índice de absorção, fator que poderia alterar a relação água-aglomerante.

Para cinza de casca de arroz foram utilizados os mesmos traços, porém com incorporação de cinza de casca de arroz, nas proporções de 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%. Percentuais de 5% e 10% foram empregados em estudos de Costa Filho (2005). Assim vislumbrou-se que seria interessante o estudo de maiores teores e de teores semelhantes para comparação.

A cinza de casca de arroz (CCA) passou por um processo de moagem no moinho de bolas e, em seguida, foi passada em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). Na Figura 3.3 e Tabela 3.3 estão apresentados o fluxograma da decomposição dos traços e os traços utilizados nas moldagens dos corpos-de-prova de argamassas incorporados com resíduos, sendo 10 traços para cada composição (argamassa), totalizando, 30 traços: 3 convencionais (sem incorporação do resíduo), 18 alternativos com CCA e 9 com CA.

Esquema:

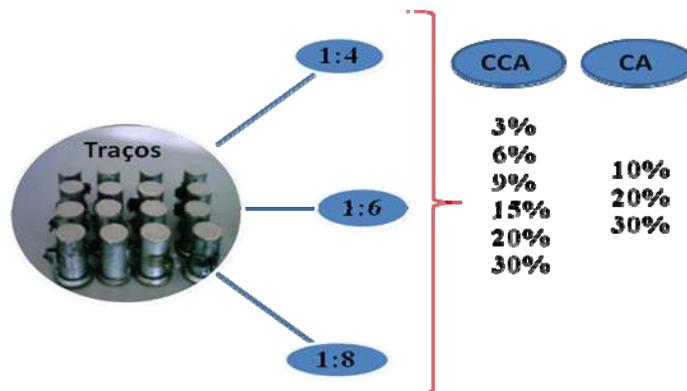


Figura 3.3 – Fluxograma da decomposição dos traços utilizados.

Tabela 3.3 – Dosagens empregadas na moldagem das argamassas.

Traços convencionais	Traços com substituição de AM por CA	Traços com substituição do C por CCA
1:4 C: AM	1:3,6:0,4	(0,97:0,03):4
	1:3,2:0,8	(0,94:0,06):4
	1:2,8:1,2	(0,91:0,09):4
		(0,85:0,15):4
		(0,80:0,20):4
		(0,70:0,30):4
1:6 C: AM	1:5,4:0,6	(0,97:0,03):6
	1:4,8:1,2	(0,94:0,06):6
	1:4,2:1,8	(0,91:0,09):6
		(0,85:0,15):6
		(0,80:0,20):6
		(0,70:0,30):6
1:8 C: AM	1:7,2:0,8	(0,97:0,03):8
	1:6,4:1,6	(0,94:0,06):8
	1:5,6:2,4	(0,91:0,09):8
		(0,85:0,15):8
		(0,80:0,20):8
		(0,70:0,30):8

Legenda: C = cimento; AM = agregado miúdo (areia);  
CA = casca de arroz e CCA = cinza de casca de arroz.

### 3.3.6.3 Moldagem dos corpos-de-prova de argamassa

Após a definição da relação água-aglomerante e do estudo da atividade pozolânica da cinza de casca de arroz, os corpos-de-prova foram moldados em forma cilíndrica com dimensões de 5cm x 10cm com e sem substituição dos resíduos, de acordo com a norma da ABNT NBR 7215 (1996), em seguida foram curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

Após cura foram determinadas as propriedades físico-mecânicas: absorção de água (ABS), densidade aparente (D<sub>ap</sub>) e resistência à compressão simples (RCS), dos corpos-de-prova de argamassas de acordo com as normas da ABNT NBR 9798 (1994) e NBR 7215 (1996) e o estudo da durabilidade através do envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem, nos mesmos períodos de cura.

#### *3.3.6.4 Ensaio de absorção de água por imersão (ABS)*

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado de acordo com as normas da ABNT, NBR 9778 (1994), após períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias. Foram moldados vinte e cinco (25) corpos-de-prova para cada composição sendo cinco para cada período de cura.

#### *3.3.6.5 Avaliação de densidade aparente (DAp)*

Esta propriedade tem como finalidade avaliar a massa específica aparente das argamassas incorporadas com os resíduos de cinzas e casca de arroz e seu estudo é importante pelo fato de estar se usando materiais com características porosas (CA) e materiais com grande área específica (CCA). Este ensaio foi realizado conforme procedimentos da ABNT, NBR 13280 (2005), após períodos de cura de 28 e 360 dias. Foram usados os mesmos corpos-de-prova do ensaio de absorção de água.

#### *3.3.6.6 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)*

Os ensaios de resistência à compressão seguiram os procedimentos indicados pela norma brasileira NBR 7215 (1996) da ABNT, utilizando cinco corpos-de-prova por traço por argamassa estudada. Foram verificadas as resistências à compressão simples para as idades de 28, 63, 91, 180 e 360 dias de moldagem, para o processo de cura em meio úmido bem como para o envelhecimento acelerado, em prensa de fabricação da Contenco, própria para argamassas, calibrada periodicamente pela Norma da ABNT NBR 6674 (2002).

#### *3.3.6.7 Avaliação do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem*

Este estudo tem como finalidade avaliar o comportamento mecânico das argamassas com e sem incorporação de resíduos, através do envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem, por períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias. Utilizou-se neste ensaio, como uma análise complementar, análise termogravimétrica e difração de raios X (no início, meio e fim do processo), com a finalidade de avaliar a perda de massa das argamassas ao longo do estudo do envelhecimento acelerado bem como verificar as transformações mineralógicas. Para os ensaios de análise térmica diferencial (DTA), análise termogravimétrica (TG) e difração de raios X (DRX), utilizaram-se os corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão simples, onde após o rompimento, estas argamassas foram moídas no moinho de bolas, passadas na peneira nº

200 (0,074mm) e acondicionadas em recipientes fechados até a data do ensaio. Os ensaios de análise termogravimétrica e difração de raios X foram realizados para as idades de cura de 28, 91, 180 e 360 dias.

Neste ensaio os corpos-de-prova foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem, sendo cada ciclo com duração de 24h, de acordo com o programa apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Cronograma dos ciclos de molhagem e secagem.

Após o período de cura por imersão em água, por 28 dias, iniciou-se o processo de envelhecimento acelerado das argamassas, submetendo os corpos-de-prova a dez ciclos de molhagem e secagem, em cada período de cura, totalizando cinquenta ciclos. O ciclo de molhagem teve duração de 13h, em câmara úmida, e o de secagem de 10h em estufa, à temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 2$ , tendo um intervalo de 30min, ao sair de cada câmara. A Figura 3.5 apresenta os corpos-de-prova quando submetidos à secagem na câmara climatizada (estufa).



Figura 3.5 – Processo do envelhecimento acelerado – estufa.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

##### 4.1.1 Matérias primas convencionais

Na Tabela 4.1 encontram-se os resultados obtidos para as propriedades físico-mecânicas do cimento e sua comparação com os limites especificados pelas normas da ABNT.

Tabela 4.1 – Resultados das propriedades físico-mecânicas do cimento.

Ensaio físico	Normas da ABNT	Limites:	Resultados Cimento
Finura malha nº 200 (%)	NBR 11579 (1991)	$\leq 12$	4,38
Massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR 6474 (1991)	-	3,04
Massa unitária solta ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR 7251 (1982)	-	1,15
Área específica (Blaine) $\text{cm}^2/\text{g}$	NBR NM 76 (1998)	$\geq 2600$	4.866,42
Tempo de pega (h:min)	NBR NM 65 (2003)	$\geq 1:00$	2:03
		$\leq 10:00$	3:40
Ensaio mecânico			Resultados
Resistência 3 dias (MPa)	NBR 7215 (1996)	$\geq 10$	24,00
Resistência 7 dias (MPa)		$\geq 20$	31,20
Resistência 28 dias (MPa)		$\geq 32$	38,70

Analisando os valores contidos na Tabela 4.1, observa-se que os resultados das propriedades físico-mecânicas do cimento estão de acordo com os valores especificados pelas normas da ABNT. O módulo de finura, na peneira da ABNT, nº 200 (0,074mm), obtido para o cimento foi de 4,38%, estando inferior ao máximo estabelecido pela norma NBR 11579 (1991), ou seja, 12%. Com relação à massa específica real, o valor encontrado foi de  $3,04 \text{ g}/\text{cm}^3$  e para a massa unitária foi de  $1,15 \text{ g}/\text{cm}^3$ . O valor da superfície específica foi de  $4.866,42 \text{ cm}^2/\text{g}$ , estando de acordo com as especificações da norma NBR NM 76 (1998).

Na Figura 4.1 está apresentada a curva de distribuição granulométrica do cimento empregado neste trabalho.

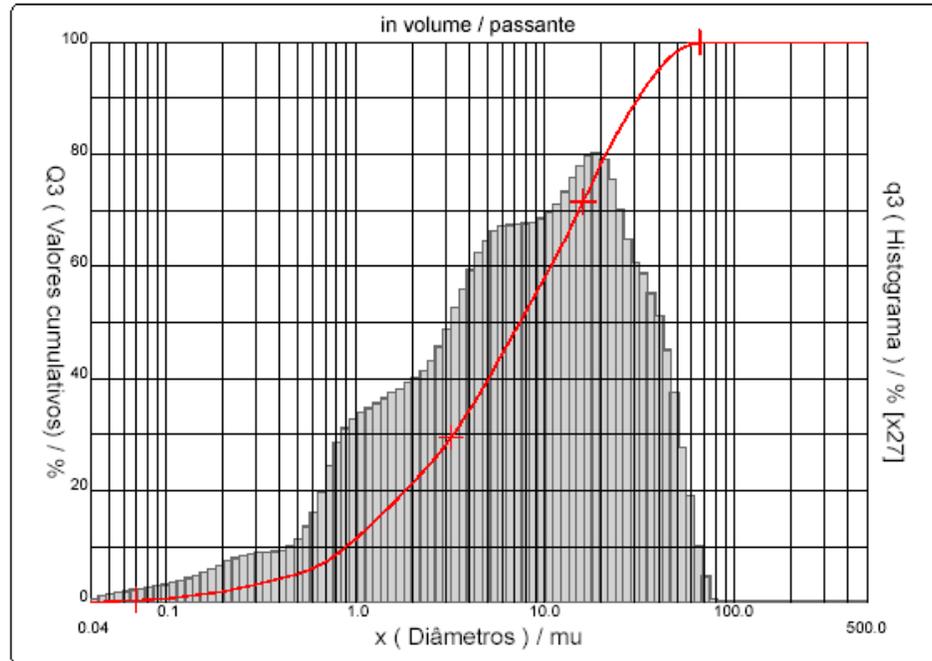


Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica por difratometria a laser do cimento Portland.

Analisando-se a curva de distribuição granulométrica do cimento Portland mostrado na Figura 4.2 observou-se que este apresentou curva com comportamento multimodal com pico em  $20\mu\text{m}$  e tamanho médio de partículas de  $12,18\mu\text{m}$ , com  $D_{10}$  de  $0,90\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $7,41\mu\text{m}$  e  $D_{90}$  de  $31,21\mu\text{m}$ .

Analisando as características apresentadas pelo cimento verificou-se que estas o qualificam para o emprego tanto em concretos de resistência convencional ou de alto desempenho quanto em argamassas. De acordo com Neville (1997) apud Cordeiro (2006), um cimento ideal para emprego em compósitos à base de cimento, do ponto de vista reológico, não deve ser muito fino e deve apresentar baixo teor de  $C_3A$ , cuja atividade é facilmente controlada pelos íons sulfato, provenientes da dissolução dos sulfatos do cimento Portland.

Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados obtidos da composição química do cimento Portland CII-F 32.

Tabela 4.2 – Composição química do cimento Portland CII-F 32.

Ensaio realizado		Cimento
Perda ao fogo (%)		4,80
Análise* Química (%)	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	29,22
	Óxido de magnésio (MgO)	2,40
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12,69
	Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,32
	Óxido de cálcio (CaO)	44,80
	Álcalis totais	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)
(%)	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,51
Resíduo insolúvel (RI)		0,58

\*Laboratório de análises minerais da UFCG.

Observou-se na Tabela 4.2 que o cimento tem elevado teor de óxido de cálcio, quando comparado aos demais óxidos e baixo teor de dióxido de silício, com valores de 44,80% e 29,22%, respectivamente. Os demais óxidos encontrados na composição química do cimento, como principais impurezas, apresentaram valores inferiores a 3%.

As características químicas apresentadas para o cimento permitem utilizá-lo em aplicações gerais: podendo ser usado no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros, (NBR 11578, 1991).

Os resultados da difração de raios X para o cimento estão apresentados nas Figuras 4.2, onde observou-se que o cimento Portland é constituído por vários materiais cristalinos, basicamente silicatos de cálcio e silicatos hidratados de cálcio. Verificou-se a presença de picos referentes ao Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> e Ca<sub>4</sub>(SiO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>, conforme as fichas JPDF 86-0402, 46-1045, 24-0034 e 29-0377, respectivamente.

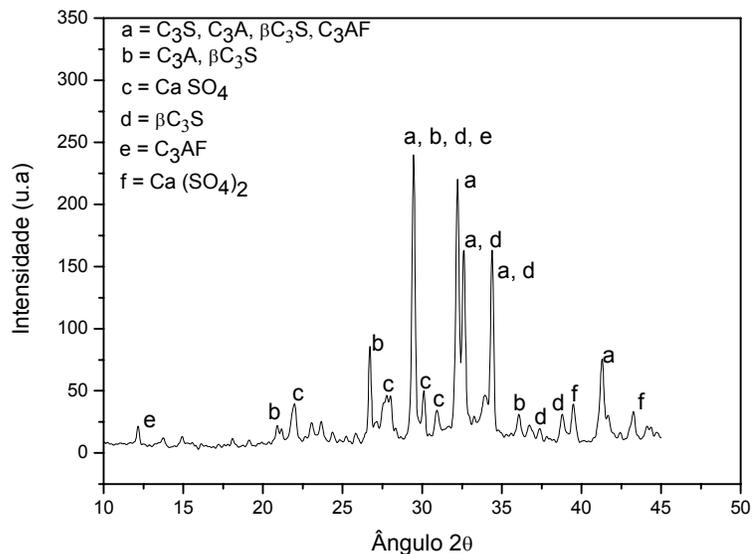


Figura 4.2 – Difração de raios X do cimento Portland.

A Figura 4.3 apresenta a curva da análise térmica diferencial do cimento Portland, onde se verificou a existência de apenas um pico endotérmico por volta de  $850^\circ C$ , que possivelmente está relacionado à desidroxilação do silicato de cálcio hidratado, ou seja, perda de água estrutural, observado através da difração de raios X.

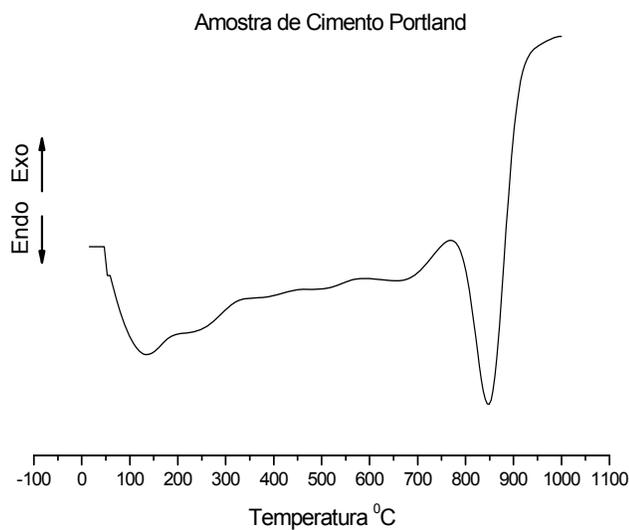


Figura 4.3 – Análise térmica diferencial do cimento Portland comum.

Na Tabela 4.3 estão relacionados os valores encontrados para a caracterização do agregado miúdo, segundo as especificações estabelecidas pela ABNT.

Tabela 4.3 – Ensaios para caracterização do agregado miúdo (AM).

Ensaio		Normas	Resultados (AM)
Massa específica real ( $\text{g/cm}^3$ )		NBR 9776 (1987)	2,62
Massa unitária no estado solto ( $\text{kg/dm}^3$ )		NBR 7251 (1982)	1,49
Absorção de água (%)		NBR 9778 (1994)	0,50
Teor de materiais pulverulentos (%)		NBR 7219(1982)	1,70
Granulometria	Dimensão máxima (mm)	NBR 7217 (1987)	2,40
	Módulo de finura (%)	NBR 7217 (1987)	2,22

Analisando os valores da massa específica real, verificou-se que o resultado foi de  $2,62 \text{ g/cm}^3$ , segundo Petrucci (1998) a massa específica ideal para o agregado miúdo é de aproximadamente de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ . Para a massa unitária o valor encontrado foi de  $1,49 \text{ g/cm}^3$  podendo ser considerado igual ao citado pelo mesmo autor ( $1,50 \text{ g/cm}^3$ ). Em relação ao teor de materiais pulverulentos o valor encontrado foi de  $1,70\%$ , este resultado encontra-se dentro do estabelecido por norma da ABNT NBR 7219 (1982) que permite até  $5\%$ . Portanto os resultados encontram-se dentro dos valores da literatura.

Na Figura 4.4 está apresentada a curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo, onde observou-se que o agregado miúdo encontra-se dentro dos limites inferior e superior estabelecidos pelas normas da ABNT, NBR 7217 (1987). Segundo Petrucci (1998) a massa acumulada retida deve ser no máximo  $15\%$  para tamanho de partículas de  $4,8\text{mm}$ .

A granulometria deve atender aos limites preconizados pela NBR 7217 (1987) para areia média, admitindo-se módulo de finura (soma das porcentagens retidas acumuladas divididas por 100) entre  $2,40\%$  e  $3,30\%$  sendo sempre aconselhável valores mais próximos do limite superior. Para a amostra analisada o módulo de finura encontrado foi de  $2,22\%$ .

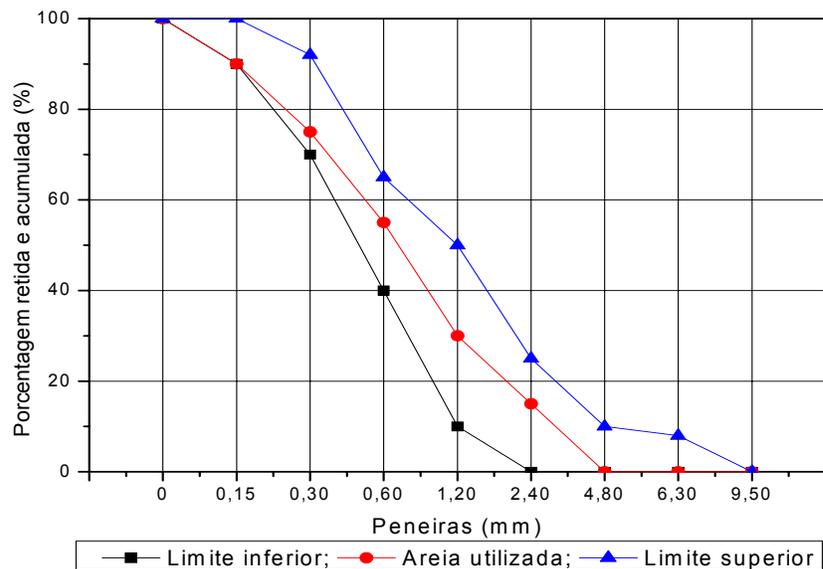


Figura 4.4 – Curva granulométrica da areia utilizada.

#### 4.1.2 Matérias primas alternativas

Na Tabela 4.4 estão apresentados os resultados obtidos para as propriedades físicas da cinza de casca de arroz empregada nesta pesquisa e sua comparação com os limites especificados pelas normas da ABNT.

Tabela 4.4 – Resultados das propriedades físicas da cinza de casca de arroz.

Ensaio físico	Normas da ABNT	Limites:	Resultados CCA
Finura malha nº 200 (%)	NBR 11579 (1991)	$\leq 12$	3,77
Massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR 6474 (1991)	-	2,25
Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR 7251 (1982)	-	0,46
Área específica (Blaine) $\text{cm}^2/\text{g}$	NBR NM 76 (1998)	$\geq 2600$	14.790,39
Tempo de pega (h:min)	NBR NM 65 (2003)	$\geq 1:00$ $\leq 10:00$	X

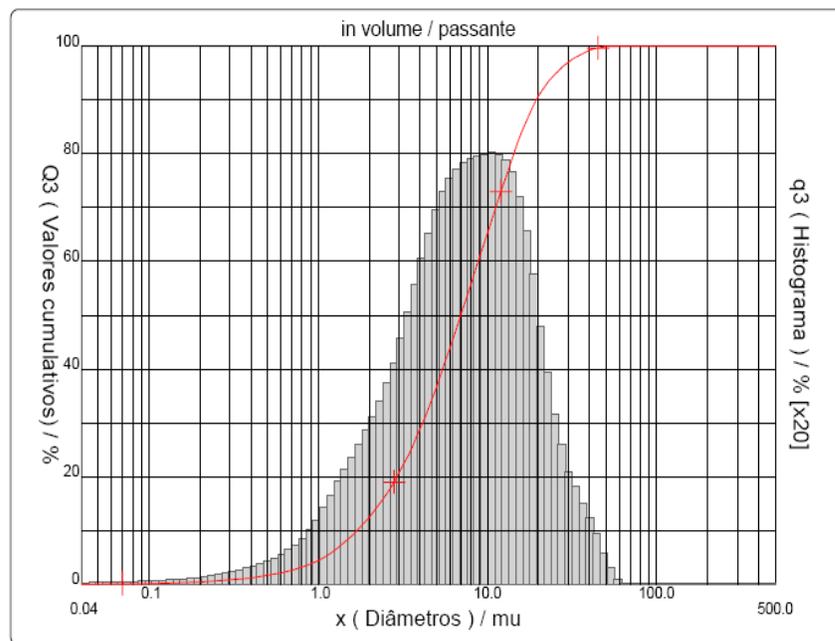
x – Ensaio não realizado para a CCA.

Para a CCA, verificou-se um elevado valor da superfície específica, com resultado de  $14.790,39 \text{ cm}^2/\text{g}$ , superior ao do cimento, que foi de  $4.866,42 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Tabela 1), estando de acordo com as especificações da norma NBR NM 76 (1998) que estabelece valores superiores a 2600

cm<sup>2</sup>/g para este ensaio. Esses valores foram similares aos resultados encontrados por Tiboni (2007).

O módulo de finura, na peneira da ABNT, nº 200 (0,074mm), encontrado para a CCA foi de 3,77%, estando dentro dos parâmetros permitidos por norma, que é um módulo de finura inferior a 12%. Com relação à massa específica real, o valor encontrado foi de 2,25 g/cm<sup>3</sup>, sendo este valor semelhante ao encontrado por Rego (20 04), que foi de 2,12 g/cm<sup>3</sup> e ao encontrado por Mattos et al (2002), 2,20 g/cm<sup>3</sup>. Quanto à massa unitária da cinza de casca de arroz o resultado encontrado foi de 0,46g/cm<sup>3</sup>, similar ao valor encontrado para a cinza de casca de arroz estudada por Mattos et al (2002), que foi de 0,40g/cm<sup>3</sup>, indicando que a CCA é um material poroso, com baixa densidade.

A curva de distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz empregada nesta pesquisa encontra-se na Figura 4.5.



Núm. de série : 392 Ref : 1\_r111.m108.45A0000/5.00/1149/m25.12.5.10.1Fh.20.5.10.Bh/Q-0.0.0.0./300.0.15.g80.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V.5.12/835

Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica por difratometria a laser da CCA.

Analisando a curva de distribuição de tamanho das partículas da cinza de casca de arroz, utilizada nesta pesquisa, verificou-se que a curva apresentou comportamento mono modal com concentração de partículas em torno de 10µm, apresentando tamanho médio de 9,25µm, com D<sub>10</sub> de 1,69µm, D<sub>50</sub> de 6,94µm, D<sub>90</sub> de 19,45µm. Observou-se que a curva de distribuição granulométrica da CCA proposta para este trabalho é semelhante à curva da cinza estudada por Della (2001) e que apresentou a mesma configuração.

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados para composição química da cinza de casca de arroz.

Tabela 4.5 – Composição química da cinza de casca de arroz (CCA).

Ensaio realizado		CCA	
Perda ao fogo (%)		2,63	
Análise* Química (%)	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	88,13	
	Óxido de magnésio (MgO)	0,41	
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,90	
	Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,20	
	Óxido de cálcio (CaO)	0,56	
	Alcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	1,12
		Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	3,33
Resíduo insolúvel (RI)		1,72	

\*Laboratório de análises minerais da UFCG.

Analisando os valores contidos na Tabela 4.5 observou-se que a CCA apresentou elevado teor de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) como principal composto químico, com valor de 88,13%. Os demais óxidos encontrados na composição química da CCA, como principais impurezas, apresentaram valores inferiores a 5%. Comparando os valores de SiO<sub>2</sub> da CCA com os valores apresentados por Della et al (2005a) e por Rego (2004), cujo teor de óxidos é de 97,87% e 86,72%, respectivamente, pode-se concluir que são valores próximos aos encontrados para a cinza em estudo. O teor de SiO<sub>2</sub> encontrada para a cinza estudada por Cordeiro (2006) foi da ordem de 80%. Ressalta-se que o alto teor de dióxido de silício é um dos indicadores para o material ser considerado pozolânico.

A Figura 4.6 está apresentando a difração de raios X da cinza de casca de arroz.

Com base na Figura 4.6 observou-se que a cinza da casca de arroz é um material predominantemente amorfo com a presença de uma banda associada a material amorfo situada em torno de 21°. Essa banda está provavelmente relacionada à sílica amorfa, conforme dados mostrados na literatura (Della et al, 2005b). Verificou-se ainda na Figura 4.6 a presença de pequenos picos de difração relacionados a materiais cristalinos, que não foram identificados, mas que se acredita estarem relacionados a impurezas associadas ao processo de queima.

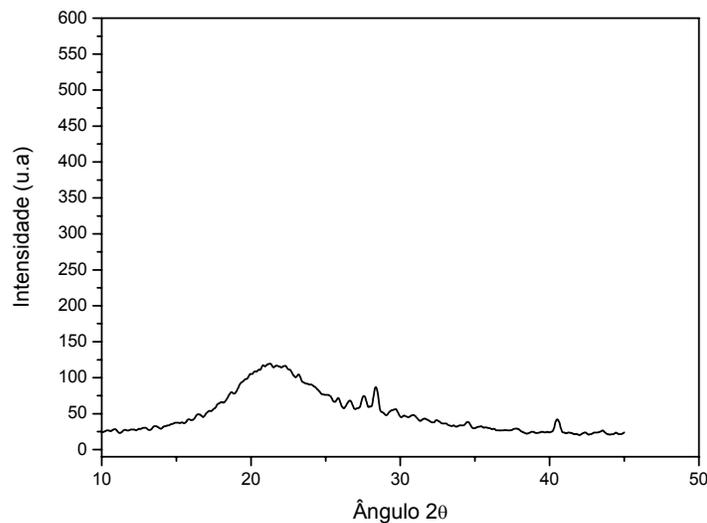


Figura 4.6 – Difração de raios X da cinza de casca de arroz.

Comparando os resultados obtidos com os apresentados por Della et al (2005a), observou-se grande semelhança nos difratogramas, esses autores afirmaram que temperaturas acima de 800°C fazem com que o potássio e o sódio contidos aceleram tanto a fusão das partículas quanto a cristalização da cristobalita a partir da sílica amorfa, por diminuir o ponto de fusão do material. Entretanto a tendência destes elementos em acelerar a cristalização da sílica não foi observada devido à temperatura aplicada para obtenção da cinza ter sido inferior a 800°C, ou seja, 600°C. Resultado semelhante ao obtido na Figura 4.6 foi constatado também por Chandrasekhar (2003) que empregou a mesma temperatura de queima deste trabalho, 600°C.

A Figura 4.7 apresenta a análise térmica diferencial da cinza da casca de arroz. Pode-se observar um pico endotérmico por volta de 100°C, provavelmente relacionado à presença de água livre e/ou água adsorvida.

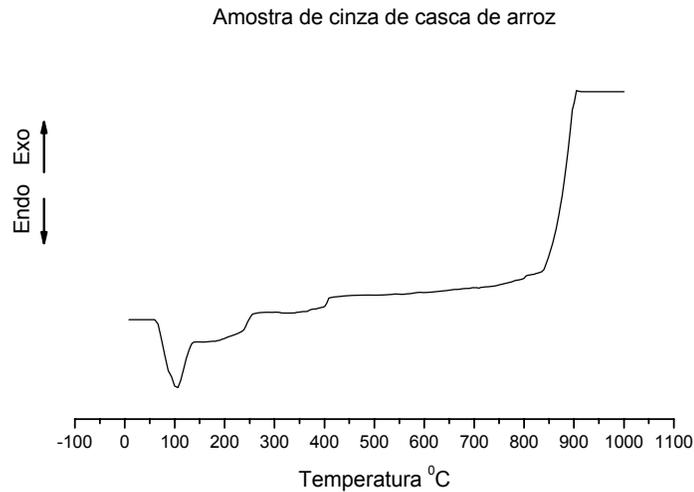


Figura 4.7 – Análise térmica diferencial da cinza de casca de arroz (CCA).

Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados da caracterização da CA realizados conforme prescrevem as normas da ABNT, para determinação da composição granulométrica e determinação da massa unitária, NBRs 7217 (1987) e 7251 (1982), respectivamente. Como a casca de arroz tem a função de substituir o agregado miúdo e não existindo padronização de ensaios para este material, foram utilizadas as mesmas normas empregadas para a caracterização dos agregados.

Tabela 4.6 – Caracterização da casca de arroz (CA).

Ensaio		Resultados
Massa unitária no estado solto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		0,12
Granulometria	Dimensão máxima (mm)	4,80
	Módulo de finura (%)	5,80

Analisando os valores da Tabela 4.6 verificou-se que a CA empregada neste trabalho apresentou massa unitária de  $0,12 \text{ g}/\text{cm}^3$ , caracterizando-a como um material leve e volumoso. Este valor é semelhante ao encontrado por Mesa Valenciano (2004), de  $0,13 \text{ g}/\text{cm}^3$ , Milani (2005) que foi de  $0,11 \text{ g}/\text{cm}^3$  e por Martinez (2005) que foi de  $0,14 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Esta característica está relacionada ao tipo de estrutura física da casca (côncava e oca) que leva à grande presença de vazios entre elas. O diâmetro máximo da CA foi de 4,8mm, que difere do valor encontrado por Martinez (2005), que foi 2,40mm. O módulo de finura para a casca de arroz foi de 5,80% que, quando comparado ao módulo de finura do agregado miúdo (areia), normalmente empregado em

argamassas de construção civil, foi aproximadamente o dobro.

Os valores de absorção de água do resíduo de casca de arroz estão apresentados na Tabela 4.7. Este ensaio foi importante para se fazer a correção do fator água-aglomerante usado na moldagem das argamassas.

Tabela 4.7 – Absorção por imersão em água da casca de arroz (CA).

Amostra Tempo	Absorção (%)	Absorção (%)	Absorção (%)	Absorção (%)
	1h	5h	12h	24h
1	105,45	110,32	109,81	109,41
2	106,98	117,05	115,27	114,50
3	103,41	114,62	111,23	112,22
Média (%)	105,28	<b>114,00</b>	112,10	112,04

Analisando os resultados de absorção de água do resíduo de CA verificou-se que este resíduo apresentou elevados valores de absorção de água, sendo o valor máximo de 114% obtido para período de cinco horas de imersão, o que motivou a prévia molhagem da casca de arroz, antes de utilizá-la nos traços, para que não ocorra alterações no fator água-aglomerante. A Figura 4.8 mostra a casca em seu estado natural e úmida.



Figura 4.8 – Casca de arroz no estado natural (a) e no estado úmido (b).  
Fonte: Direta (2007).

#### 4.1.3 Conclusões parciais

Diante dos estudos realizados com as matérias-primas convencionais e alternativas, conclui-se que:

- as matérias-primas convencionais encontram-se dentro dos padrões estabelecidos pelas normas da ABNT;

- a casca de arroz apresentou elevado teor de absorção de água em relação as matérias-primas convencionais;
- cinza de casca de arroz apresentou propriedades físicas adequadas para uso na composição de concretos e argamassas;
- a cinza de casca de arroz apresentou na sua composição química teores de óxido de silício superior ao especificado pela norma da ABNT NBR 12653 (1997), requisito básico para que um material seja considerado com atividade pozolânica;
- de acordo com a difração de raios x, a cinza é um material com características amorfa.

#### 4.2 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CCA

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores encontrados para as propriedades químicas da cinza de casca de arroz e os limites estabelecidos pela NBR 12653 (1997). Comparando os resultados encontrados para a CCA com os estabelecidos pela norma da ABNT, NBR 12653 (1997), para que um material tenha atividade pozolânica verificou-se que, para as propriedades estudadas, a cinza de casca de arroz encontra-se dentro das exigências das normas da ABNT, apresentando somatório dos valores  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  de 89,54%, superior ao mínimo exigido, perda ao fogo de 2,63% e álcalis disponíveis de 0,12%, ambos inferiores às especificações da norma.

Tabela 4.8 – Exigências químicas para o índice de atividade pozolânica.

Propriedades	Material Pozolânico	Resultados (%): CCA
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% min.)	70,00	89,54
$\text{SO}_3$ (%máx.)	4,00	x
Teor de umidade (% máx.)	3,00	X
Perda ao fogo (% máx.)	10,0	2,63
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$ (% máx.)	1,50	0,12

x – Ensaio não realizado na CCA.

Na Tabela 4.9 estão apresentados os valores das características mecânicas do resíduo cinza de casca de arroz e os valores especificados pela norma da ABNT, NBR 12653 (1997). Analisando os resultados verificou-se que o resíduo estudado apresenta valores do índice de

atividade pozolânica (IAP) superior ao mínimo especificado pela norma da ABNT, NBR 12653 (1997), tanto com cimento quanto com cal. O IAP com cimento para a cinza de casca de arroz encontrado foi de 78,70% enquanto a norma estabelece um percentual mínimo de 75%. Para a cal a norma estabelece uma resistência mínima de 6,0MPa para sete dias de cura, tendo encontrado para a cinza em estudo um valor de 10,20MPa, podendo-se concluir que a CCA possui potencial pozolânico para substituir o cimento, conforme proposto no objetivo deste trabalho.

Tabela 4.9 – Exigências físicas para o índice de atividade pozolânica.

Propriedades	Material Pozolânico	Resultados (%): CCA
Material retido na peneira ABNT n° 200 (% máx.)	12	3,77
Índice de atividade pozolânica (IAP):		
- IAP com cimento (% mín.)	75	78,70
- IAP com cal (valor mínimo em MPa)	6,0	10,20
- água requerida (% máx.)	115	105

#### 4.3 ESTUDO DA RELAÇÃO ÁGUA–AGLOMERANTE DAS ARGAMASSAS

Na Tabela 4.10 estão apresentados os valores da relação água-aglomerante e da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo cinza de casca de arroz, curados por períodos de sete dias.

Tabela 4.10 – Estudo da relação água-aglomerante para as argamassas convencionais e alternativas, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, incorporadas com cinza de casca de arroz (CCA).

Qcp	% CCA	f <sub>ag</sub> 1:4	RCS <sub>m</sub> (MPa) 1:4	f <sub>ag</sub> 1:6	RCS <sub>m</sub> (MPa) 1:6	f <sub>ag</sub> 1:8	RCS <sub>m</sub> (MPa) 1:8
5	0%	0,55	12,59	0,70	7,20	0,75	5,22
5	3%	0,55	9,18	0,65	8,72	0,75	5,05
5	6%	0,60	12,00	0,70	8,72	0,75	5,60
5	9%	0,60	12,59	0,70	9,22	0,75	4,59
5	15%	0,60	12,80	0,70	10,40	0,85	6,15
5	20%	0,60	9,85	0,75	8,51	0,85	4,80
5	30%	0,65	9,01	0,80	8,00	0,85	4,91

f<sub>ag</sub> = relação água-aglomerante; RCS<sub>m</sub> = resistência à compressão simples;

Qcp = quantidade de corpos-de-prova moldados, por traço.

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.10, observou-se que o traço 1:4 alternativo incorporado com 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, obteve relação água-

aglomerante variando entre 0,55 à 0,65. Os valores da relação água-aglomerante para as argamassas no traço 1:6 variaram de 0,65 a 0,80 para todas as percentagens de resíduo CCA incorporado. Observou-se também que quanto maior o percentual do resíduo, maior a relação água-aglomerante.

Para as argamassas no traço 1:8 verificou-se que a relação água-aglomerante ideal para os traços com percentuais de 3%, 6% e 9% foi de 0,75, enquanto para as incorporações de 15%, 20% e 30% foi de 0,85, sendo este o traço que apresentou os maiores valores, isto ocorreu possivelmente devido ao maior volume de material e também devido a estrutura da cinza de casca de arroz.

Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores da relação água-aglomerante e da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo de casca de arroz.

Tabela 4.11 – Estudo da relação água-aglomerante para as argamassas convencionais e alternativas, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, incorporadas com resíduo de casca de arroz (CA).

Qcp	%	f <sub>ag</sub>	RCS <sub>m</sub> (MPa)	f <sub>ag</sub>	RCS <sub>m</sub> (MPa)	f <sub>ag</sub>	RCS <sub>m</sub> (MPa)
	CA	1:4	1:4	1:6	1:6	1:8	1:8
5	10%	0,50	2,57	0,70	2,15	0,85	1,31
5	20%	0,50	1,58	0,70	1,85	0,85	0,95
5	30%	0,50	0,95	0,70	1,01	0,85	0,67

f<sub>ag</sub> = relação água-aglomerante; RCS<sub>m</sub> = resistência à compressão simples;

Q<sub>cp</sub> = quantidade de corpos-de-prova moldados.

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.11, observou-se que para os corpos-de-prova do traço 1:4 não houve variação na relação água-aglomerante, mesmo quando ocorreu aumento no percentual de incorporação da casca de arroz, sendo de 0,50 para todas as composições estudadas. Para os traços 1:6 e 1:8, verificou-se também que a relação água-aglomerante não variou com incorporação do resíduo de casca de arroz, sendo esses valores de 0,70 (traço 1:6) e 0,85 (traço 1:8). Observou-se também que das composições estudadas o traço 1:8 apresentou maior relação água-aglomerante, isto ocorreu possivelmente devido ao maior volume e maior absorção da casca de arroz presente no traço.

#### 4.4 ENVELHECIMENTO EM CÂMARA ÚMIDA

Nas Figuras 4.9 a 4.11 estão apresentados os resultados de absorção de água dos corpos-de-prova da argamassa convencional e alternativas incorporadas com 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de resíduo cinza de casca de arroz para os períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

Na Figura 4.9 estão apresentados os valores de absorção para os corpos-de-prova das argamassas convencional e alternativa, traço 1:4, onde se verificou que os corpos-de-prova com 15% de incorporação apresentaram menores índices de absorção de água, ocorrendo provavelmente melhor empacotamento das partículas e, conseqüentemente redução dos vazios existentes na pasta.

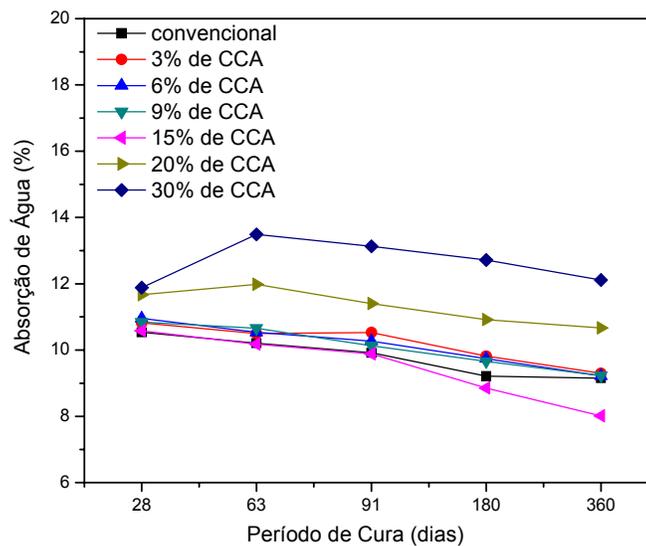


Figura 4.9 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.

Avaliando o comportamento da absorção de água para os corpos-de-prova até 360 dias de cura e comparando com os valores iniciais, aos 28 dias de cura, verificou-se uma diminuição no percentual de absorção em praticamente todos os corpos-de-prova, convencionais e alternativos, sendo esses valores de: 13,20%, 14,04%, 15,90%, 14,85%, 24,30% e 8,60%, para os corpos-de-prova da argamassa convencional e com 3%, 6%, 9%, 15% e 20% de incorporação do resíduo CCA. Respectivamente, com o aumento do período de cura, ocorreu diminuição na porosidade da pasta, conseqüentemente reduzindo o teor de absorção de água, fato também observado por Malhotra e Mehta (1996), os quais relatam que a incorporação de resíduos à pasta aumenta o

empacotamento da mistura, diminuindo a porosidade. No caso do traço alternativo com incorporação de 30% do resíduo CCA, que apresentou acréscimo de 1,93% no teor de absorção, acredita-se na possibilidade das partículas de cinza terem diminuído o empacotamento do sistema em virtude da estrutura flocular do resíduo o que provocou uma maior absorção de água.

Na Figura 4.10 estão apresentados os valores de absorção de água para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, com incorporação do resíduo cinza de casca de arroz, traço 1:6, para os períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

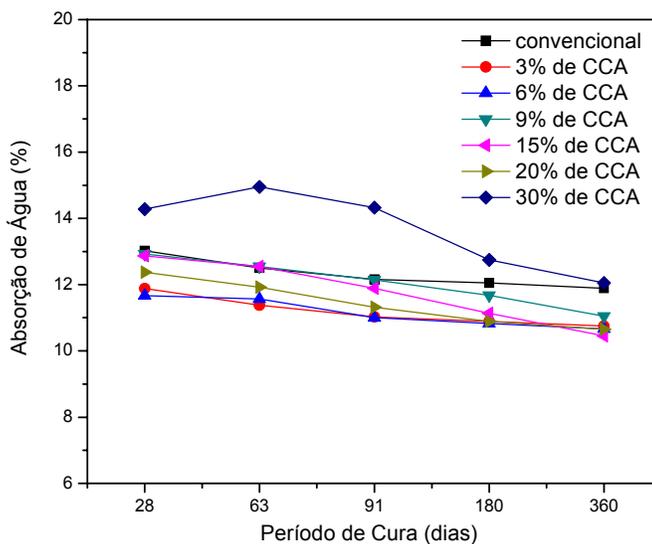


Figura 4.10 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.

Analisando os valores de absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas no traço 1:6 observou-se que os corpos-de-prova sem incorporação do resíduo CCA, apresentaram maior índice de absorção, provavelmente por este ser um traço com maior quantidade de areia o que possibilita maior índice de vazios, no entanto, comparando o percentual de absorção deste traço entre os períodos de 28 e 360 dias de cura, observou-se redução da absorção em 8,68%, 9,50%, 8,60%, 14,50%, 18,80%, 13,90% e 25,60%, para todos os corpos-de-prova, provavelmente ocorreu formação de compostos devido a reação pozolânica que tende a obturar os poros, diminuindo o coeficiente de permeabilidade do conjunto, sendo esta uma das grandes vantagens do uso de cinza de casca de arroz.

Verificou-se também que os corpos-de-prova com menores percentuais de incorporação de CCA apresentaram variação da absorção semelhante, e que o traço convencional e o traço com incorporação de 30% apresentaram maiores índices de absorção de água.

Na Figura 4.11 estão apresentados os valores de absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas para o traço 1:8. Observou-se que neste traço, os valores de absorção foram mais elevados que os demais traços, variando de 13,48% a 14,77% aos 28 dias de cura e de 11,65% a 14,05%, aos 180 dias de cura.

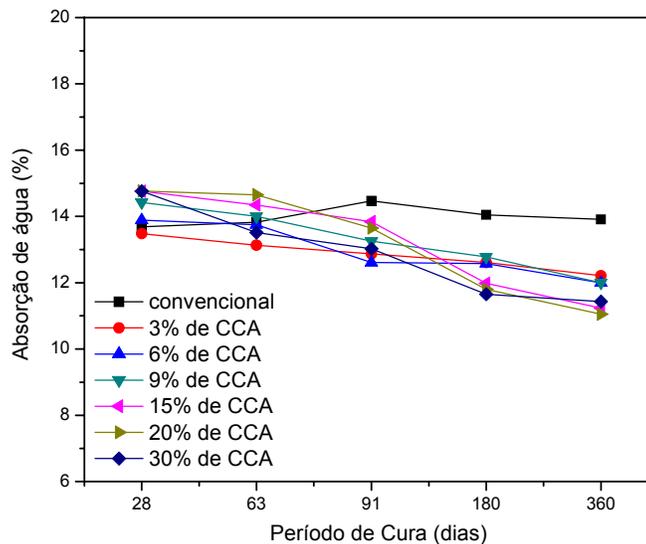


Figura 4.11 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.

Geralmente, com o avanço do período de cura, a absorção tende a diminuir, uma vez que ocorre uma melhor densificação da pasta e maior empacotamento dos grãos, entretanto nos corpos-de-prova do traço 1:8, sem incorporação do resíduo, a princípio, ocorreu um leve aumento no índice de absorção e só após 91 dias de cura é que se observou decréscimo no percentual de absorção, isto pode ter ocorrido devido a este traço ter grande quantidade de agregado miúdo em relação ao percentual de aglomerante, o que possibilita um maior índice de vazios.

Verificou-se ainda que, todos os corpos-de-prova incorporados com percentuais de cinza de casca de arroz no traço 1:8, com período de 180 e 360 dias de cura, tiveram seus valores de absorção inferiores aos corpos-de-prova convencionais, atribuindo este fato à presença da cinza de casca de arroz ser um material bastante fino, exercendo a função de preenchimento dos vazios existentes na argamassa.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os resultados da densidade aparente, para o período de cura de 28 e 360 dias, para os corpos-de-prova das argamassas incorporados com CCA. Analisando os resultados, verificou-se que a densidade aparente varia de acordo com o comportamento mecânico das argamassas. O traço 1:4 sem nenhuma incorporação, para este período de cura, foi o que apresentou melhor valor de DAp, sendo de 2,300g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4.12 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, curados por períodos de 28 e 360 dias.

Traços	% CCA	Cura úmida (C.U.)			
		DAp (g/cm <sup>3</sup> ) 28 dias	RCS (MPa)	DAp (g/cm <sup>3</sup> ) 360 dias	RCS (MPa)
1:4	0%	2,300	14,04	2,309	16,84
	3%	2,230	10,95	2,284	16,44
	6%	2,241	11,79	2,314	17,25
	9%	2,244	12,21	2,316	19,00
	15%	2,279	13,05	2,351	19,85
	20%	2,215	10,67	2,275	15,82
	30%	2,195	9,55	2,270	12,13
1:6	0%	2,160	7,86	2,217	8,42
	3%	2,181	7,70	2,186	9,11
	6%	2,234	7,70	2,202	10,11
	9%	2,164	7,16	2,205	10,73
	15%	2,102	6,05	2,290	10,93
	20%	2,166	7,42	2,191	10,11
	30%	2,138	5,90	2,160	8,72
1:8	0%	2,100	4,21	2,159	7,00
	3%	2,214	5,05	2,166	7,42
	6%	2,109	4,91	2,217	7,80
	9%	2,165	4,21	2,168	7,75
	15%	2,224	5,90	2,299	8,12
	20%	2,211	5,05	2,312	8,16
	30%	2,210	4,21	2,239	7,85

Nas Figuras 4.12 e 4.13, estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo CCA, curados por períodos de 28 e 360 dias para o traço 1:4.

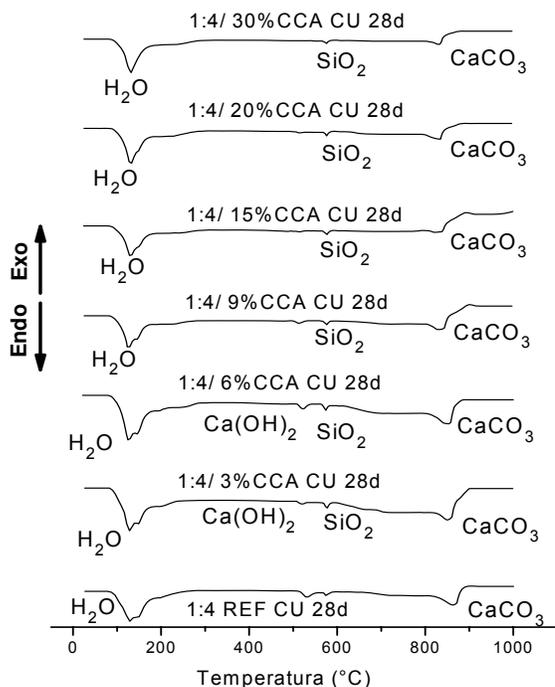


Figura 4.12 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.

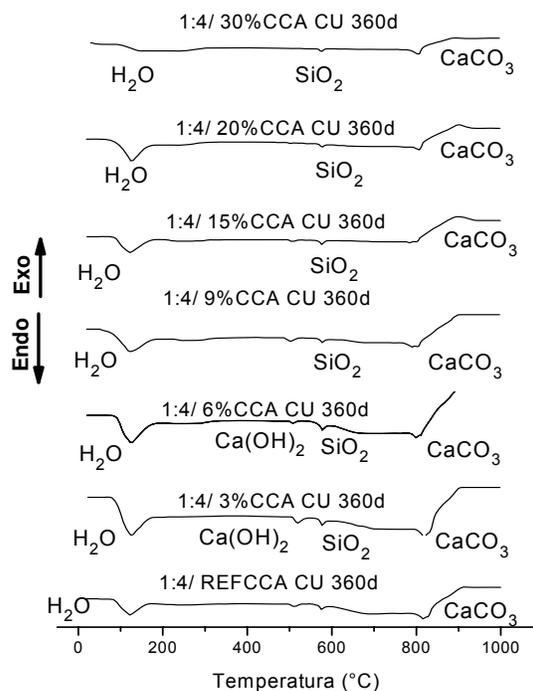


Figura 4.13 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, para o traço 1:4, nas Figuras 4.12 e 4.13, verificou-se que os corpos-de-prova de todas as argamassas com e sem incorporação da cinza de casca de arroz, apresentaram picos endotérmicos na temperatura de 120°C, referente à presença de água livre. Para os corpos-de-prova das argamassas com percentuais de incorporação de 0%, 3% e 6%, na temperatura de 525°C, observou-se a presença de pico endotérmico correspondente a presença do hidróxido de cálcio e para temperatura de 575°C pico endotérmico correspondente a inversão do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ , em todos os traços. Outro pico endotérmico na temperatura de 820°C, referente à presença do carbonato de cálcio. Com a evolução do tempo de cura, aos 360 dias, não foi observado a presença do pico endotérmico relacionado à presença do hidróxido de cálcio, para as composições com 15%, 20% e 30% de CCA, em nenhum dos traços, indicando que com o aumento do período de cura a reação entre a sílica e o hidróxido de

cálcio consumiu todo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gerado pela hidratação do cimento, formando, possivelmente, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Nas Figuras 4.14 e 4.15, estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas, no traço 1:6, argamassas convencionais e alternativas, com incorporação do resíduo CCA, em percentuais de substituição ao aglomerante em 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%.

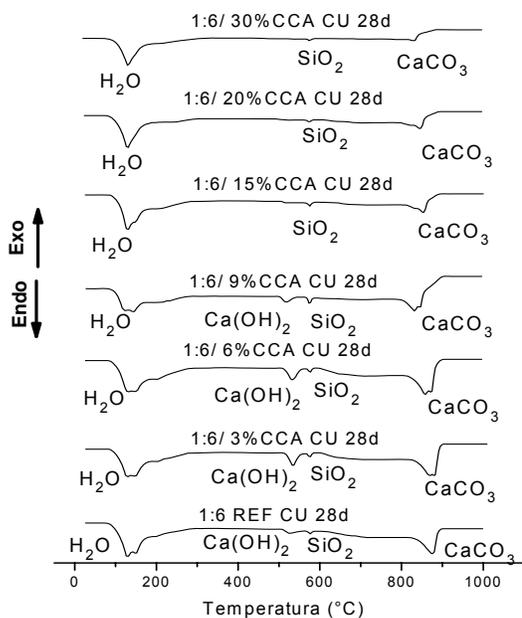


Figura 4.14 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.

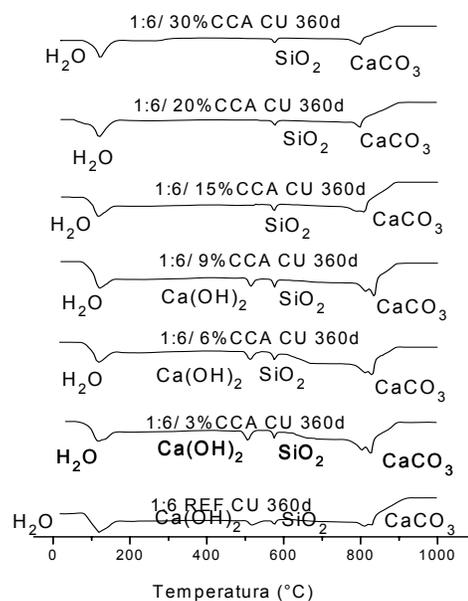


Figura 4.15 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.

Nas curvas da análise térmica diferencial, apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15, para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, com incorporação de cinza de casca de arroz, no traço 1:6, observou-se pico endotérmico em, aproximadamente, 120°C, para todas as composições das argamassas com e sem incorporação da cinza de casca de arroz, referente à presença de água livre. Para os corpos-de-prova convencionais e alternativos com incorporação de 3%, 6% e 9% de CCA, nos períodos de cura de 28 e 360 dias, na temperatura 525°C, observou-se pico endotérmico correspondente à presença do hidróxido de cálcio e na temperatura de 575°C pico endotérmico correspondente a transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Na temperatura de 820°C outro pico endotérmico referente à presença do carbonato de cálcio. Para os períodos de cura de 28 e 360 dias, não se observou nos corpos-de-prova das argamassas

incorporadas com 15%, 20% e 30% de CCA, o pico relacionado ao hidróxido de cálcio, podendo-se concluir que, provavelmente a cinza de casca de arroz, reagiu com todo o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas, no traço 1:8, convencionais e alternativas incorporadas com resíduo CCA, para os períodos de cura de 28 e 360 dias.

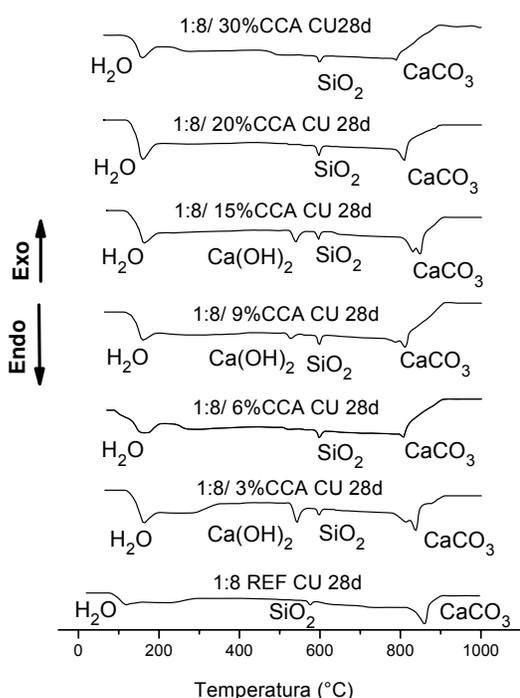


Figura 4.16 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.

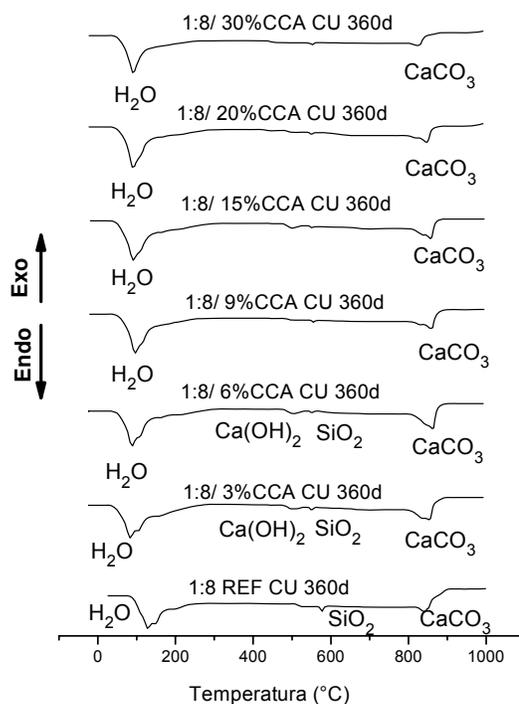


Figura 4.17 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.

Analisando as Figuras 4.16 e 4.17, verificou-se nas curvas da análise térmica diferencial, para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, aos 28 e 360 dias de cura, traço 1:8, a presença de água livre, caracterizada por pico endotérmico em, aproximadamente, 120°C, para todas as composições dos corpos-de-prova das argamassas com e sem incorporação da cinza de casca de arroz. Para os corpos-de-prova convencionais e com incorporação de 3%, 6%, 9% e 15% de CCA, aos 28 dias de cura na temperatura de 525°C, observou-se pico endotérmico relacionado à presença do hidróxido de cálcio e pico endotérmico na temperatura de 575°C, referente a transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Aos 360 dias de cura não se observou a presença do pico relacionado ao hidróxido de cálcio nos corpos-de-prova com

incorporação de 9%, 15%, 20% e 30% de CCA. Em todas as composições, aos 28 e 360 dias de cura, na temperatura de 820°C ocorreu pico endotérmico, referente à presença do carbonato de cálcio. Com a evolução do tempo de cura, para as composições com 20% e 30% de CCA, observou-se que o hidróxido de cálcio, gerado pela hidratação do cimento, reagiu com a CCA, formando, possivelmente, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Na Figura 4.18 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de argamassa no traço 1:4, com e sem incorporação do aglomerante por cinza de casca de arroz, após períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

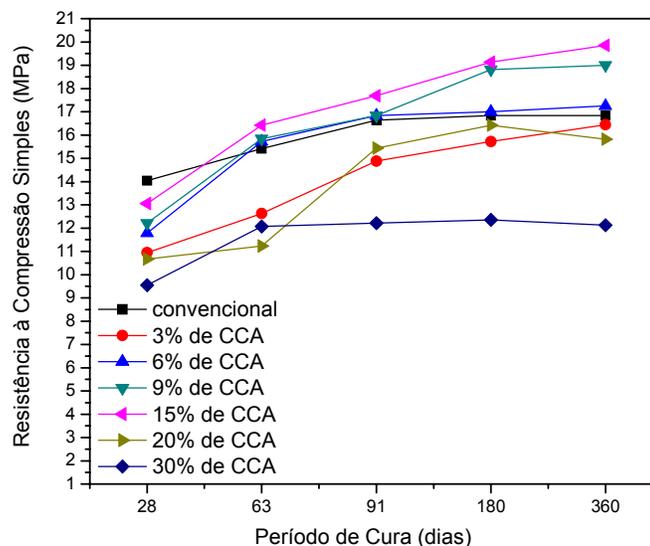


Figura 4.18 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 4.18, observou-se que, aos 28 dias de cura, todos os corpos-de-prova, de argamassa no traço 1:4, apresentaram valores de RCS superiores a 8,00MPa, sendo classificada segundo norma da ABNT NBR 13279 (2001), como argamassa padrão III.

Verificou-se que aos 28 dias de cura, os corpos-de-prova convencionais obtiveram desempenho mecânico superior em relação aos corpos-de-prova das argamassas alternativas, o que pode ser justificado, provavelmente, pelo fato das reações pozolânicas ocorrerem mais lentamente. Segundo Malhotra e Mehta (1996) a incorporação de resíduo à pasta possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, o que promove aumento no empacotamento da mistura, implicando no aumento da RCS.

Nos tempos de cura de 63, 91 e 180 dias verificou-se que os corpos-de-prova com incorporação de 6%, 9% e 15% do resíduo CCA apresentaram desempenho superior aos corpos-de-prova da argamassa convencional. Yeau e Kim (2005) quando estudaram concretos com adição de CCA também observaram que aos 28 dias de hidratação a RCS foi inferior à de referência, aumentando com o período de cura. Esses resultados, afirmam os autores, se devem ao fato de que as reações pozolânicas acontecem mais lentamente e contribuem para a densificação do concreto em idades mais avançadas. Fato este também ocorrido com as argamassas, conforme comentado anteriormente.

Analisando os resultados da RCS aos 360 dias de cura e comparando-os com a RCS aos 28 dias, observou-se que a RCS dos corpos-de-prova da argamassa convencional foi o que apresentou menor percentual de variação quando comparado aos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CCA, com variação de: 19,94%, 50,14%, 46,30%, 55,61%, 52,10%, 48,27% e 27,00%, para os corpos-de-prova da argamassa convencional e das argamassas alternativas, incorporadas com 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, respectivamente. No entanto, comparando estes mesmos resultados com o período de cura de 180 dias, verificou-se que os corpos-de-prova com 20% e 30% de incorporação de CCA apresentaram redução na resistência à compressão simples em 3,65% e 1,80%, respectivamente.

Na Figura 4.19 estão apresentados os resultados para os corpos-de-prova das argamassas do traço 1:6, com e sem incorporação do resíduo CCA, curados por 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

Analisando os resultados dos corpos-de-prova das argamassas, traço 1:6, apresentados na Figura 4.19, verificou-se que os valores apresentados para este traço variaram entre 5,90MPa e 7,86MPa, aos 28 dias de cura, sendo classificada de acordo com a norma da ABNT NBR 13279 (2001) como padrão II, por apresentarem valores de  $4,0 \leq RCS < 8,0$  MPa.

Analisando os valores apresentados para a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas no traço 1:6, observou-se que aos 28 e 63 dias de cura, praticamente todos os corpos-de-prova de argamassa com incorporação de CCA, apresentaram desempenho mecânico inferior aos corpos-de-prova das argamassas convencionais, com exceção da argamassa com 20%, que apresentou pequena diferença, aos 63 dias de cura, com valor de 8,58MPa.

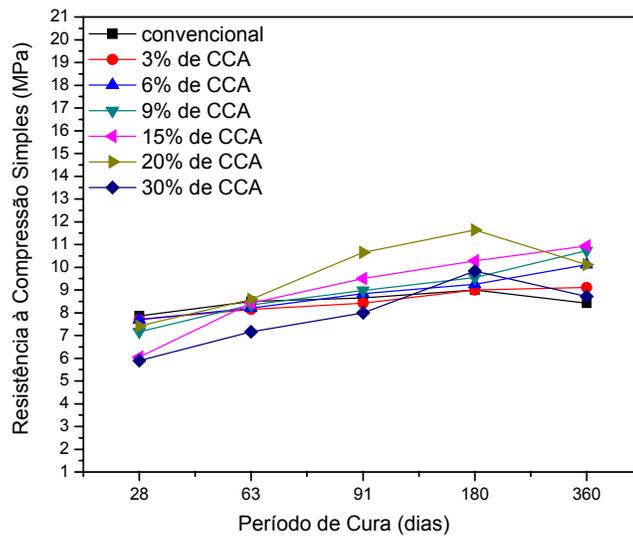


Figura 4.19 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.

Aos 180 dias de cura, os corpos-de-prova de argamassa com incorporação de 15%, 20% e 30% de CCA foram os que obtiveram maiores valores de RCS, com relação aos convencionais e aos demais alternativos, sendo de: 10,28MPa, 11,63MPa e 9,83MPa, respectivamente. Neste caso, a CCA pode está funcionando com efeito pozolânico, ocorrendo as reações e proporcionando uma melhor densificação da argamassa. Segundo Dal Molin (1995) o acréscimo da RCS em argamassas com cinza de casca de arroz está associado não apenas a reação pozolânica, mas também ao preenchimento de vazios deixados pelo cimento próximos à superfície (interface) do agregado e interferem no crescimento e no grau de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado. A ação desses fatores, em conjunto com a redução da concentração de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , proporciona melhora significativa na zona de transição pasta-agregado. Isto se reflete em aumento de desempenho, tanto sob o ponto de vista de resistência mecânica como de durabilidade.

Verificou-se ainda que os corpos-de-prova de argamassas convencionais e alternativas incorporadas com 3%, 6% e 9% de CCA, traço 1:6, apresentaram valores de RCS praticamente semelhante para todos os períodos de cura, estando em consonância com Tiboni (2007), a qual observou que pequenos percentuais de cinza de casca de arroz, em compósitos à base de cimento, não tinham muito influência nos resultados finais do comportamento mecânico.

Observou-se que, aos 360 dias de cura, os corpos-de-prova incorporados com 6%, 9% e 15% do resíduo apresentaram melhor desempenho mecânico que os corpos-de-prova das argamassas convencionais, evidenciando o efeito positivo da substituição do aglomerante por estes percentuais de CCA.

Na Figura 4.20 estão apresentados os valores do comportamento mecânico dos corpos-de-prova das argamassas no traço 1:8, convencional e alternativo, sendo este o traço que apresentou, no geral, menores valores de RCS, estando de acordo com Lawrence et al (2003) que explicam que menos cimento implica menos produtos formados pelas reações de hidratação e, conseqüentemente, menor RCS. Dentre os traços estudados, o traço 1:8 é o que contém menor proporção do aglomerante, mesmo assim os valores de RCS obtidos foram bem significativos, principalmente se observarmos os critérios da norma da ABNT NBR 13279 (2001) que estabelece como padrão I as argamassas com  $0,1\text{MPa} < \text{RCS} < 4,0\text{MPa}$ , aos 28 dias de cura, onde enquadra-se este traço.

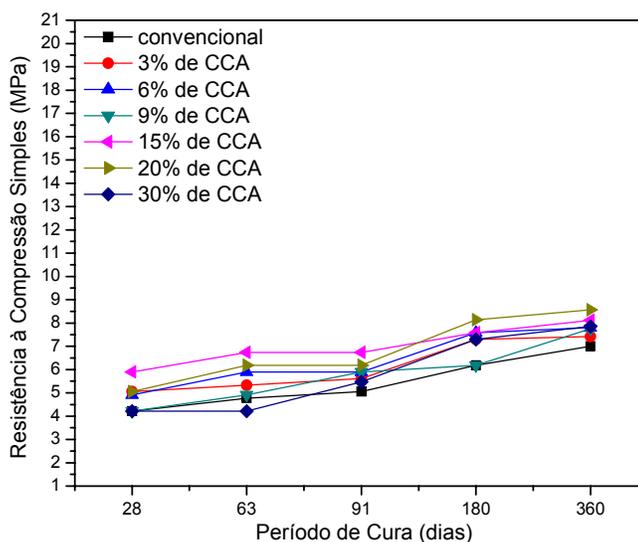


Figura 4.20 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com CCA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.

Analisando ainda o traço 1:8 observou-se que apenas o traço com 30% de incorporação do resíduo CCA apresentou resultado de RCS inferior aos dos corpos-de-prova da argamassa convencional, aos 63 dias de cura. Para 91 e 180 dias de cura, todos os corpos-de-prova incorporados com CCA obtiveram melhor desempenho mecânico que os corpos-de-prova da argamassa convencional, sendo os corpos-de-prova incorporados com 20% e 30% de CCA, que

apresentaram maiores percentuais de acréscimo, com valores de: 31,72%, e 33,46, respectivamente.

Observou-se, de modo geral, que inicialmente, após 28 dias de cura, não havia correlação direta entre a resistência à compressão simples e o teor de incorporação de CCA, uma vez que os corpos-de-prova incorporados com CCA apresentaram nos primeiros dias de cura, valores de RCS inferiores aos corpos-de-prova sem o resíduo, evidenciando-se que o aumento da RCS pode está relacionado, possivelmente, com as reações pozolânicas entre a cinza de casca de arroz e o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento.

#### 4.4.2 Estudo das argamassas com casca de arroz (CA)

Nas Figuras 4.21 e 4.22 estão apresentados os valores de absorção dos corpos-de-prova das argamassas, no traço 1:4, 1:6 e 1:8, convencionais e alternativas, incorporados com resíduo de casca de arroz em substituição ao agregado miúdo, nos percentuais de 10% e 20%, para os períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

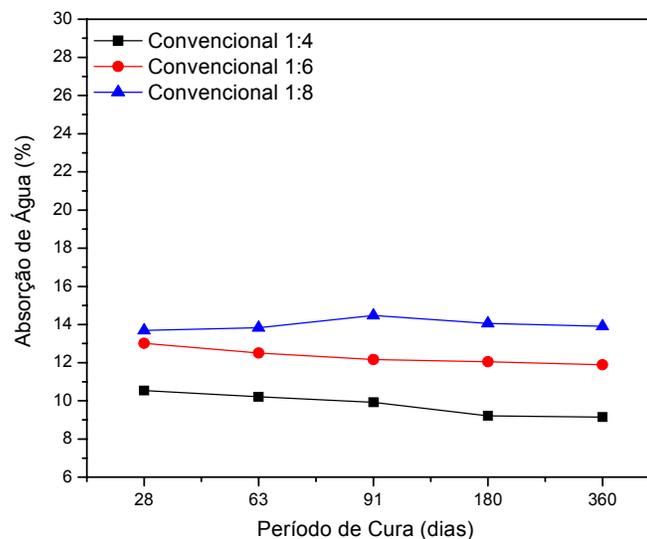


Figura 4.21 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Observou-se que os valores de absorção de água dos corpos-de-prova da argamassa convencional, traços 1:4, 1:6 e 1:8, variaram entre 10,00% e 20,00%, diminuindo com o período de cura. O comportamento da absorção destes corpos-de-prova foi similar aos de Mehta e Monteiro (1994), o qual observou que o comportamento da absorção em compósitos à base de

cimento tende a diminuir com o aumento do período de cura, devido ao melhor empacotamento dos grãos e melhor adensamento da pasta. Os corpos-de-prova das argamassas alternativas, com incorporação de 10% e 20% do resíduo no traço tiveram valores de absorção bem mais elevados que a argamassa convencional, isto é justificável pela presença da casca de arroz, que tem um alto índice de absorção, em torno de 114%. Verificou-se ainda que quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo por casca de arroz, maior o índice de absorção, uma vez que a casca é um resíduo poroso, o que ocasionará um maior índice de vazios, influenciando no teor de absorção.

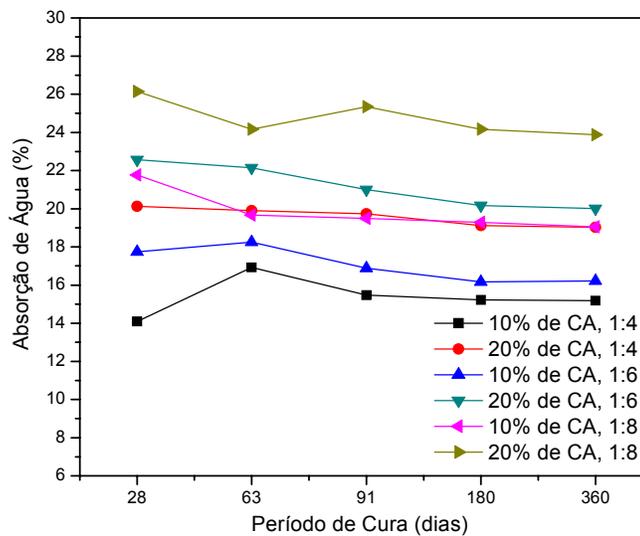


Figura 4.22 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Os traços 1:6 e 1:8 apresentaram valores de absorção semelhante ao traço 1:4, ou seja, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo por casca de arroz, maior o teor de absorção. O índice de absorção da argamassa convencional, traço 1:6 variou de 13,02% a 11,89%, diminuindo com o período de cura. Já as argamassas com 10% e 20% do resíduo casca de arroz, tiveram seus valores de absorção variando de 17,74% a 16,22%, argamassa com 10% CA e de 22,57% a 20,01%, argamassa com 20% de CA.

O traço 1:8 dos corpos-de-prova da argamassa convencional, por conter uma proporção de agregado miúdo maior que os demais, já apresenta valores de absorção elevados e, conseqüentemente, as argamassas com o resíduo CA tendem a apresentar valores mais elevados devido à presença da casca, como já comentado anteriormente.

Verificou-se, de um modo geral, que os corpos-de-prova com incorporação da CA tiveram seus valores de absorção reduzidos com o período de cura e que quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo por casca de arroz, maior o índice de absorção.

Na Tabela 4.13 estão apresentados os valores da densidade aparente para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com percentuais de casca de arroz, no processo de cura em câmara úmida, curados por períodos de 28 e 360 dias.

Tabela 4.13 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28 e 360 dias.

Traços	% CA	Cura úmida (C.U.)			
		DAp (g/cm <sup>3</sup> )	RCS	DAp (g/cm <sup>3</sup> )	RCS
		28 dias	(MPa)	360 dias	(MPa)
1:4	0%	2,300	14,04	2,309	16,84
	10%	2,064	4,21	2,138	6,86
	20%	2,000	3,09	2,034	4,51
1:6	0%	2,160	7,86	2,217	8,42
	10%	2,028	3,35	2,094	5,35
	20%	1,937	2,50	2,002	2,68
1:8	0%	2,100	4,21	2,159	7,00
	10%	2,019	3,37	2,035	4,79
	20%	1,968	1,68	2,008	2,75

Verificou-se que quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo por casca de arroz, menor a densidade, o que se justifica, pois a casca de arroz é um material bem mais leve que o agregado miúdo, apresentando densidade de 0,12g/cm<sup>3</sup>, enquanto que para o agregado miúdo tem-se uma densidade de 1,49g/cm<sup>3</sup>. Os maiores valores de densidade aparente, tanto aos 28 dias quanto aos 360 dias de cura foram para os traços 1:4, 1:6 e 1:8 com 10% de substituição do agregado miúdo por casca de arroz, sendo, respectivamente: 2,064g/cm<sup>3</sup>; 2,028g/cm<sup>3</sup> e 2,019g/cm<sup>3</sup>, para 28 dias e 2,138g/cm<sup>3</sup>, 2,094g/cm<sup>3</sup> e 2,035g/cm<sup>3</sup> para 360 dias de cura.

Comparando-se os valores da densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas com incorporação do resíduo casca de arroz com os corpos-de-prova das argamassas convencionais, verificou-se uma redução da densidade, conferindo maior leveza aos corpos-de-prova incorporados com a casca de arroz.

Pôde-se observar também que a densidade está diretamente ligada à resistência à compressão simples e quanto maior a densidade aparente destes corpos-de-prova, maior a RCS, verificando-se que aos 28 e 360 dias de cura os corpos-de-prova das argamassas convencionais

apresentaram maiores valores de densidade aparente de  $2,300\text{g/cm}^3$  e  $2,309\text{g/cm}^3$ , com valores de RCS correspondentes a  $14,04\text{MPa}$  e  $16,84\text{MPa}$ , respectivamente.

Nas Figuras 4.23 a 4.28 estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo CA, curadas por períodos de 28 e 360 dias para os traços 1:4, 1:6 e 1:8. Estudos complementares de análise térmica diferencial foram realizados para verificar as fases em que ocorreram as transformações endotérmicas e exotérmicas dos corpos-de-prova das argamassas.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, dos corpos-de-prova de argamassa convencional, para os traços 1:4, 1:6 e 1:8, período de cura de 28 e 360 dias, nas Figuras 4.23 a 4.28, observou-se que os corpos-de-prova apresentaram picos endotérmicos em  $120^\circ\text{C}$  referente à presença de água livre, seguido de outro pico endotérmico por volta de  $150^\circ\text{C}$  referente, provavelmente, à presença de água adsorvida na superfície externa das partículas e/ou água coordenada aos cátions. Observou-se, nas argamassas convencionais, a presença de picos endotérmicos em  $525^\circ\text{C}$  referente à presença do hidróxido de cálcio. Em todas as composições, na temperatura de  $575^\circ\text{C}$ , verificou-se pico endotérmico referente à inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Também se observou pico endotérmico em  $820^\circ\text{C}$ , relacionado, provavelmente, ao carbonato de cálcio. Apenas o traço 1:8, aos 360 dias de cura não apresentou o pico relacionado ao hidróxido de cálcio.

Nos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com percentuais de casca de arroz, traços 1:4, 1:6 e 1:8, com percentuais de 10% e 20% de CA verificou-se a presença do pico endotérmico em  $120^\circ\text{C}$ , caracterizando a presença de água livre. Todos os corpos-de-prova com incorporação do resíduo de casca de arroz apresentaram a presença de banda exotérmica, entre as temperaturas de  $215^\circ\text{C}$  e  $450^\circ\text{C}$  referente à presença de matéria orgânica. Observou-se ainda a presença de picos endotérmicos por volta de  $570^\circ\text{C}$  e outro por volta de  $820^\circ\text{C}$ , relacionados, provavelmente, a inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$  e decomposição do carbonato de cálcio, respectivamente. E os traços 1:4 e 1:8, com 10% de CA, apresentaram pico endotérmico referente à presença do hidróxido de cálcio, nos demais corpos-de-prova incorporados com CA não se observou picos endotérmicos relacionado à decomposição do hidróxido de cálcio, liberado pela hidratação do cimento, possivelmente, este material foi todo transformado em carbonato de cálcio, conforme indica os termogramas, ou pode ter ficado “mascarado” devido à intensidade da banda referente à presença de matéria orgânica.

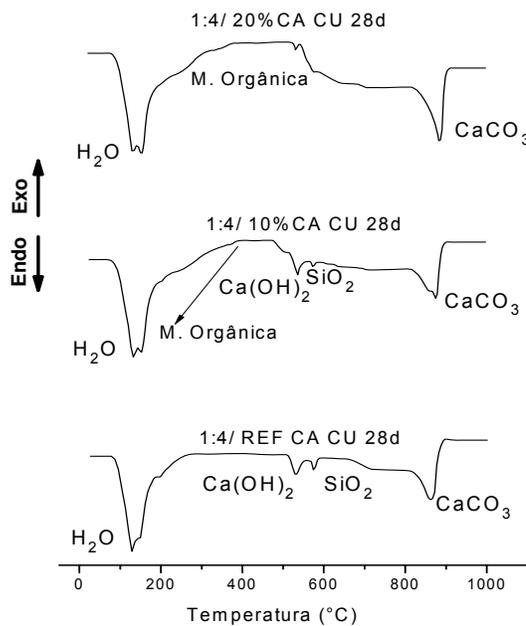


Figura 4.23 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.

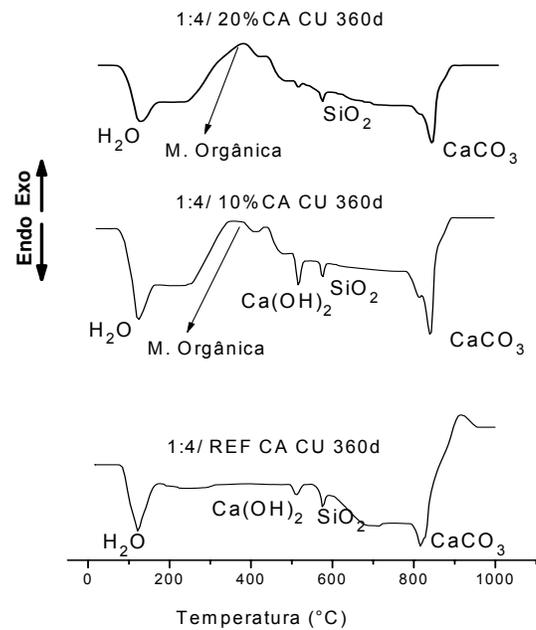


Figura 4.24 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.

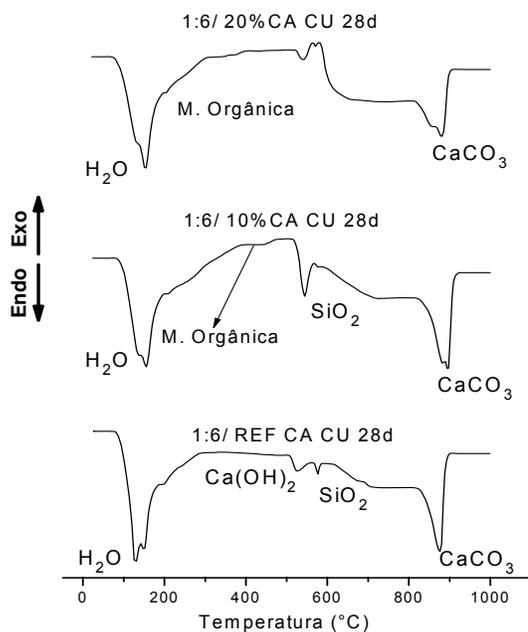


Figura 4.25 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 28 dias.

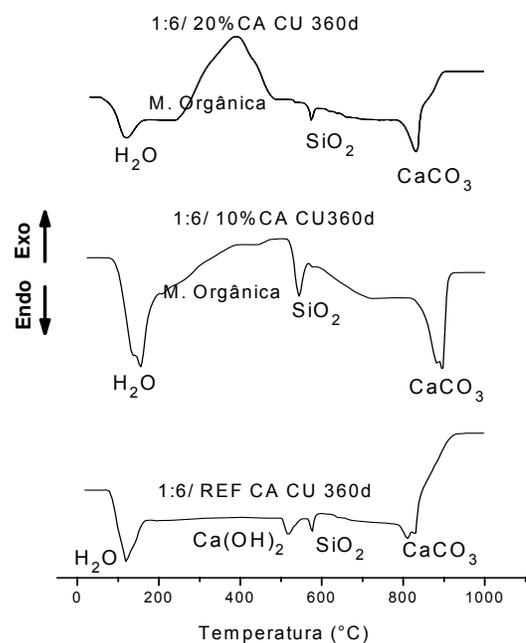


Figura 4.26 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 360 dias.

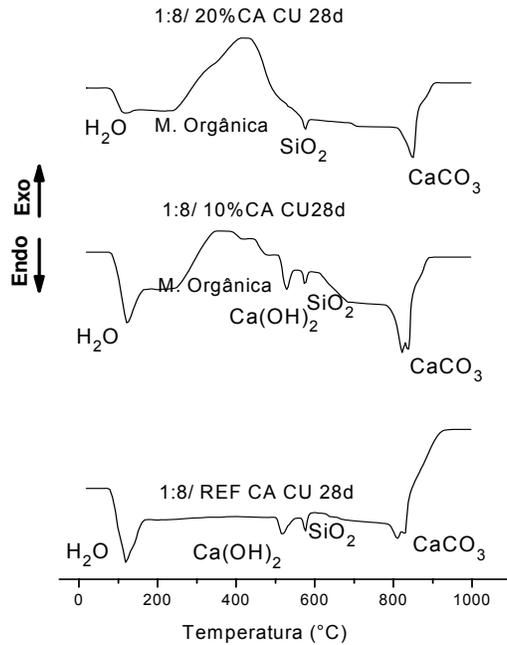


Figura 4.27 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 28 dias.

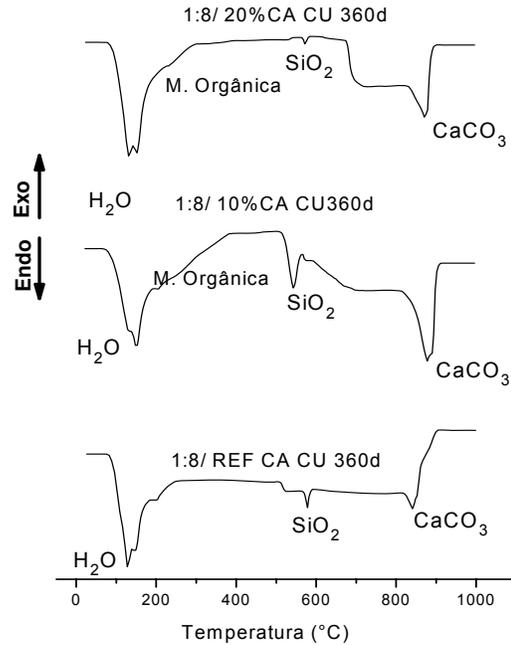


Figura 4.28 – Curvas DTA dos corpos-de-prova convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 360 dias.

Na Figura 4.29 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas no traço 1:4, convencionais e alternativos, com incorporação do resíduo casca de arroz, para os períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

A NBR 13279 (2001) classifica as argamassas como padrão I, àquelas que apresentam valores de resistência à compressão simples variando entre  $0,1 \text{ MPa} \leq \text{RCS} < 4,0 \text{ MPa}$ , aos 28 dias de cura. As argamassas alternativas em estudo, traço 1:4, apresentaram valores de RCS, aos 28 dias de cura, de 4,21MPa e 3,09MPa, respectivamente, para os percentuais de incorporação de 10% e 20% de resíduo, classificando-se como padrão I.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 4.29 observou-se que os corpos-de-prova das argamassas convencionais apresentaram elevados valores de RCS, quando comparados aos valores dos corpos-de-prova das argamassas alternativas sendo de 14,04MPa aos 28 dias de cura e de 16,84MPa aos 180 dias de cura, mantendo-se constante até os 360 dias.

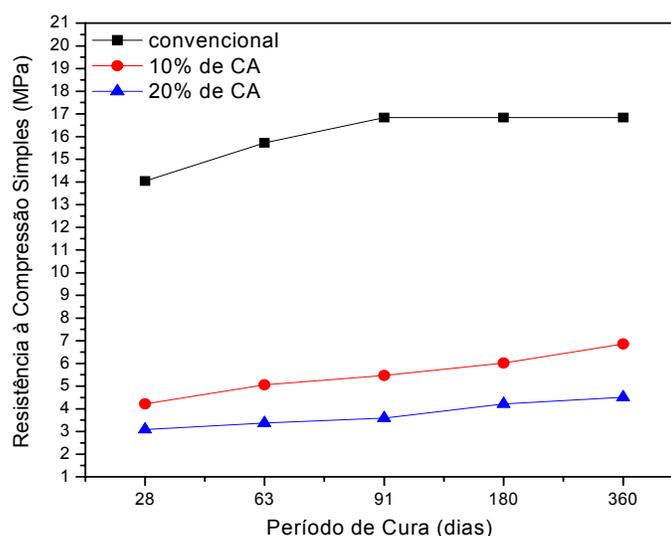


Figura 4.29 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.

Comparando a RCS dos corpos-de-prova convencionais com os alternativos, incorporados com 10% e 20% de casca de arroz, verificou-se uma diminuição significativa nos valores da RCS. No entanto os corpos-de-prova incorporados com casca de arroz apresentaram melhora do desempenho mecânico com o aumento do período de cura, variando de 4,21MPa (28 dias de cura) a 6,86MPa (360 dias de cura), um acréscimo de 63%, para os corpos-de-prova com 10% de CA e de 3,09MPa a 4,51MPa, com acréscimo de 46%, para os corpos-de-prova com 20% de CA, no traço 1:4, estando em consonância com as resultados apresentados anteriormente para a absorção de água (Figura 4.22) e para densidade aparente (Tabela 4.13).

Na Figura 4.30 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, traço 1:6, com incorporação do resíduo casca de arroz, para os períodos de cura de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

Os corpos-de-prova das argamassas alternativas, traço 1:6, com incorporação de 10% e 20% de CA apresentaram valores de resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura, de 3,65MPa e 2,50MPa, respectivamente, encontrando-se dentro das especificações da ABNT, NBR 13279 (2001), para argamassa classificada como padrão I, podendo-se concluir que este resíduo pode ser empregado em obras de construção civil.

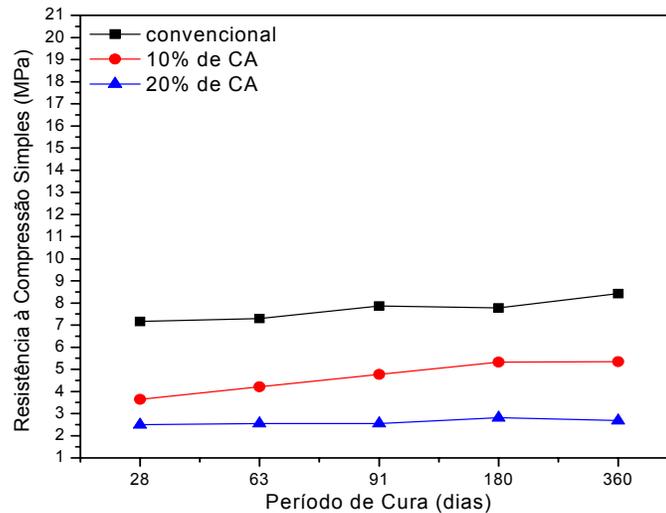


Figura 4.30 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.

Verificou-se para a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova do traço 1:6, convencionais e incorporados com resíduo casca de arroz, que ocorreu um aumento com o período de cura para todas as composições, enquanto a absorção diminuiu, conforme se verificou anteriormente, sendo os corpos-de-prova das argamassas convencionais os que apresentaram maiores valores de RCS em todos os períodos de cura.

Na Figura 4.31 estão apresentados os resultados da resistência à compressão simples para os corpos-de-prova das argamassas do traço 1:8 com e sem incorporação de casca de arroz.

Analisando os resultados da resistência à compressão simples para os corpos-de-prova do traço 1:8, sem incorporação do resíduo casca de arroz, observou-se que este traço apresentou melhor desempenho mecânico, sendo de 4,21MPa, aos 28 dias de cura e 7,00MPa, aos 360 dias de cura.

As argamassas com 10% e 20% de casca de arroz apresentaram valores de 3,37MPa e 1,68MPa, aos 28 dias de cura e 4,79MPa e 2,75MPa, aos 360 dias de cura, classificando-se, conforme NBR 13279 (2001), como padrão I, ou seja,  $0,1 \text{ MPa} \leq \text{RCS} < 4,0 \text{ MPa}$ , aos 28 dias de cura.

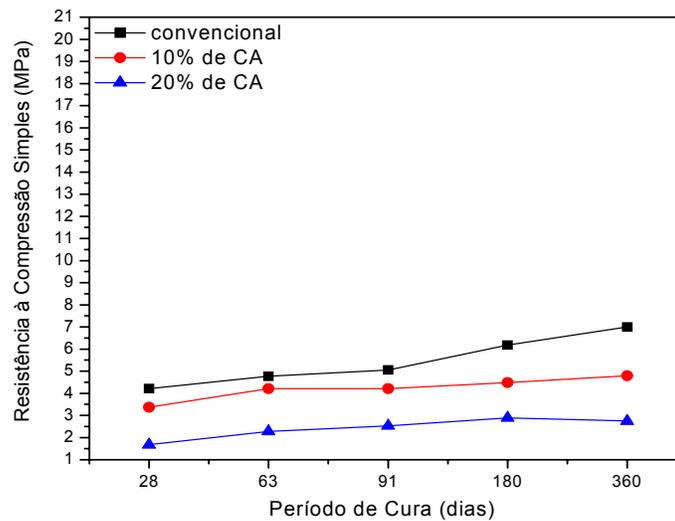


Figura 4.31 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.

Na Figura 4.32 está apresentada uma visão geral dos valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas alternativas, com incorporação do resíduo casca de arroz em 10% e 20%, para todos os traços, onde se observa que os corpos-de-prova das argamassas com percentuais de 10% de incorporação da casca de arroz em substituição ao agregado miúdo foram os que apresentaram melhor desempenho mecânico.

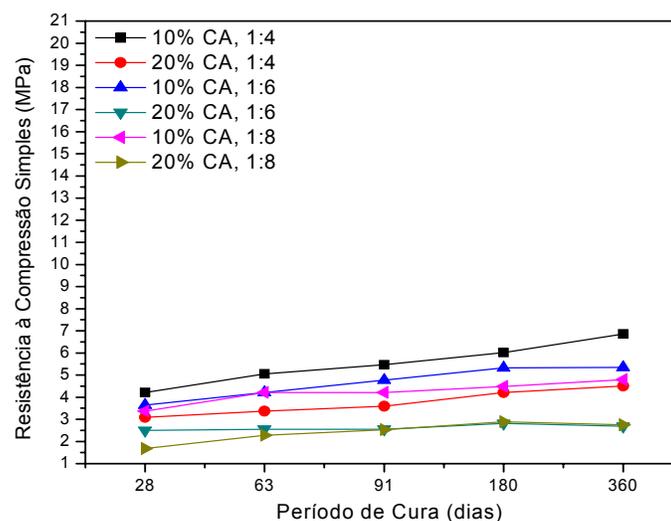


Figura 4.32 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4; 1:6 e 1:8.

## 4.5 AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO

### 4.5.1 Estudo das argamassas com cinza de casca de arroz (CCA)

#### 4.5.1.1 Difração de raios X (DRX) – traços 1:4; 1:6 e 1:8

Nas Figuras 4.33 a 4.36 estão apresentados os difratogramas de raios X dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporadas com 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, no traço 1:4, por períodos de cura de 28, 91, 180 e 360 dias, seguidas do envelhecimento acelerado, com 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem, respectivamente.

Nos difratogramas da argamassa no traço 1:4 de referência e com cinza de casca de arroz, foram identificadas, em todas as composições, as seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,118Å, 2,627Å e 1,815Å. O hidróxido de cálcio é formado a partir da reação entre o silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ou silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), presentes no clínquer, e a água. Observou-se a presença da etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ) ou monossulfato hidratado, caracterizando-se pelas distâncias interplanares 4,909Å e 3,193Å. A etringita é formada nos primeiros períodos de hidratação, quando a concentração de sulfatos ainda é alta. Percebeu-se também em todas as composições a presença da fase do dióxido de silício cristalino ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizando-se pelas distâncias interplanares: 4,248Å, 3,336Å, 2,453Å e 1,815Å. O  $\text{SiO}_2$  é oriundo do agregado miúdo, sendo observado picos intensos e dominantes nos ensaios de DRX, sugerindo uma predominância deste material, como composto cristalino nas amostras examinadas. Observou-se também discreta presença do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), caracterizado pelas distâncias interplanares: 3,652Å e 2,454Å. Segundo Monteiro (2003), o produto CSH é um gel de silicato de cálcio cuja composição se modifica durante a hidratação. Este produto é responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento. Foi verificada ainda no difratograma a presença discreta de outras fases, como: alita (A;  $\text{C}_3\text{S}$ ), calcita (C;  $\text{CaCO}_3$ ), aluminato tricálcico (At;  $\text{C}_3\text{A}$ ) e belita (B;  $\text{C}_2\text{S}$ ).

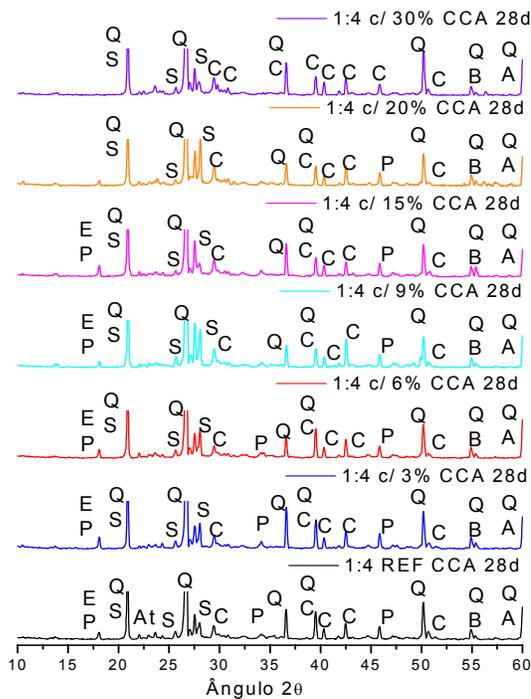


Figura 4.33 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.

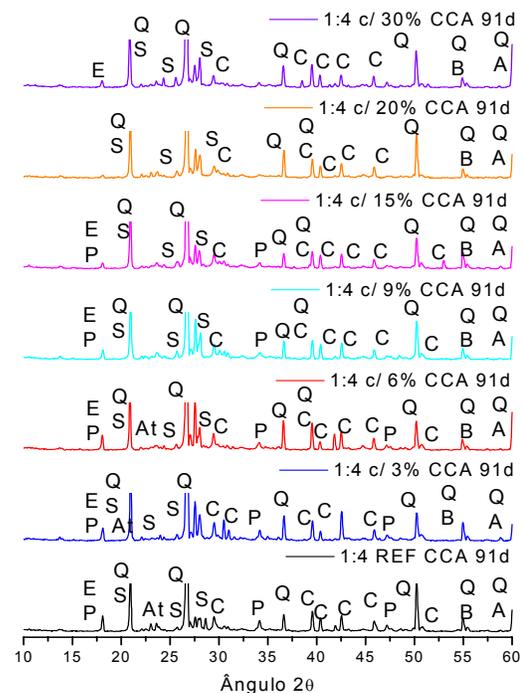


Figura 4.34 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 91 dias.

#### Legenda:

E – etringita;	A – alita ( $C_3S$ );
P – portlandita – $Ca(OH)_2$ ;	B – belita ( $C_2S$ ) e
Q – quartzo ( $SiO_2$ );	C – calcita ( $CaCO_3$ ).
S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H);	At – aluminato tricálcico – $C_3A$ ;

Analisando os corpos-de-prova das argamassas alternativas em função do teor de substituição do aglomerante pela cinza de casca de arroz, para os períodos de cura de 28 e 91 dias, observou-se a presença da portlandita em todos os traços, exceto no traço com 30% de CCA, confirmando o consumo deste componente na reação entre a adição mineral e o hidróxido de cálcio, conforme se verificou na análise térmica diferencial. Analisando o envelhecimento, verificou-se que há uma diminuição da fase portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), devido a reação pozolânica com a sílica presente na CCA e surgimento da calcita ( $CaCO_3$ ), em virtude da carbonatação das argamassas, principalmente aos 180 e 360 dias de cura, Figuras 4.35 e 4.36, o que poderá diminuir a resistência à compressão simples, caracterizando o início do envelhecimento. Mudanças de fase semelhantes foram observadas por Katz (2003) e Farias Filho (2007).

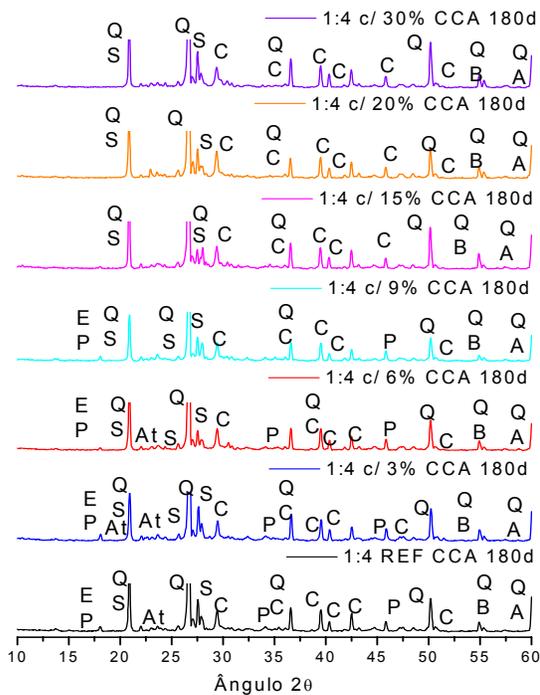


Figura 4.35 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 180 dias.

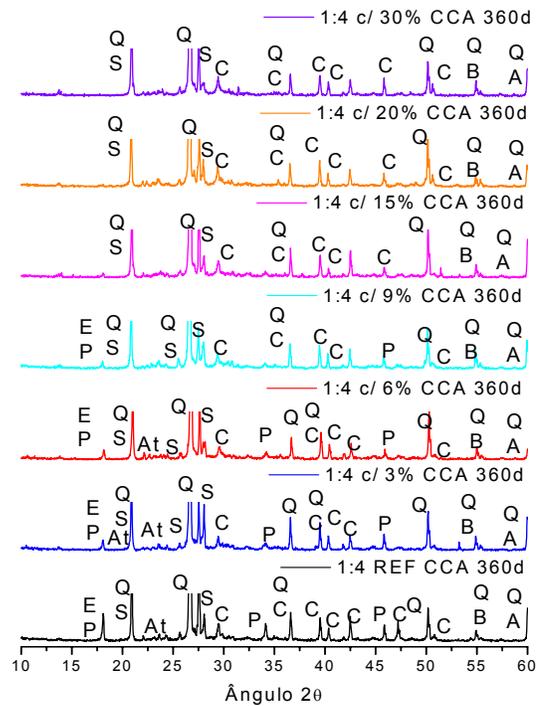


Figura 4.36 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.

Legenda:

E – etringita;	A – alita ( $C_3S$ );
P – portlandita – $Ca(OH)_2$ ;	B – belita ( $C_2S$ ) e
Q – quartzo ( $SiO_2$ );	C – calcita ( $CaCO_3$ ).
S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H);	At – aluminato tricálcico – $C_3A$ ;

Nas Figuras 4.37 a 4.40 estão apresentados os difratogramas de raios X dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporadas com cinza de casca de arroz, no traço 1:6, para os períodos de cura de 28, 91, 180 e 360 dias, envelhecimento acelerado, após ciclos de molhagem e secagem de 10, 30, 40 e 50, ciclos. Os difratogramas estão apresentados com um aumento (zoom) no eixo vertical, a fim de evidenciar melhor os picos associados às fases menores que são de difícil percepção em virtude da grande intensidade do  $SiO_2$ .

Analisando os difratogramas das Figuras 4.37 e 4.38, para os períodos de cura de 28 e 91 dias, após 10 e 30 ciclos de molhagem, respectivamente, verificou-se em todos os difratogramas dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com percentuais de cinza de casca de arroz, no traço 1:6, a presença das seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,177Å, 2,627Å. Verificaram-se também fases relacionadas ao quartzo ( $SiO_2$ ), caracterizado pelas distâncias

interplanares de 4,243Å, 2,452Å e 3,336Å, como fase dominante devido a grande presença do agregado miúdo que neste traço é na proporção de 6 partes para 1 de aglomerante. Observou-se a presença da etringita, sulfoaluminato de cálcio hidratado ( $C_6AS_3H_{32}$ ), caracterizada pelas distâncias interplanares 4,902Å e 3,756Å, que é formada nos primeiros períodos de hidratação. E o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) caracterizado pelas distâncias interplanares: 3,238Å e 2,453Å. Outras fases como alita (A), calcita (C), aluminato tricálcico (At) e belita (B), também foram observadas.

Avaliando os corpos-de-prova das argamassas, traço 1:6, em função da incorporação de CCA, verificou-se, aos 28 e 91 dias de cura, que com o aumento do teor de incorporação do resíduo para 30% de cinza de casca de arroz ocorreu toda a reação entre a portlandita ou hidróxido de cálcio com a CCA, ou seja, ocorreu toda a reação pozolânica.

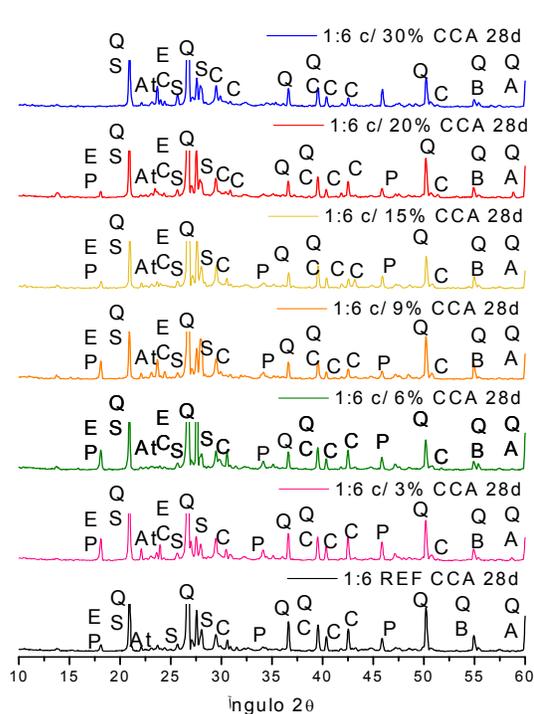


Figura 4.37 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.

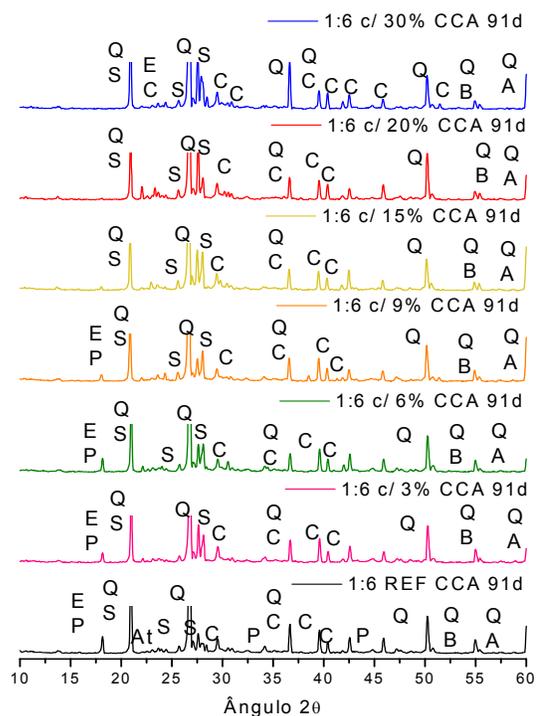


Figura 4.38 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 91 dias.

#### Legenda:

E – etringita;  
 P – portlandita –  $Ca(OH)_2$ ;  
 Q – quartzo ( $SiO_2$ );  
 S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H);

A – alita ( $C_3S$ );  
 B – belita ( $C_2S$ ) e  
 C – calcita ( $CaCO_3$ ).  
 At – aluminato tricálcico –  $C_3A$ ;

Observou-se também no traço 1:6 que com o aumento do período de cura e do número dos ciclos de molhagem e secagem de 10 ciclos, aos 28 dias, para 50 ciclos aos 360 dias, ocorreu toda reação entre a portlandita ou hidróxido de cálcio e a CCA, nos traços com 15%, 20% e 30% de CCA. Também se observou com o aumento do período de cura o surgimento da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), em virtude da carbonatação, principalmente aos 180 e 360 dias, podendo ocasionar diminuição da resistência à compressão simples, sugerindo o início do envelhecimento.

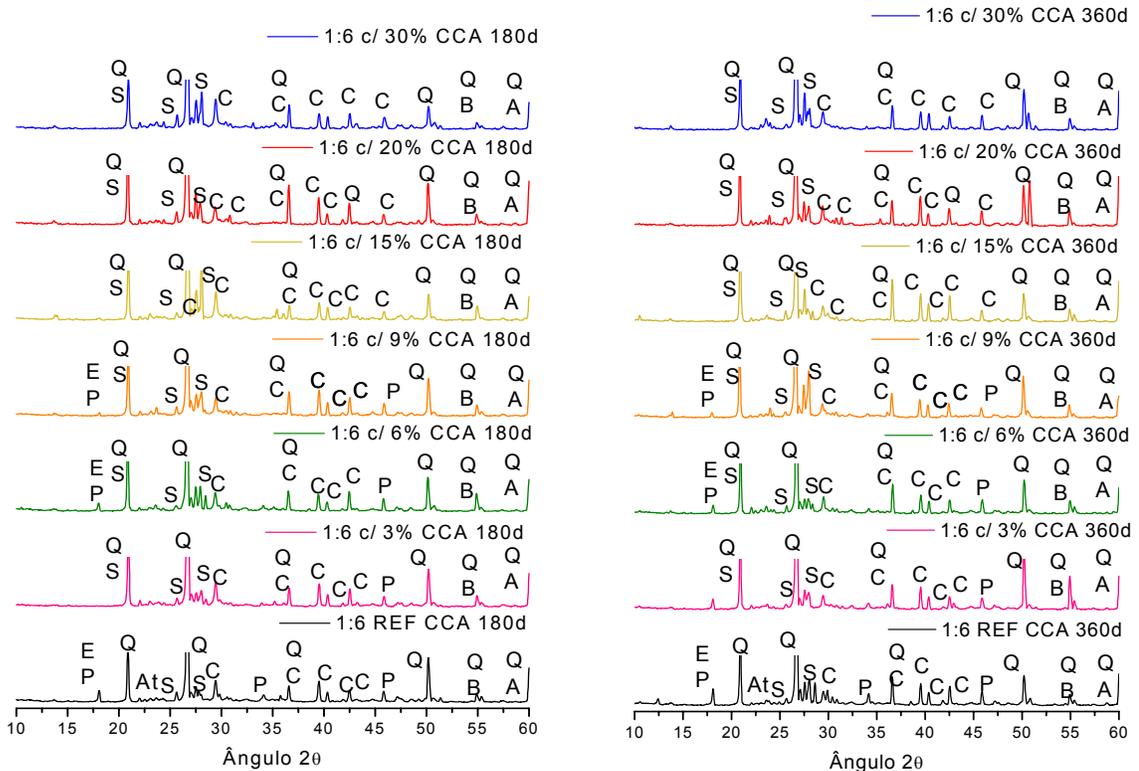


Figura 4.39 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 180 dias.

Figura 4.40 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.

#### Legenda:

- |  |  |
|--|--|
| E – etringita;                               | A – alita ( $\text{C}_3\text{S}$ );                |
| P – portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; | B – belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e              |
| Q – quartzo ( $\text{SiO}_2$ );              | C – calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).                   |
| S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H);    | At – aluminato tricálcico – $\text{C}_3\text{A}$ ; |

Nas Figuras 4.41 a 4.44 estão apresentados os difratogramas de raios X dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, traço 1:8, incorporadas com 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, curados por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, no envelhecimento acelerado, com 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem, respectivamente.

Analisando os resultados apresentados nos difratogramas dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporadas com o resíduo cinza de casca de arroz, no traço 1:8, foram identificadas as seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), caracterizada pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,177Å, 2,627Å; quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,243Å, 2,452Å e 3,336Å, como principal constituinte cristalino, em virtude da grande intensidade relativa do seu pico, em relação aos picos dos demais constituintes. Observou-se a presença da etringita, sulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), caracterizada pelas distâncias interplanares 4,902Å e 3,756Å. Verificou-se ainda a presença do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) caracterizado pelas distâncias interplanares: 3,238Å e 2,453Å, além da presença da calcita, belita e alita.

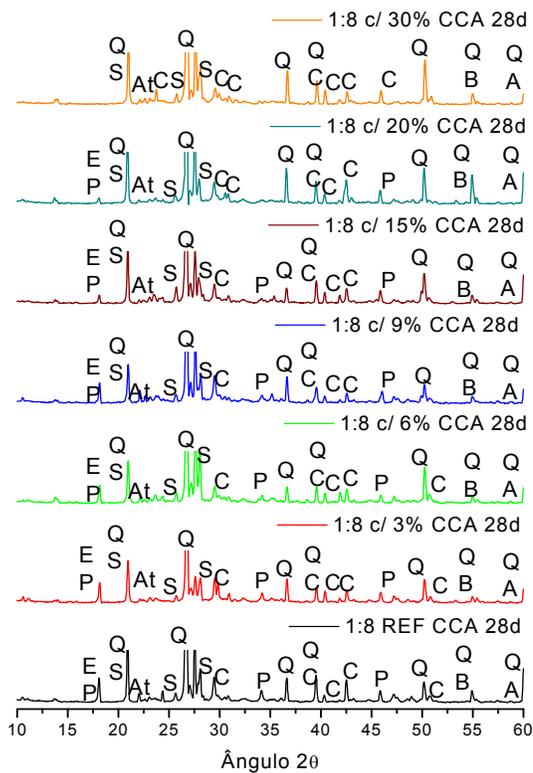


Figura 4.41 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.

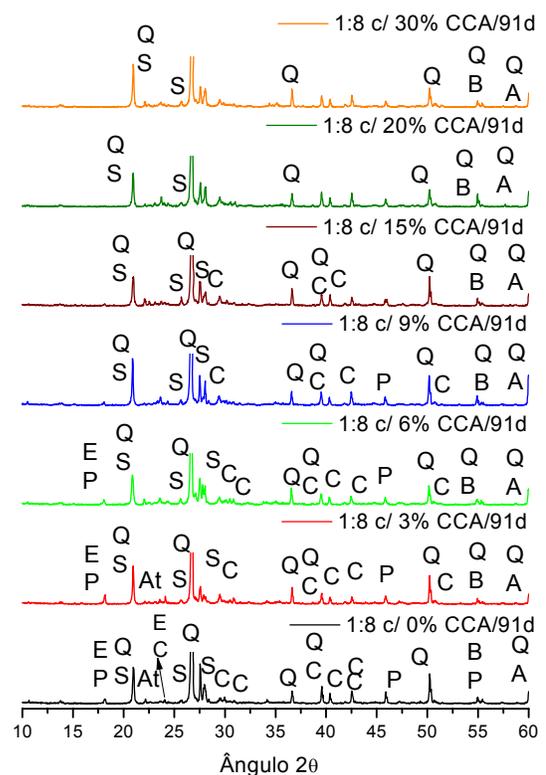


Figura 4.42 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 91 dias.

#### Legenda:

- |  |  |
|--|--|
| E – etringita;                               | A – alita ( $\text{C}_3\text{S}$ );                |
| P – portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; | B – belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e              |
| Q – quartzo ( $\text{SiO}_2$ );              | C – calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).                   |
| S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H);    | At – aluminato tricálcico – $\text{C}_3\text{A}$ ; |

Verificou-se que com o aumento do período de cura, de 28 para 360 dias, e do número dos ciclos de molhagem e secagem de 10 ciclos para 50 ciclos, ocorreu diminuição da portlandita ou hidróxido de cálcio e aumento da presença da calcita, nos traços com 9%, 15%, 20% e 30% de incorporação do resíduo CCA. Também se observou com o aumento do período de cura o surgimento da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), podendo influenciar no comportamento mecânico, ou seja, ocasionar decréscimo nos valores da resistência à compressão simples, sugerindo diminuição na durabilidade destes compósitos, e surgimento do envelhecimento da argamassa.

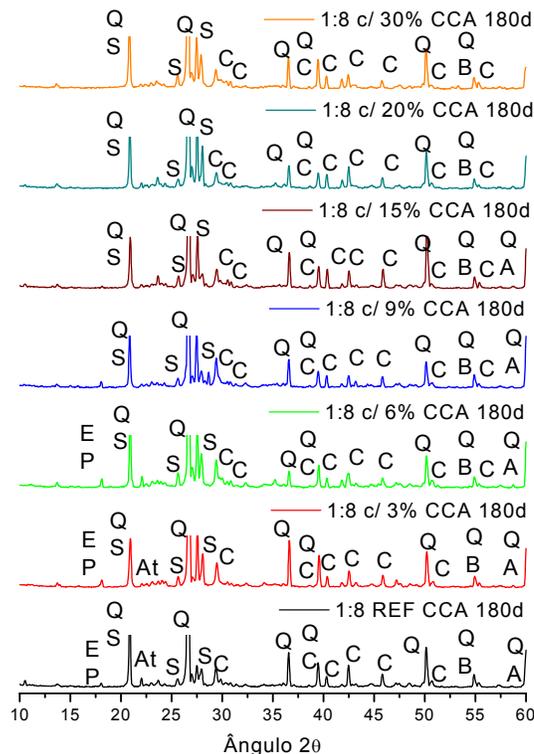


Figura 4.43 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 180 dias.

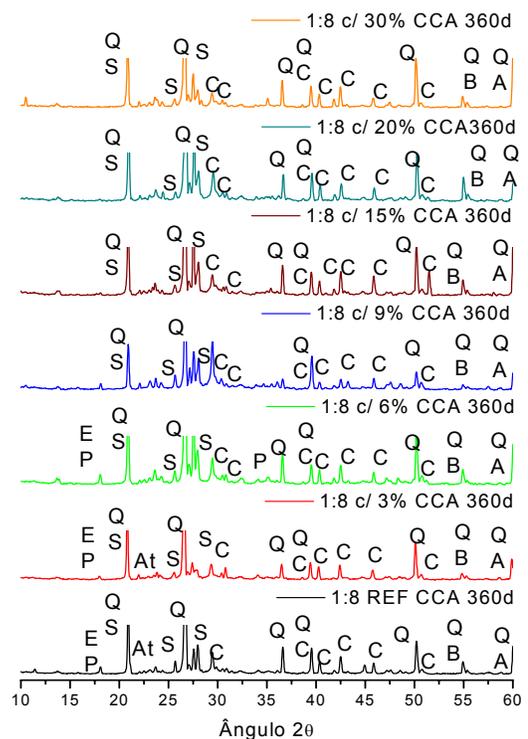


Figura 4.44 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.

#### 4.5.1.2 Análise térmica diferencial (DTA) – traços 1:4; 1:6 e 1:8

Nas Figuras 4.45 a 4.56 estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporados com resíduo CCA, curados por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, para os traços 1:4, 1:6 e 1:8, após 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

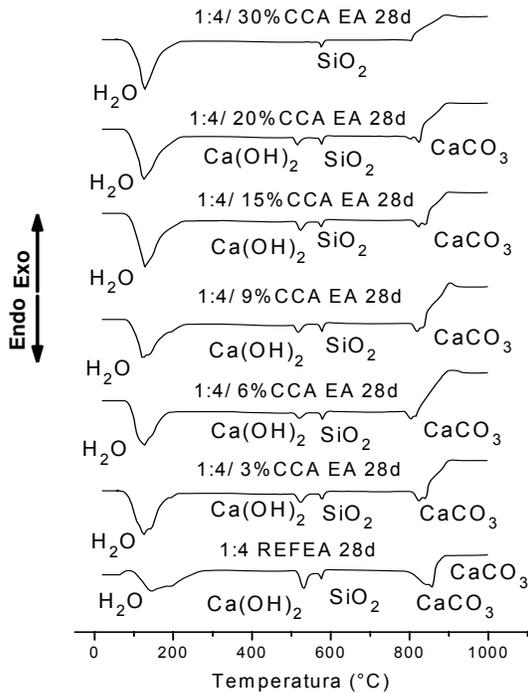


Figura 4.45 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 28 dias.

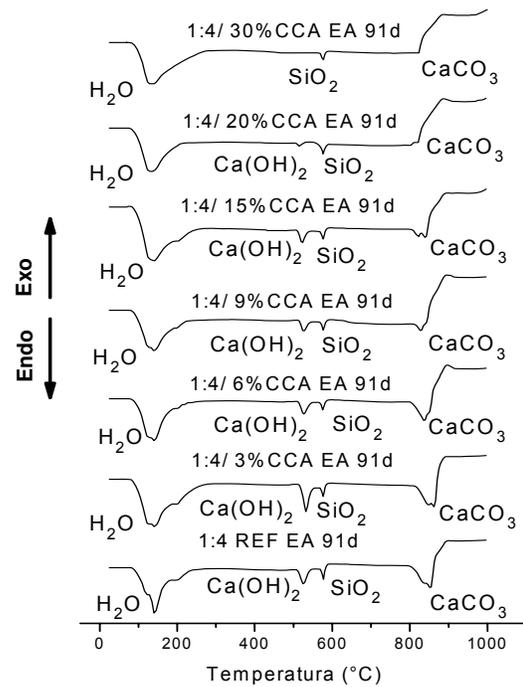


Figura 4.46 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 91 dias.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, para o traço 1:4, nas Figuras 4.45 a 4.48, observou-se que todos os corpos-de-prova das argamassas com e sem incorporação da cinza de casca de arroz, apresentaram picos endotérmicos na temperatura de, aproximadamente, 120°C, referente à presença de água livre, isto é, a água que está como fase líquida preenchendo os capilares da argamassa, que segundo Souza Santos (1989) este pico endotérmico é tanto mais intenso quanto mais água houver e ocorre, geralmente, a uma temperatura máxima de 140°C. Observou-se pico endotérmico na temperatura de 525°C, relacionado à presença do hidróxido de cálcio, nos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas com 3%, 6%, 9%, 15% e 20% de incorporação da CCA, nos períodos de cura de 28 e 91 dias. Os corpos-de-prova de argamassa com 30% de incorporação do resíduo CCA não apresentou o pico endotérmico relacionado à presença do hidróxido de cálcio, provavelmente a reação pozolânica com a CCA consumiu todo o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento, vindo ao encontro das observações realizadas com a difração de raios X, nas Figuras 4.33 e 4.34, analisadas anteriormente.

Com a evolução do tempo de cura e dos ciclos de degradação verificou-se, semelhantemente ao descrito anteriormente, que aos 180 dias e após 40 ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova incorporados com 20% 30% de CCA, Figuras 4.47, não apresentaram o pico endotérmico relacionado ao hidróxido de cálcio e aos 360 dias, após 50 ciclos de molhagem e secagem, nos traços incorporados com 15%, 20% e 30%, Figura 4.48, também não foi observado o pico referente à presença do hidróxido de cálcio, conforme já observado da difração de raios X, indicando que com a evolução do tempo de cura a reação entre a sílica e o hidróxido de cálcio consumiu todo  $\text{Ca(OH)}_2$  gerado pela hidratação do cimento, formando, possivelmente, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

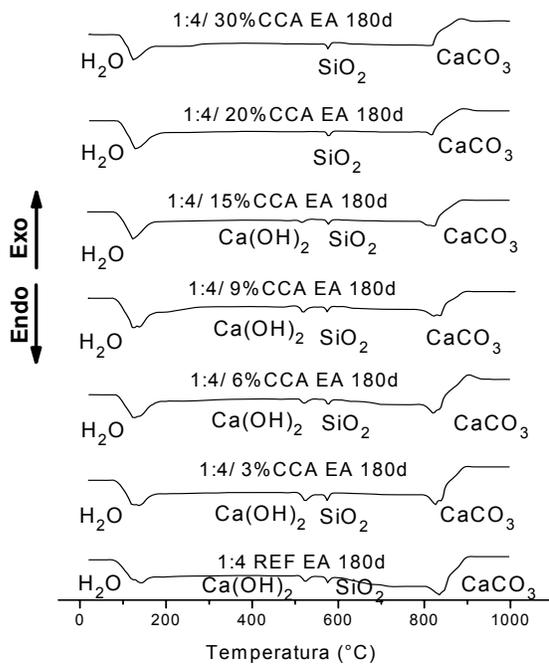


Figura 4.47 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 180 dias.

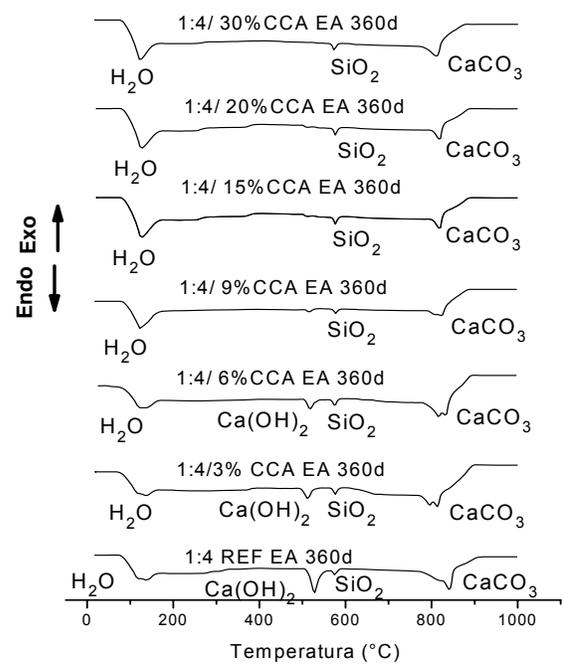


Figura 4.48 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:4, 360 dias.

Nas Figuras 4.49 a 4.52 estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporados com resíduo CCA, curados por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, para o traço 1:6, após 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, traço 1:6, apresentadas nas Figuras 4.49 a 4.52, observou-se que os corpos-de-prova das argamassas apresentaram o mesmo comportamento dos corpos-de-prova das argamassas no traço 1:4, com picos relacionados à

presença de água livre, em torno de 120°C. Nas temperaturas de, aproximadamente, 525°C ocorreu um pico endotérmico, referente ao hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), liberado pela hidratação do cimento. Este pico é referente à presença de portlandita, uma das principais fases dos compósitos à base de cimento. A cerca de 570°C observou-se pico endotérmico devido à presença do quartzo, referente à transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Segundo a literatura, os picos endotérmicos referentes à transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ , aparecem, na curva de DTA, com um pico endotérmico a uma temperatura máxima de 570°C. Pode-se observar que nas amostras estudadas estes picos ocorreram em torno desta temperatura. A uma temperatura variando entre 800°C e 850°C ocorreu um pico endotérmico duplo, acredita-se que ambos referem-se à presença do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), porém em grau de cristalização diferente.

Nos termogramas do traço 1:6, aos 91, 180 e 360 dias de cura, também não se observou os picos relacionados à decomposição do hidróxido de cálcio, nas composições com 20% e 30% de CCA, em conformidade aos difratogramas já comentados anteriormente.

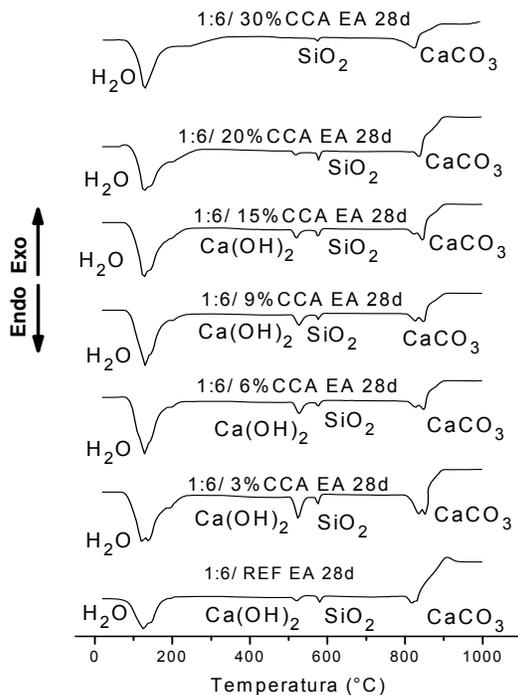


Figura 4.49 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 28 dias.

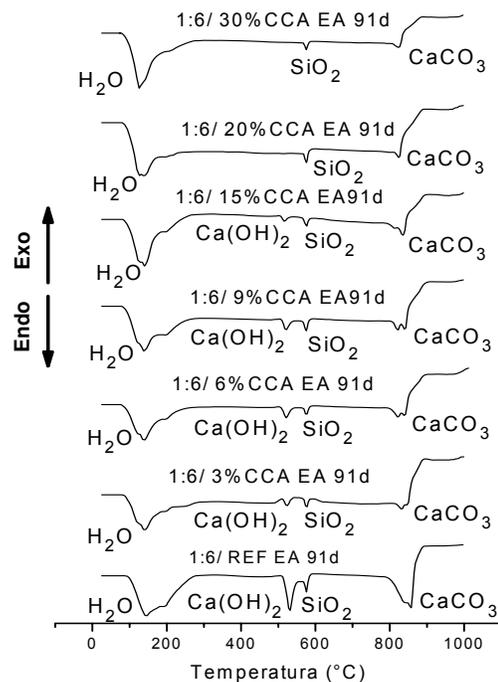


Figura 4.50 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 91 dias.

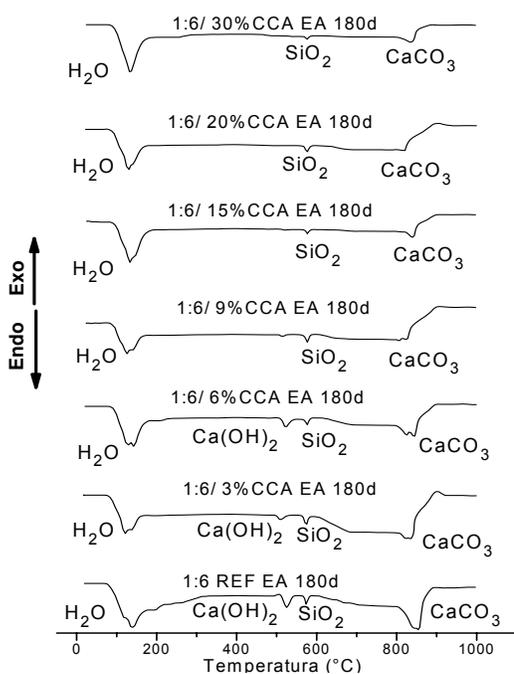


Figura 4.51 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 180 dias.

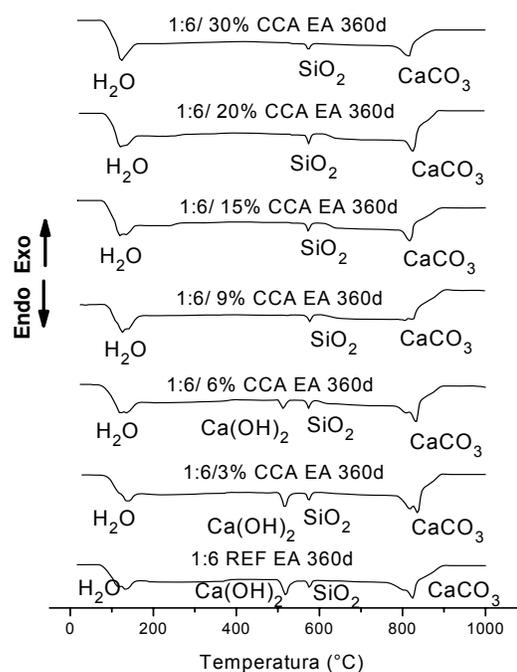


Figura 4.52 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:6, 360 dias.

Nas Figuras 4.53 a 4.56 estão apresentadas as curvas de DTA para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporados com resíduo CCA, curados por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, para o traço 1:8, após 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, traço 1:8, verificou-se a presença de água livre, caracterizada por pico endotérmico em, aproximadamente, 120°C, para todas as composições dos corpos-de-prova das argamassas com e sem incorporação da cinza de casca de arroz. Para os corpos-de-prova convencionais e com incorporação de 3%, 6% e 9% de CCA, aos 28, 91, 180 e 360 dias de cura na temperatura de 525°C, observou-se pico endotérmico relacionado à presença do hidróxido de cálcio e pico endotérmico para temperatura de 575°C, referente à transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Com a evolução do processo de cura, aos 180 e 360 dias, não se observou a presença do pico relacionado ao hidróxido de cálcio nos corpos-de-prova com incorporação de 15%, 20% e 30% de CCA, evidenciando-se que a reação pozolânica consumiu todo o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento. Em todas as composições, na temperatura de, aproximadamente, 820°C, ocorreu pico endotérmico, relacionado à presença do carbonato de cálcio, podendo afetar o comportamento mecânico dos corpos-de-prova.

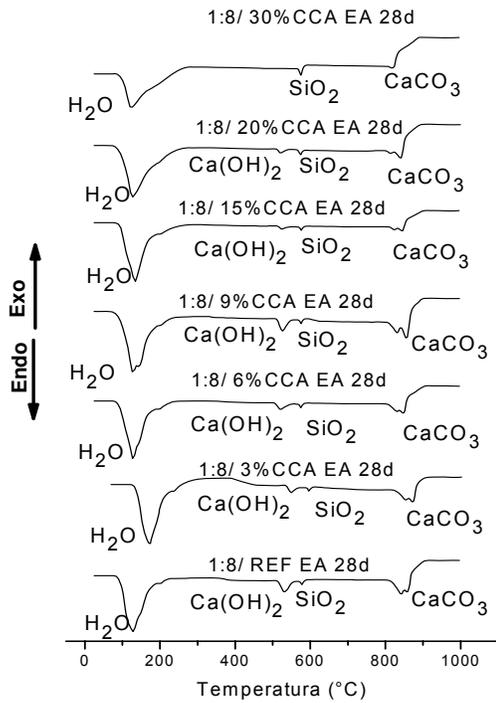


Figura 4.53 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 28 dias.

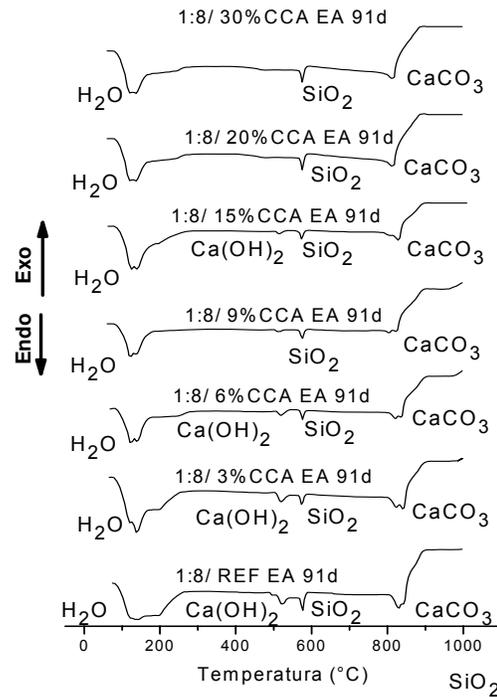


Figura 4.54 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 91 dias.

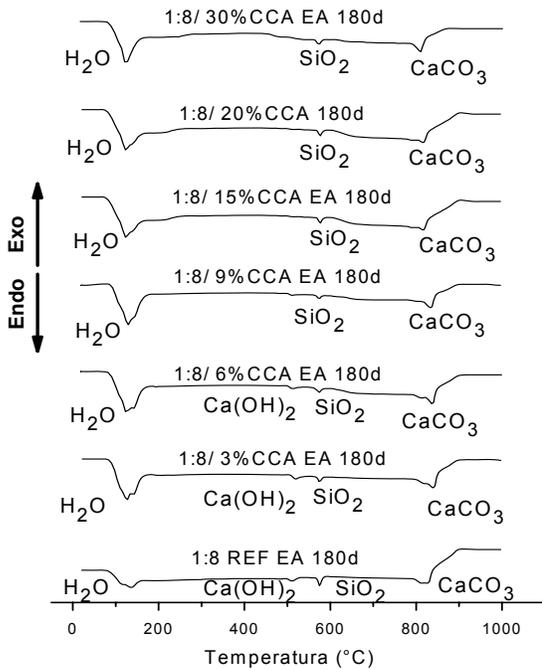


Figura 4.55 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 180 dias.

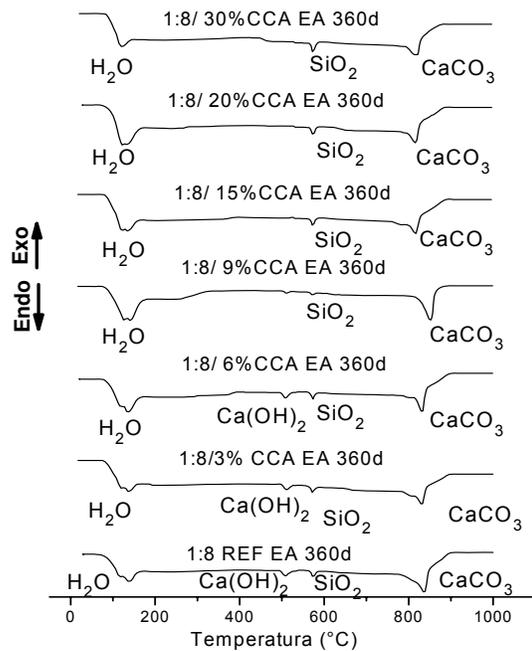


Figura 4.56 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CCA, traço 1:8, 360 dias.

#### 4.5.1.3 Absorção de água, traços 1:4; 1:6 e 1:8

Nesta etapa avalia-se a absorção de água para os corpos-de-prova das argamassas nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, convencional e com seus respectivos percentuais de incorporação, ou seja: 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de CCA, para as idades de 28, 63, 91, 180 e 360 dias de moldagem, após 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem conforme gráficos abaixo apresentados nas Figuras 4.57 a 4.59.

Na Figura 4.57 estão apresentados os valores de absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com cinza de casca de arroz, curadas por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, após 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem, envelhecimento acelerado, para o traço 1:4.

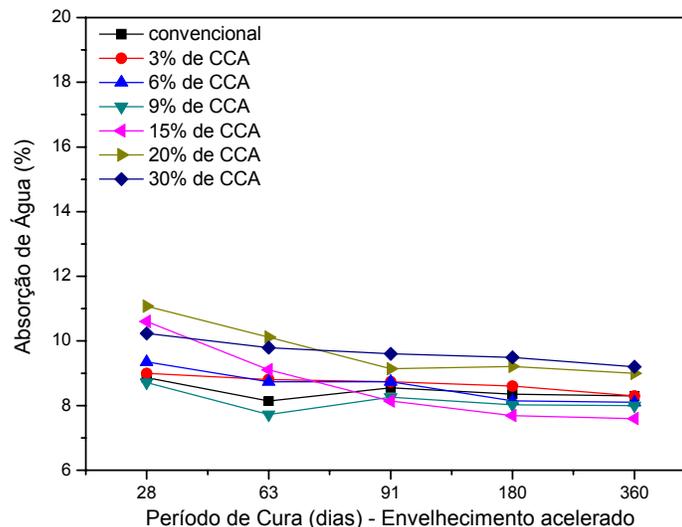


Figura 4.57 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 4.57, para o comportamento da absorção, dos corpos-de-prova no traço 1:4, convencional e com incorporação de cinza de casca de arroz nos percentuais de 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, observou-se que aos 28 dias de cura as argamassas com maior percentual de CCA em sua composição foram as que apresentaram maiores índices de absorção, devido, provavelmente, ainda não ter ocorrido reações pozolânicas suficientes que diminuíssem a absorção do sistema, o que está associado ao empacotamento das partículas dentro do composto.

Verificou-se, com o aumento do processo de cura, que os menores índices de absorção de água ocorreram nos corpos-de-prova das argamassas com 15% de incorporação da cinza de casca de arroz em substituição ao aglomerante, seguido dos corpos-de-prova com 9% de incorporação do resíduo. Observou-se ainda que os corpos-de-prova das argamassas convencionais, ou seja, sem incorporação do resíduo CCA e os corpos-de-prova com 20% e 30% de CCA, apresentaram maiores índices de absorção, em praticamente todos os períodos de cura.

De um modo geral, observou-se diminuição no índice de absorção de água para a maioria dos corpos-de-prova incorporados com CCA, o que está em consonância com Diamond et al (2004) os quais observaram que durante o processo de hidratação de compósitos com adições minerais ou cinzas com função de sílica, os canais capilares da pasta no estado fresco começam a ser preenchidos pelos produtos de hidratação. Esse processo reduz rapidamente o volume e tamanho dos capilares, não implicando necessariamente na interrupção da sua continuidade, no entanto pode ocasionar uma diminuição no índice de absorção.

Na Figura 4.58 estão apresentados os dados de absorção dos corpos-de-prova das argamassas convencionais, no traço 1:6, bem como os incorporados com teores de cinza de casca de arroz em substituição ao aglomerante em 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, e após 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

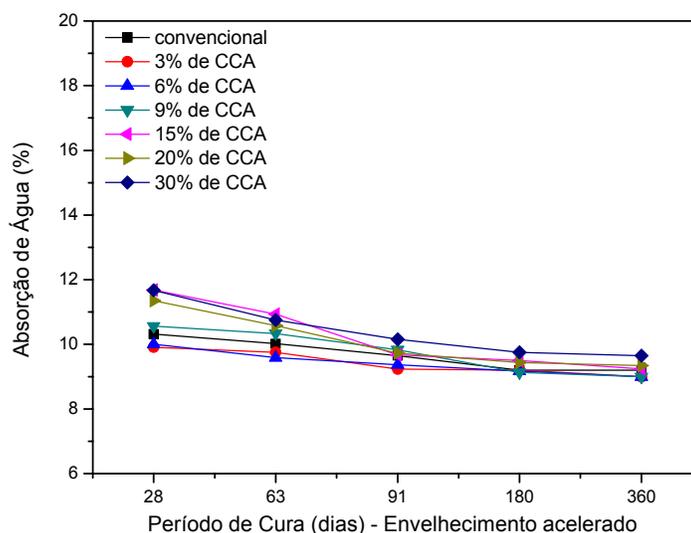


Figura 4.58 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.

Analisando o gráfico da absorção para o traço 1:6 verificou-se que, aos 28 dias de cura, os traços com maiores percentuais de cinza de casca de arroz apresentaram percentuais de absorção superiores aos traços com menores teores de CCA, com valores de: 11,68%, 11,35% e 11,67%, para 15%, 20% e 30%, respectivamente.

Observou-se, no entanto, que os traços com maiores percentuais de incorporação de CCA, ou seja, 20% e 30%, também apresentaram maiores valores de absorção de água, isto pode ter ocorrido devido a cinza de casca de arroz ser muito fina e ter um caráter poroso, formando uma estrutura floculosa, a qual absorve muita água, porém pode-se verificar que com o aumento do período de cura, em todas as composições avaliadas, o teor de absorção diminuiu, provavelmente ocorreu uma melhor densificação da estrutura interna da argamassa, através da reação pozolânica com o fechamento dos canalículos existentes, promovendo a desconexão entre poros e quebrando o caminho, fato também verificado por Helene (2008) no estudo de concretos com adições minerais. Pesquisadores como Naik et al (1997) e Barringer (1997) são unânimes em afirmar que entre as vantagens do uso de materiais pozolânicos no concreto e nas argamassas encontra-se a redução da porosidade, além dos aspectos técnico-econômicos e ecológicos.

Na Figura 4.59 estão apresentados os valores da absorção de água das argamassas convencionais e incorporadas com cinza de casca de arroz, no processo de envelhecimento acelerado, para o traço 1:8.

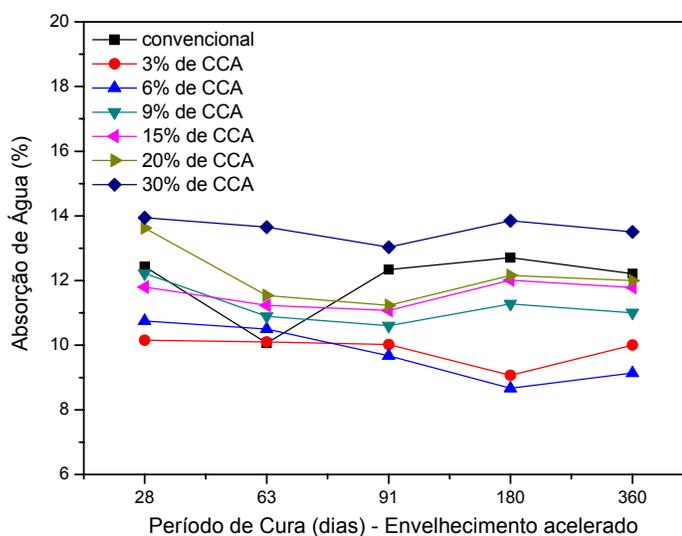


Figura 4.59 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.

Analisando o gráfico da absorção para o traço 1:8 verificou-se que, aos 28 dias de cura, os traços com maiores percentuais de cinza de casca de arroz, 20% e 30%, apresentaram percentuais de absorção superiores ao traço de referência, cujos resultados foram: 13,62%, 13,94% respectivamente, enquanto os corpos-de-prova da argamassa convencional apresentaram resultado de 12,43%. Já as argamassas com percentuais de 3%, 6%, 9% e 15% obtiveram índices de absorção inferiores, sendo de: 10,15%, 10,75%, 12,22% e 11,80%.

Observou-se que aos 91 dias de cura, após 30 ciclos de molhagem e secagem, todos os traços tiveram seus valores de absorção inferiores aos resultados para 28 dias de cura, no entanto, para o período de cura de 180 dias de cura e após 40 ciclos de molhagem e secagem, o índice de absorção comportou-se, para os traços com 9%, 15%, 20% e 30% de CCA, diferentemente do esperado, e seus valores aumentaram com o tempo de cura, provavelmente, devido estes traços conterem maiores percentuais de CCA, esta em vez de atuar preenchendo os vazios e quebrando a intercomunicabilidade entre os poros, tenha formado uma estrutura flocular, desta forma absorvendo mais água, no entanto quando se comparou os valores da absorção entre os períodos de cura de 360 dias e 28 dias, verificou-se uma redução da absorção em 1,77%, 1,48%, 14,98%, 9,98%, 0,17%, 11,89% e 3,13%, para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com resíduos cinza de casca de arroz.

#### 4.5.1.4 Ensaio da densidade aparente (D<sub>Ap</sub>), traços 1:4; 1:6 e 1:8

Na Tabela 4.14 estão apresentados os valores para a densidade das argamassas, no período de cura de 28 e 360 dias, após 10 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

Analisando os valores apresentados para a densidade aparente observou-se que a mesma varia de acordo com o comportamento mecânico das argamassas e quanto maior o valor da RCS maior o valor da densidade aparente. Analisando o traço 1:4, argamassa convencional, para o período de 28 dias de cura, foi o que apresentou maior valor de D<sub>Ap</sub>, de 2,300g/cm<sup>3</sup> bem como também obteve maior valor RCS, sendo de 17,41MPa, neste período. Verificou-se que com o aumento do período de cura de 28 para 360 dias, a densidade aparente de todos os corpos-de-prova também aumentou, isto pode está relacionado com o efeito das reações pozolânicas ou o efeito filler, ocasionando densificação das argamassas, com diminuição do índice de vazios capilares e, conseqüentemente, aumentando o valor da densidade das argamassas.

Tabela 4.14 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28 e 360 dias.

Traços	% CCA	Envelhecimento Acelerado (E.A.)			
		DAP (g/cm <sup>3</sup> )	RCS	DAP (g/cm <sup>3</sup> )	RCS
		28 dias	MPa	360 dias	MPa
1:4	0%	2,300	17,41	2,314	12,63
	3%	2,230	11,69	2,309	12,63
	6%	2,241	14,91	2,314	12,63
	9%	2,244	12,63	2,316	15,44
	15%	2,269	13,76	2,351	16,84
	20%	2,215	10,95	2,270	11,90
	30%	2,195	10,81	2,170	10,11
1:6	0%	2,160	7,16	2,175	6,32
	3%	2,181	8,70	2,186	6,84
	6%	2,234	8,70	2,191	7,02
	9%	2,164	7,16	2,205	8,42
	15%	2,102	5,05	2,275	8,42
	20%	2,166	8,42	2,284	8,98
	30%	2,138	5,90	2,202	6,95
1:8	0%	2,100	4,21	2,168	4,21
	3%	2,214	5,61	2,299	5,69
	6%	2,109	6,40	2,290	5,47
	9%	2,165	5,05	2,200	4,21
	15%	2,224	5,90	2,312	5,90
	20%	2,211	4,21	2,217	4,21
	30%	2,210	6,06	2,239	5,05

#### 4.5.1.5 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS), traços 1:4; 1:6 e 1:8.

Na Figura 4.60 estão apresentados os resultados para a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de argamassa, no traço 1:4, sem adição do resíduo e com percentuais de substituições do aglomerante por cinza de casca de arroz em 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%.

Analisando os corpos-de-prova no traço convencional, observou-se que seu comportamento mecânico não apresentou muita variação nos valores de RCS até 91 dias de cura, em relação aos períodos de 28 e 63 dias. Notando-se que aos 28 e 63 dias de cura os valores de RCS destes corpos-de-prova foram superiores aos valores dos corpos-de-prova incorporados com resíduo CCA em substituição ao aglomerante. Estes resultados podem estar relacionados com o fato de que as reações pozolânicas acontecem mais lentamente e contribuem para a densificação do concreto e/ou argamassa em idades mais avançadas, (YEAU e KIM, 2005). Aos 63 dias de

cura e após 20 ciclos de molhagem e secagem, o traço de referência apresentou um acréscimo na resistência de 0,70%, o que corresponde a um ganho de menos de 1MPa, porém estes valores ainda são superiores aos valores dos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com CCA. Aos 180 dias de cura, após 40 ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova da argamassa convencional apresentaram diminuição no desempenho mecânico, com perda de resistência de 24,20%, o que corresponde a 4,21MPa, podendo está relacionado ao envelhecimento da argamassa e, conseqüentemente sua influência no comportamento mecânico, uma vez que verificou-se nos ensaios de caracterização (difração de raios X e análise térmica diferencial), o processo de carbonatação.

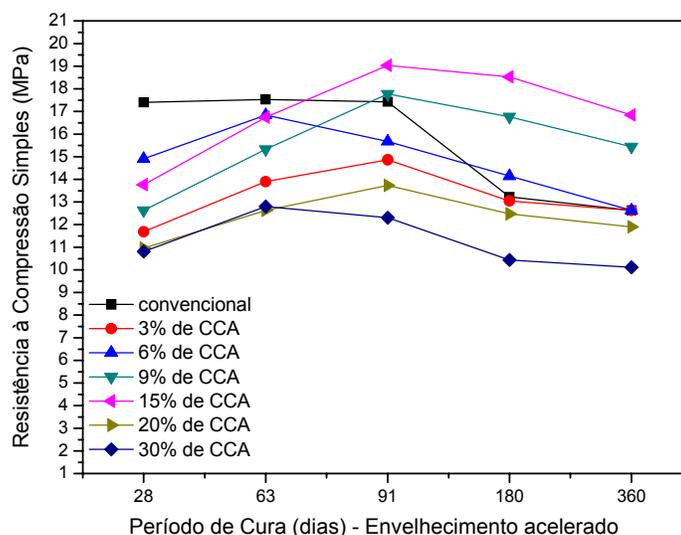


Figura 4.60 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:4.

Os traços contendo cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento apresentam, entre os períodos de 28 e 91 dias de cura, acréscimo da RCS de 27,20%; 5,10%; 40,70%; 38,30%; 25,40% e 13,80%, o que corresponde a um ganho de resistência de 3,20MPa; 0,76MPa; 5,14MPa; 5,27MPa; 2,78MPa e 1,50MPa, para os traços com 3%; 6%; 9%; 15%; 20% e 30% de CCA, respectivamente. Winslow et al (1994) observaram que adições minerais introduzidas ao concreto e às argamassas diminuem tanto a porosidade quanto a conectividade entre os poros, aumentando, conseqüentemente, a RCS e Rodríguez de Sensalle e Reina (2004) constataram em suas pesquisas que, após 91 dias de cura, compósitos contendo CCA em substituição ao cimento, apresentaram melhores resultados de RCS quando comparados aos

compósitos sem adição, devido ao progresso da reação pozolânica, que ocasiona ganho de RCS ao longo do período de cura. Assim, acredita-se que a melhora no comportamento mecânico está associada tanto à reação pozolânica quanto ao efeito filler. A reação pozolânica se desencadeia porque a sílica é vulnerável ao hidróxido de cálcio e pela fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso de algumas adições minerais (FENG et al, 2007).

Tan e Gjorv (1996) verificaram que a incorporação de 10% de sílica ativa, material com propriedades semelhantes à cinza de casca de arroz, elevou a RCS, aos 63 dias de cura, em até 30%, em relação à mistura com cimento puro. Neste mesmo período de cura, para uma incorporação de 9% de CCA em substituição ao cimento observou-se um acréscimo na RCS de 24% com relação aos 28 dias de cura, resultado compatível ao encontrado pelo referido autor.

Em relação à durabilidade dos corpos-de-prova das argamassas com 3%; 6%; 9%; 15%; 20% e 30%, tendo como parâmetro de avaliação a RCS, observou-se, na Figura 4.60, que com o tempo de envelhecimento e com o aumento no número de ciclos de molhagem e secagem, os valores da RCS dos corpos-de-prova começaram a decrescer, atingindo, ao final dos 360 dias de cura e após 50 ciclos de molhagem e secagem redução na RCS, com relação aos 91 dias de cura, de: 15,06%; 19,40%; 13,11%; 11,51%; 13,33 e 17,80%, equivalentes a: 2,24MPa; 3,04MPa; 2,33MPa; 2,19MPa; 1,83MPa e 2,19MPa, respectivamente. Estes resultados confirmam estudos realizados por Farias Filho (2007) sobre a influência da carbonatação no comportamento mecânico e conseqüentemente na durabilidade das argamassas quando submetidas ao envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, cujo processo diminui a RCS.

Observou-se ainda que os corpos-de-prova das argamassas com 20% e 30% de CCA foram as composições que apresentaram menores valores de RCS, sendo de 11,90MPa e 10,11MPa, aos 360 dias de cura, respectivamente. Tiboni (2007) também observou que adições ou substituições de teores maiores que 15% resultam em menores ganhos de resistência, provavelmente porque a quantidade de hidróxido de cálcio foi insuficiente para reagir com a pozolana adicionada à pasta, sobrando, neste caso, cinza de casca de arroz (sílica). A pesquisadora acredita também que composições com teores de adição mineral acima de 15% podem apresentar menores empacotamentos, em virtude do caráter poroso da sílica, o que compromete a RCS. Verificou-se ainda que os corpos-de-prova da argamassa sem adição de CCA foi a que apresentou, aos 360 dias de cura, maior redução da resistência, cerca de 27,50%. Com o processo de aceleração do envelhecimento, pode-se concluir que a presença de CCA na

composição dos traços de argamassa minimiza o envelhecimento, melhorando a durabilidade do compósito.

Na Figura 4.61 estão apresentados os resultados para a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas, no traço 1:6, convencionais e incorporadas com cinza de casca de arroz em substituição ao aglomerante, em percentuais de 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

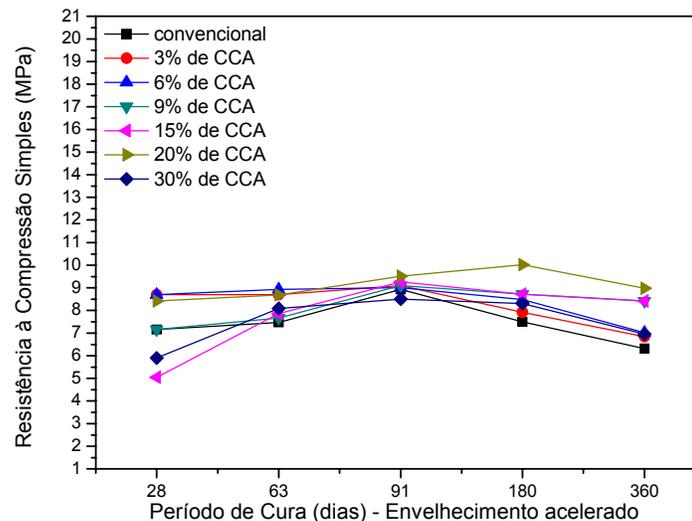


Figura 4.61 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:6.

Analisando o traço 1:6 dos corpos-de-prova convencionais, observou-se que seu comportamento mecânico variou em 24,72 %, entre o período de 28 e 91 dias de cura, seguido de um decréscimo de, aproximadamente, 16% aos 180 dias de cura, após 40 ciclos de molhagem e secagem. Notou-se que aos 28 dias de cura os valores de RCS deste traço foram superiores aos valores dos traços com substituições de 20 e 30% do aglomerante por CCA, estando em consonância com os valores de absorção, analisados anteriormente. No entanto aos 180 dias de cura, observou-se uma diminuição no desempenho mecânico com relação aos demais traços contendo CCA, o que pode estar relacionado ao envelhecimento da argamassa e, conseqüentemente sua influência no comportamento mecânico, evidenciando que os corpos-de-prova de argamassa incorporados com CCA são mais resistentes ao desgaste provocado pelos ciclos de molhagem.

Em relação à durabilidade das argamassas com 3%; 6%; 9%; 15%; 20% e 30%, tendo como parâmetro de avaliação a RCS, observou-se, na Figura 4.61, que até 91 dias de cura e com 30 ciclos de molhagem e secagem, as argamassas não sofreram perda de resistência, porém com o tempo de envelhecimento aumentando para 360 dias e 50 ciclos de molhagem e secagem, os valores da RCS das argamassas começam a decrescer, atingindo, ao final dos 360 dias de cura redução na RCS, com relação aos 91 dias de cura, de: 24,84%; 22,09%; 7,47%; 9,07%; 5,67% e 18,33%, equivalente a: 2,26MPa; 1,99MPa; 0,68MPa; 0,84MPa; 0,54MPa e 1,56MPa, respectivamente, sendo os traços com menos incorporações os que apresentaram maiores decréscimos de RCS.

Os menores valores de RCS em argamassas com pequenos percentuais de CCA podem está associados ao fato de que a quantidade de sílica (CCA) introduzida à pasta não foi suficiente para reagir com todo o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento o que possibilita uma reação química entre os hidróxidos ocasionando a carbonatação, conforme observado na difração de raios X e análise térmica diferencial. Segundo Cordeiro, 2006, embora a carbonatação, por si só, não constitua uma forma de degradação dos compósitos, todavia possibilitará reduzir a vida útil da estrutura e, conseqüentemente, sua durabilidade.

Por outro lado, com os ciclos de molhagem e secagem, possivelmente, se altera a estrutura do gel do C-S-H danificando a estrutura da matriz cimentícia, conseqüentemente ocasionando redução nos valores de RCS. Além disso os ciclos de envelhecimento afetam o processo de cristalização do C-S-H, não formando as fases cristalinas que melhorariam o comportamento mecânico do sistema.

Na Figura 4.62 estão apresentados os resultados para os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, com percentuais de substituições do aglomerante por cinza de casca de arroz em 3%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, curadas por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias.

Analisando os resultados para os corpos-de-prova da argamassa convencional, no traço 1:8, verificou-se que seu comportamento mecânico foi inferior ao das argamassas com adições de cinza de casca de arroz e que no período de 63 a 180 dias de cura o valor da RCS permaneceu praticamente constante, mesmo após exposição a 40 ciclos de molhagem e secagem, constatando que não ocorreu envelhecimento, neste período.

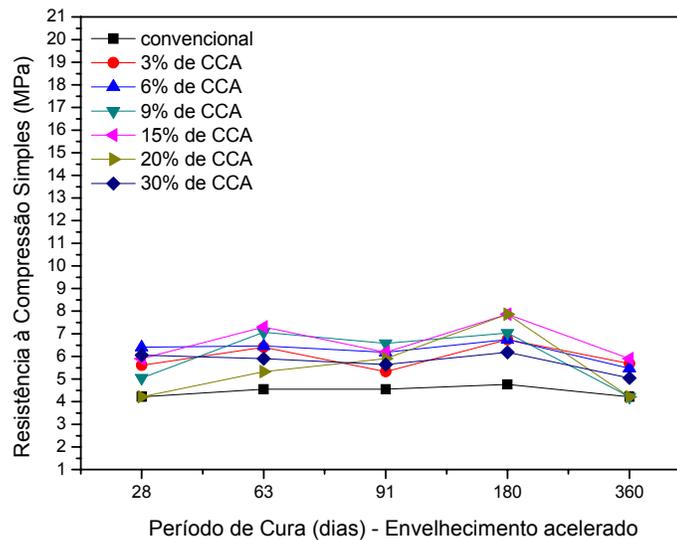


Figura 4.62 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CCA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traço 1:8.

Analisando os resultados para os corpos-de-prova das argamassas com percentuais de cinza de casca de arroz, observou-se que entre 63 e 91 dias de cura a RCS do traço com 6% de CCA não sofreu nenhuma alteração e o traço com 30% teve um pequeno decréscimo no valor da RCS, sendo de 4,40%. Aos 91 dias de cura verificou-se que todos os traços apresentaram redução nos valores da resistência à compressão simples, com exceção da argamassa com 20% de CCA em sua composição, no entanto, aos 180 dias de cura e após 40 ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova das argamassas apresentaram acréscimo na resistência à compressão simples, sendo as composições com 15% e 20% as que apresentaram melhor desempenho, com valores iguais de 7,86MPa. A argamassa com 30% de CCA apresentou valores inferiores às demais composições, semelhante aos estudos de Tiboni (2007), que verificou que teores de incorporação de CCA superiores a 15% não influenciavam num aumento significativo de resistência. Feng et al (2003) investigaram a RCS de concretos com adição de CCA e observaram que a RCS aumenta com a elevação do teor de incorporação. A razão para os incrementos de resistência nos concretos com CCA, acreditam os autores, é devido à melhoria na hidratação do cimento proporcionada pelo aumento do conteúdo de CCA e pelas reações pozolânicas entre a sílica e o hidróxido de cálcio, liberado durante a hidratação do cimento.

Comparando os resultados aos 360 dias de cura e 50 ciclos de molhagem e secagem com os resultados aos 180 dias de cura, verificou-se redução nos valores de RCS em todos os corpos-de-prova, com percentuais de: 11,55%, 15,58%, 18,84%, 40,11%, 24,95%, 46,44% e 18,28%, correspondendo a 0,55MPa; 1,05MPa; 1,27MPa; 2,82MPa; 1,96MPa; 3,65MPa e 1,13MPa.

#### 4.5.2 Estudo das argamassas com casca de arroz (CA)

Esta seção apresentou o comportamento dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporados com percentuais de CA em substituição do agregado miúdo por 10% e 20%, em traços distintos e peso em massa.

##### 4.5.2.1 Difração de raios X (DRX) – traços 1:4; 1:6 e 1:8

Nas Figuras 4.63 a 4.74 estão apresentados os difratogramas de raios X dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas, incorporados com 10% e 20% de casca de arroz, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, curados por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, seguidos do envelhecimento acelerado, com 10, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem, respectivamente.

Nos difratogramas dos corpos-de-prova das argamassas nos traços convencionais, 1:4, 1:6 e 1:8, foram identificadas, em todas as composições, as seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,118Å, 2,624Å e 1,816Å. Observou-se a presença da etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ) ou monossulfato hidratado de cálcio, caracterizando-se pelas distâncias interplanares 4,019Å, 4,909Å e 3,193Å. Verificou-se, em todas as argamassas, a presença da fase do dióxido de silício cristalino ( $\text{SiO}_2$ ), como fase dominante devido à grande presença de agregado miúdo, caracterizado pelas distâncias interplanares: 4,246Å, 3,337Å, 2,454Å e 1,816Å. Observou-se ainda uma discreta presença do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), caracterizado pelas distâncias interplanares: 3,652Å e 2,454Å, sendo este o produto responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento (Monteiro, 2003). Verificou-se a presença da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas seguintes distâncias interplanares: 3,032Å, 2,280Å e 3,114Å. Ainda nos difratogramas observou-se a presença de outras fases, como: alita (A), aluminato tricálcico (At) e belita (B).

Analisando os corpos-de-prova das argamassas em função do teor de substituição do agregado miúdo por percentuais de 10% e 20% de casca de arroz, observou-se em todas as argamassas a presença das mesmas fases observadas nos traços sem o resíduo, surgindo ainda uma fase relacionada, provavelmente, ao fosfato de amônia e potássio, caracterizado pelas

distâncias interplanares de: 3,745Å e 1,976Å. Acredita-se que a presença do fosfato de amônia e potássio deve-se ao uso de fertilizantes ou pesticidas na produção do arroz.

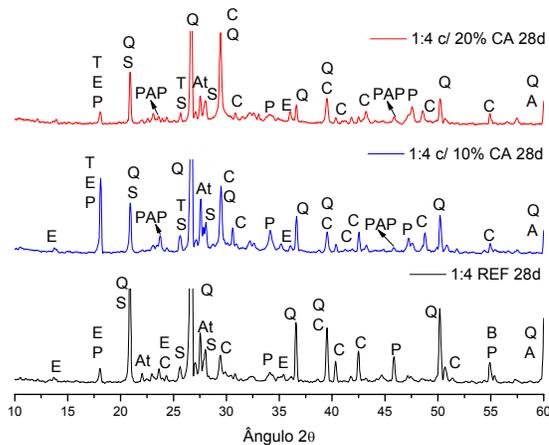


Figura 4.63 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.

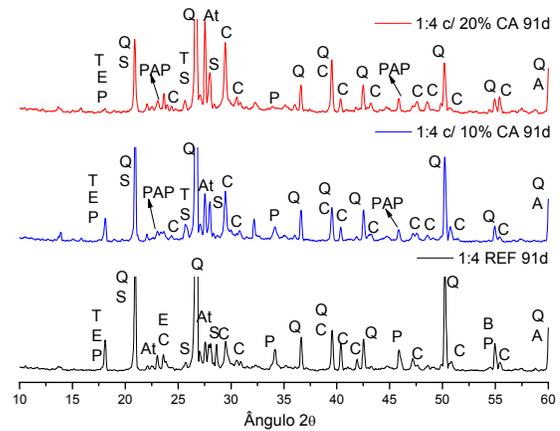


Figura 4.64 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 91 dias.

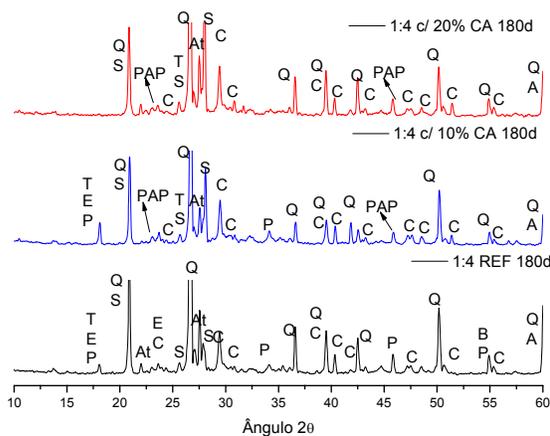


Figura 4.65 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 180 dias.

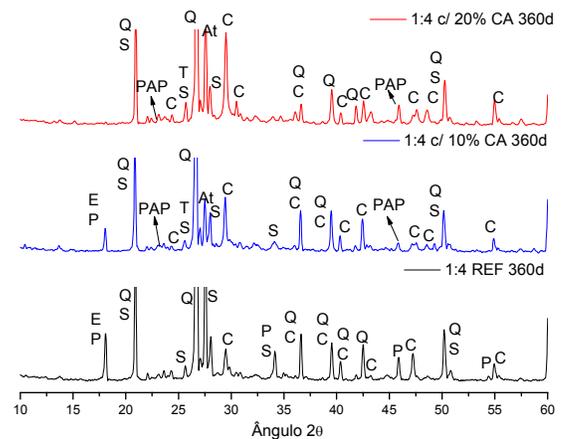


Figura 4.66 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.

LEGENDA:

E – etringita  
 P – portlandita –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
 Q – quartzo ( $\text{SiO}_2$ )  
 S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H)  
 T – Tobermonita

At – aluminato tricálcico –  $\text{C}_3\text{A}$   
 A – alita ( $\text{C}_3\text{S}$ )  
 B – belita ( $\text{C}_2\text{S}$ )  
 C – calcita ( $\text{CaCO}_3$ )  
 PAP – fosfato de potássio e amônia

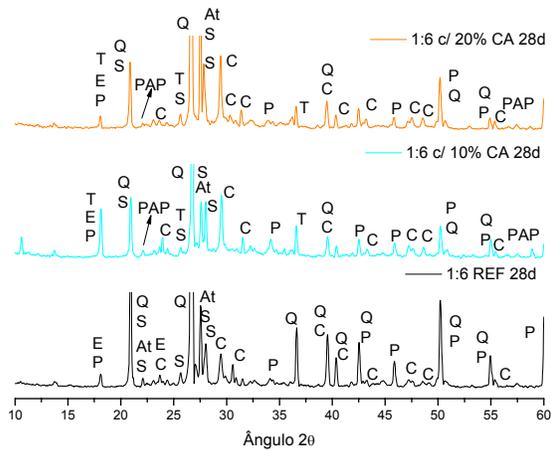


Figura 4.67 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 28 dias.

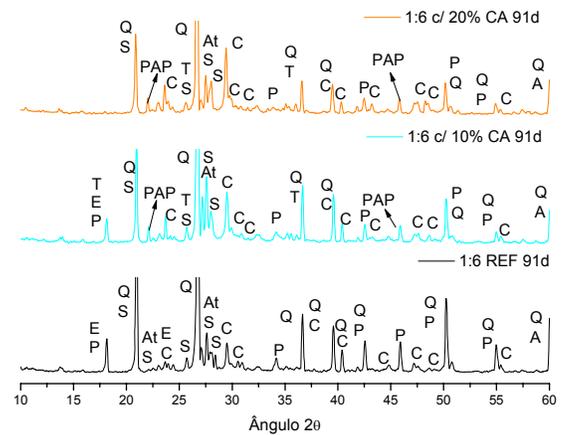


Figura 4.68 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 91 dias.

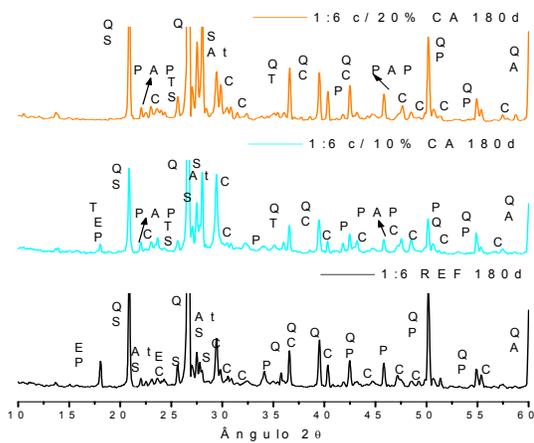


Figura 4.69 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 180 dias.

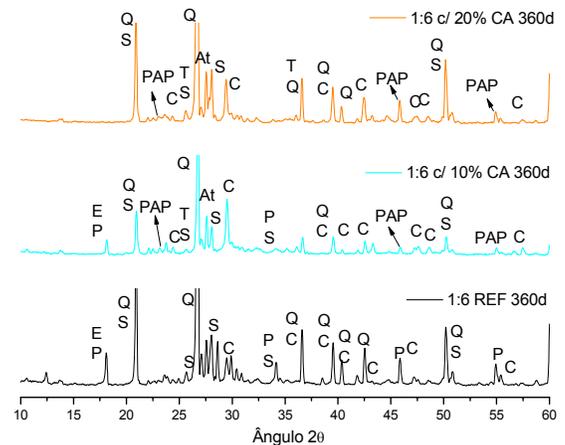


Figura 4.70 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:6, 360 dias.

LEGENDA:

E – etringita  
 P – portlandita –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
 Q – quartzo ( $\text{SiO}_2$ )  
 S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H)  
 T – Tobermonita

At – aluminato tricálcico –  $\text{C}_3\text{A}$   
 A – alita ( $\text{C}_3\text{S}$ )  
 B – belita ( $\text{C}_2\text{S}$ )  
 C – calcita ( $\text{CaCO}_3$ )  
 PAP – fosfato de potássio e amônia

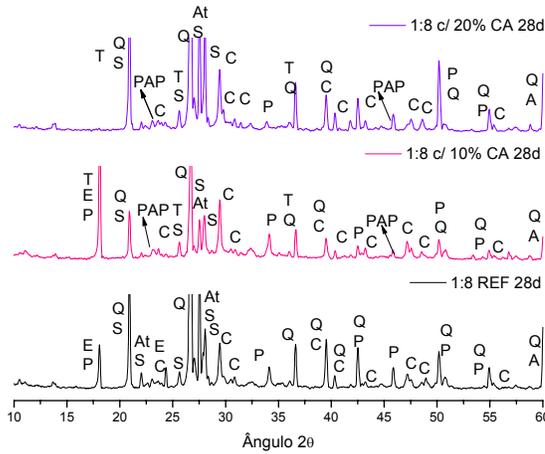


Figura 4.71 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 28 dias.

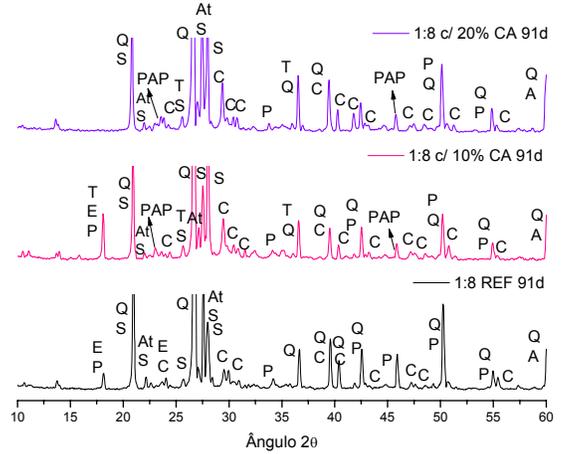


Figura 4.72 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 91 dias.

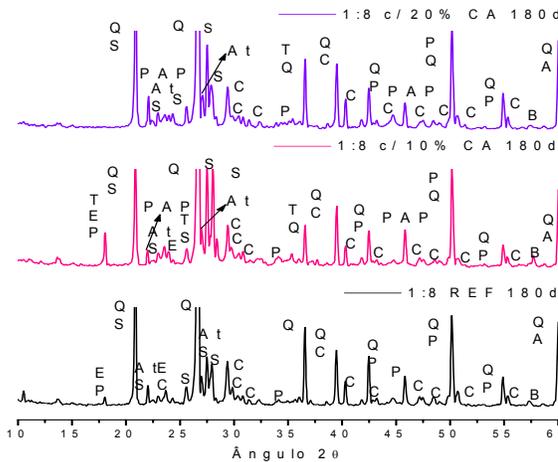


Figura 4.73 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 180 dias.

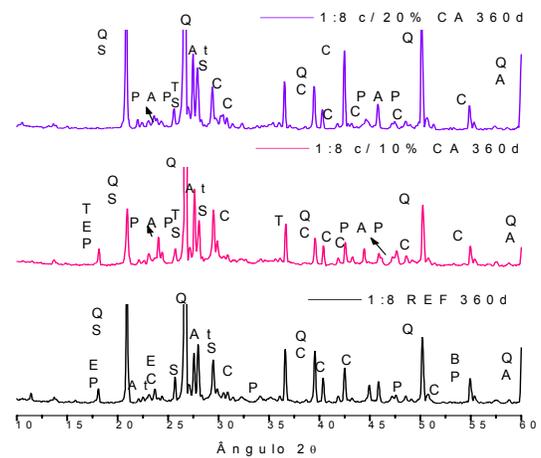


Figura 4.74 – DRX dos corpos-de-prova de argamassas convencionais e incorporadas com CA, traço 1:8, 360 dias.

LEGENDA:

- E – etringita
- P – portlandita – Ca(OH)<sub>2</sub>
- Q – quartzo (SiO<sub>2</sub>)
- S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
- T – Tobermonita

- At – aluminato tricálcico – C<sub>3</sub>A
- A – alita (C<sub>2</sub>S)
- B – belita (C<sub>2</sub>S)
- C – calcita (CaCO<sub>3</sub>)
- PAP – fosfato de potássio e amônia

#### 4.5.2.2 *Análise termo diferencial (DTA) – traços 1:4; 1:6 e 1:8*

Estudos complementares de análise termo-diferencial (DTA) foram realizados para verificar as fases em que ocorriam as transformações endotérmicas e exotérmicas nos corpos-de-prova das argamassas convencionais e com percentuais de casca de arroz, curadas por períodos de 28, 91, 180 e 360 dias, conforme mostram as Figuras de 4.75 a 4.86, para os traços 1:4; 1:6 e 1:8 com e sem incorporação da casca de arroz.

Analisando as curvas da análise térmica diferencial, para os traços 1:4, 1:6 e 1:8, observou-se que todos os corpos-de-prova das argamassas com e sem incorporação do resíduo casca de arroz, apresentaram picos endotérmicos na temperatura de 120°C, referente à presença de água livre, água adsorvida e/ou água coordenada aos cátions, em todos os períodos de cura.

Nos corpos-de-prova das argamassas incorporadas com percentuais de casca de arroz em substituição ao agregado miúdo, verificou-se, entre as temperaturas de 215°C e 450°C, a presença de bandas exotérmicas, referentes à presença de matéria orgânica. Observou-se ainda pico endotérmico na temperatura de 525°C referente à decomposição do hidróxido de cálcio. Em 570°C, pico endotérmico referente à inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$  e outro em 820°C, relacionado, provavelmente, à presença do carbonato de cálcio, confirmando mostrou a análise por difração de raios X.

Em algumas composições não se observou a presença do pico endotérmico referente à presença do dióxido de silício, provavelmente, a banda exotérmica referente à matéria orgânica mascarou o pico endotérmico.

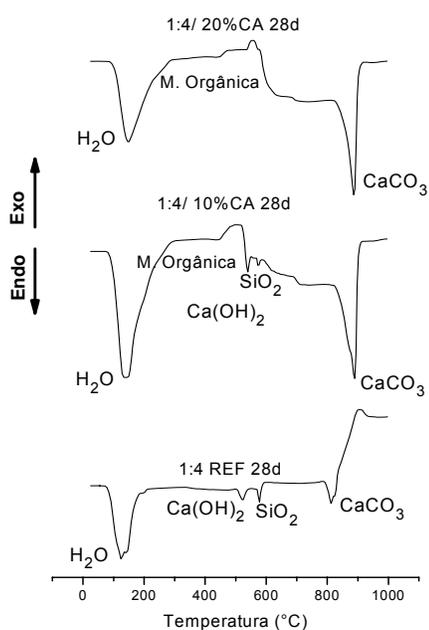


Figura 4.75 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 28 dias.

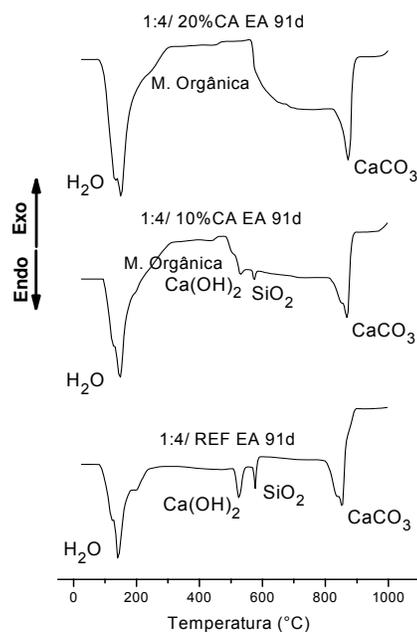


Figura 4.76 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 91 dias.

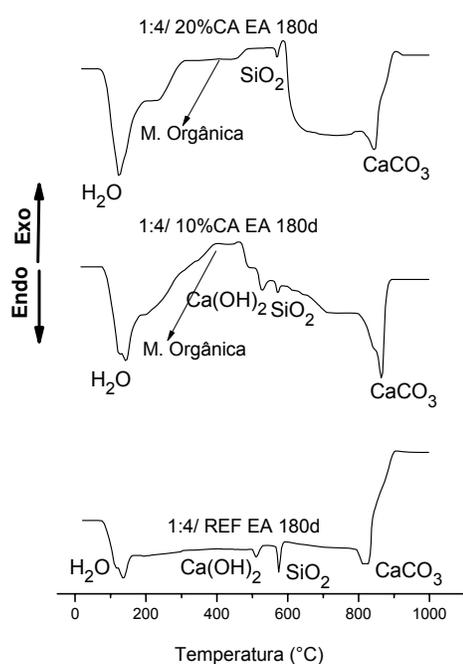


Figura 4.77 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 180 dias.

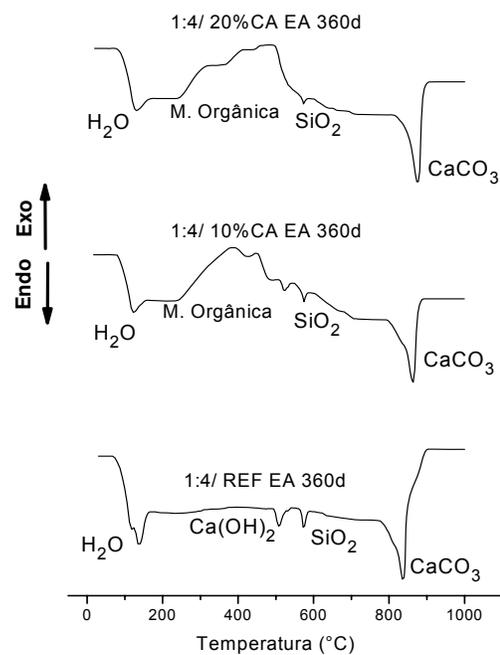


Figura 4.78 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:4, 360 dias.

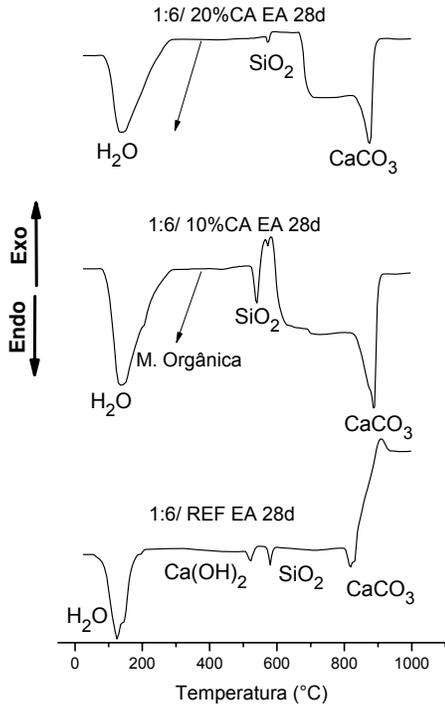


Figura 4.79 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 28 dias.

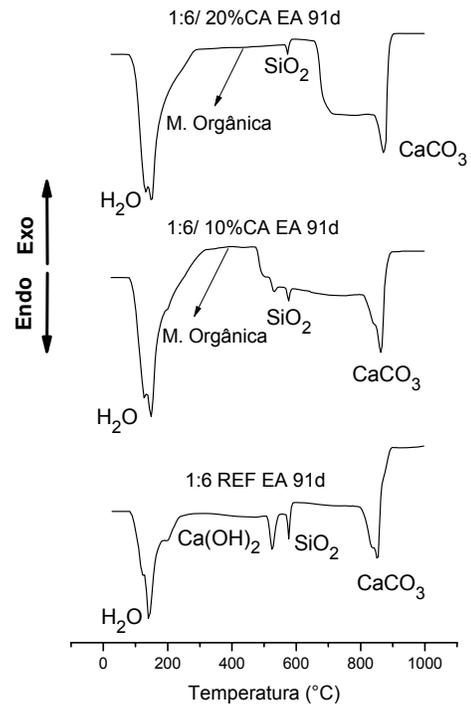


Figura 4.80 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 91 dias.

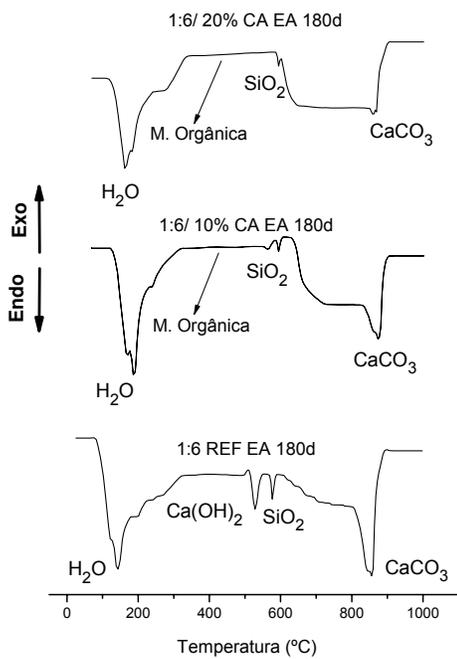


Figura 4.81 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 180 dias.

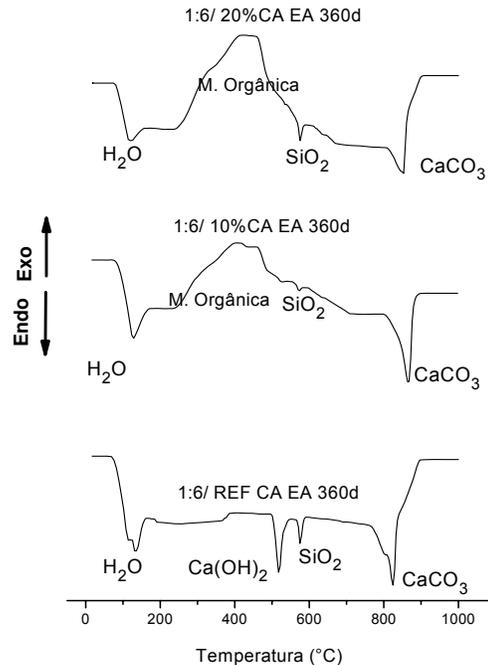


Figura 4.82 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:6, 360 dias.

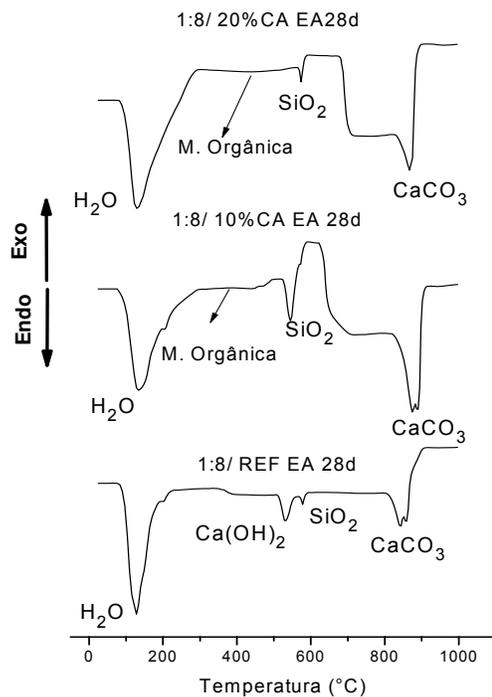


Figura 4.83 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 28 dias.

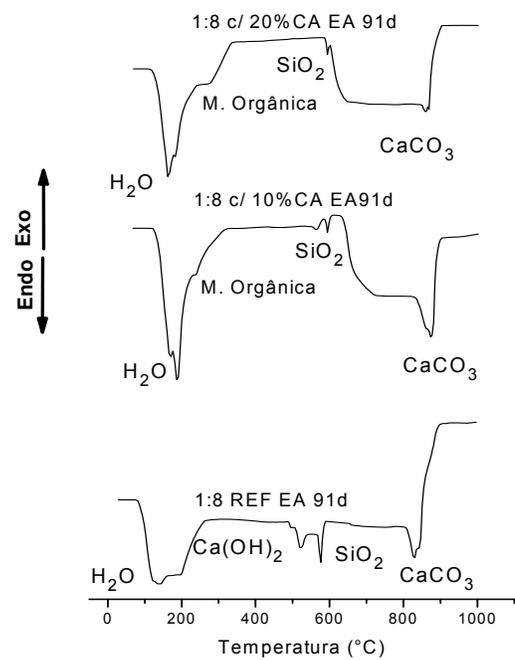


Figura 4.84 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 91 dias.

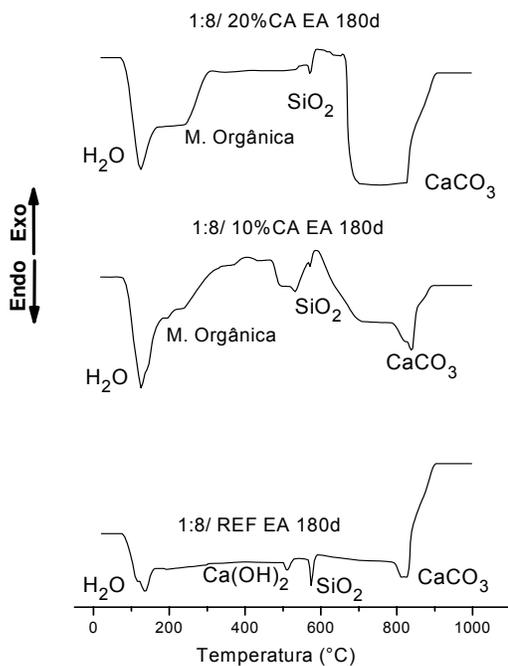


Figura 4.85 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 180 dias.

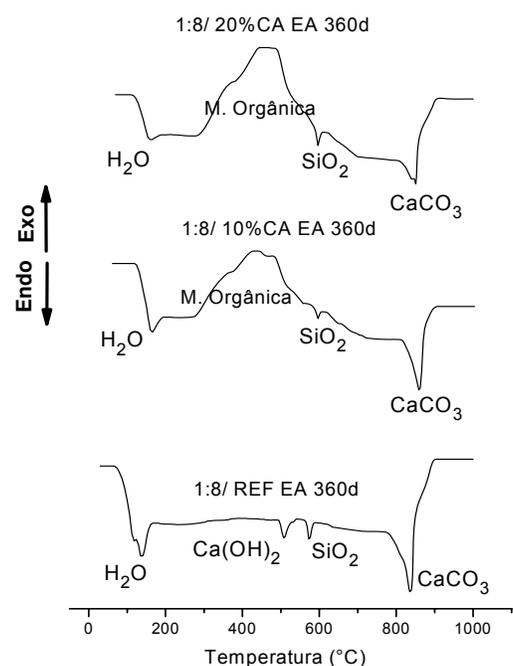


Figura 4.86 – Curvas DTA dos corpos de prova de argamassas convencionais e incorporados com CA, traço 1:8, 360 dias.

#### 4.5.2.3 Absorção de água – traços 1:4; 1:6 e 1:8

Nesta etapa avaliou-se a absorção de água para os corpos-de-prova das argamassas nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, convencionais e alternativas, com seus respectivos percentuais de incorporação, ou seja: 10%, e 20% de CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, após 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem, conforme Figuras 4.87 e 4.88.

Na Figura 4.87 estão apresentados os valores de absorção para os corpos-de-prova das argamassas convencionais curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8.

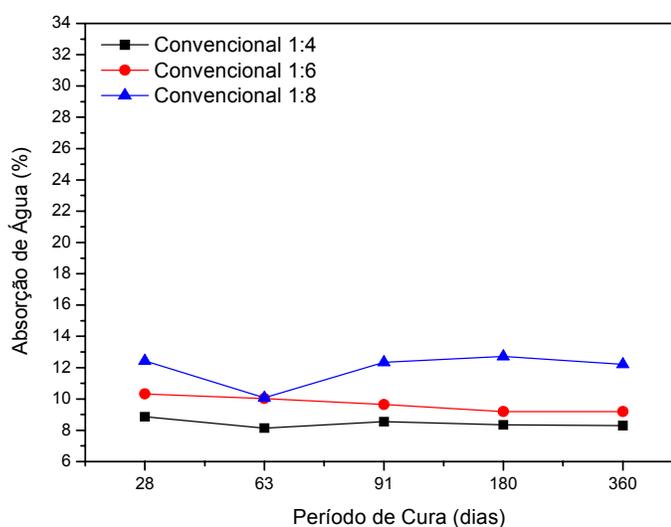


Figura 4.87 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas convencionais, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Analisando os corpos-de-prova dos traços sem incorporação de resíduos verificou-se que os valores de absorção de água dos traços 1:4, 1:6 e 1:8, variaram entre 8,00% e 13,00%, diminuindo com o período de cura, apresentando maiores resultados para os corpos-de-prova onde a proporção aglomerante/agregado era maior (traço 1:8), o que pode ser justificado pela quantidade do agregado miúdo. Comparando os resultados entre os períodos de cura aos 28 e 360 dias, verificou-se uma redução no índice de absorção em: 6,32%; 10,85% e 1,77%.

Na Figura 4.88 estão apresentados os valores de absorção para os corpos-de-prova das argamassas alternativas, incorporadas com percentuais de 10% e 20% de CA, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8.

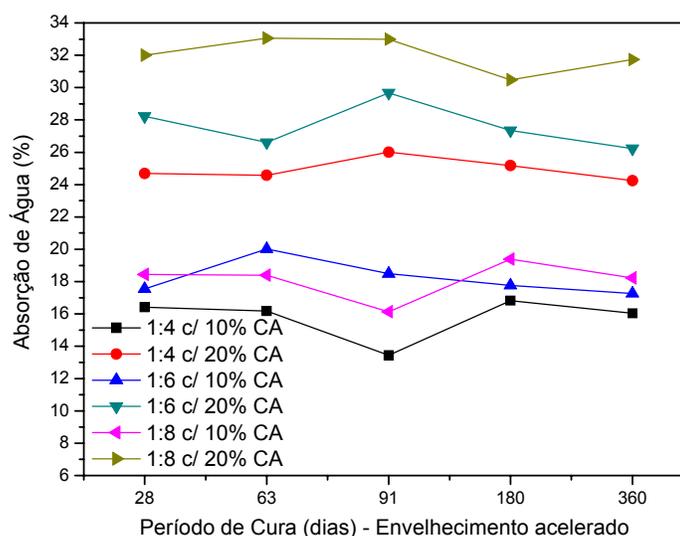


Figura 4.88 – Absorção de água dos corpos-de-prova das argamassas alternativas incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Analisando as curvas para o índice de absorção, observou-se que as argamassas com casca de arroz apresentaram teores de absorção bem elevados, quando comparados aos corpos-de-prova das argamassas convencionais, principalmente com o aumento do percentual de substituição do agregado miúdo pelo resíduo, provavelmente devido o alto índice de absorção da casca de arroz, que é em torno de 114%.

Para os 28 dias de cura, as argamassas com 10% de CA em sua composição apresentaram percentuais de absorção de: 16,41% (1:4); 17,54 (1:6) e 18,44 (1:8) não decrescendo com o tempo de cura, provavelmente o processo de envelhecimento através dos ciclos de molhagem e secagem ocasionou um maior número de vazios nestas argamassas, elevando o teor de absorção para valores de: 16,83%; 17,76 e 19,38%, aos 180 dias de cura, sendo o maior percentual de acréscimo para o traço 1:8.

Aos 360 dias de cura, após 50 ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova incorporados com CA apresentaram valores de absorção de água de 16,04%, 24,25%, 17,26%, 26,23%, 18,22% e 31,74%, para os traços 1:4, 1:6 e 1:8 com 10% e 20% de CA, respectivamente, e comparando estes resultados aos valores para o período de cura de 28 dias, observou-se uma redução no percentual de absorção de 2,25%; 1,74%, 1,60%; 7,08%; 1,20% e 0,81%, sendo os menores valores para os traços com 10% de incorporação do resíduo CA, comportamento semelhante foi verificado por Mesa Valenciano (2004) e Beraldo (2001).

#### 4.5.2.4 Ensaio da densidade aparente (D<sub>Ap</sub>) – traços 1:4; 1:6 e 1:8

Na Tabela 4.15 estão apresentados os valores para a densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas com incorporação do resíduo casca de arroz, curados por períodos de 28 e 360 dias, após 10 ciclos e 50 ciclos de molhagem e secagem, respectivamente.

Tabela 4.15 – Densidade aparente dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28 e 360 dias.

Traços	% CA	Envelhecimento Acelerado (E.A.)			
		D <sub>Ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) 28 dias	RCS (MPa)	D <sub>Ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) 360 dias	RCS (MPa)
1:4	10%	2,206	4,21	2,216	5,05
	20%	1,970	3,09	2,014	4,21
1:6	10%	2,070	3,35	2,094	4,21
	20%	1,740	2,50	2,010	2,11
1:8	10%	2,019	3,37	2,055	3,93
	20%	1,968	1,68	2,002	1,68

Analisando os valores apresentados para a densidade aparente dos corpos-de-prova incorporados com casca de arroz, verificou-se que quanto maior o percentual de incorporação da casca de arroz em substituição ao agregado miúdo, menor a densidade, isto ocorreu devido à leveza da casca de arroz em relação ao agregado miúdo, que apresentou valor de densidade de 0,12g/cm<sup>3</sup> enquanto para o agregado miúdo a densidade encontrada foi de 1,49g/cm<sup>3</sup>. Aos 28 dias de cura, após 10 ciclos de molhagem e secagem, os maiores valores de densidade aparente foram para os traços com 10% de incorporação da casca de arroz, sendo, respectivamente: 2,206 g/cm<sup>3</sup>; 2,070 g/cm<sup>3</sup> e 2,019 g/cm<sup>3</sup>, os quais também apresentaram melhor desempenho mecânico. Comparando estes resultados com os resultados apresentados para as argamassas na cura em meio úmido, observa-se que, após 10 ciclos de molhagem e secagem, praticamente não houve alteração nos valores.

Estes valores são valores médios determinados com cinco repetições. É de se notar que os compósitos com incorporação da casca de arroz apresentaram valores de massa específica aparente, obviamente, inferiores aos dos corpos-de-prova de argamassa convencional, uma vez que houve a substituição de um material mais pesado por outro mais leve, consequentemente, quanto maior o percentual de substituição, menor o peso do conjunto.

#### 4.5.2.5 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS), traços 1:4; 1:6 e 1:8.

Na Figura 4.89 estão apresentados os resultados para a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova nos traços 1:4, 1:6 e 1:8, argamassas convencionais e alternativas, com incorporação de 10% e 20% do resíduo de casca de arroz, em substituições ao agregado miúdo, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, após 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

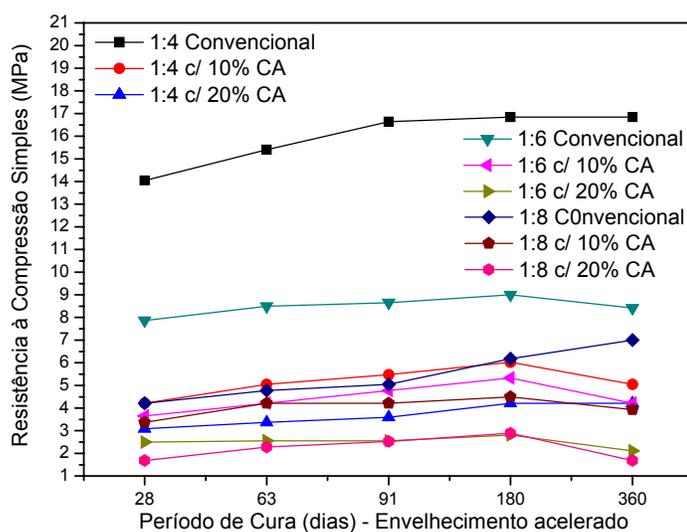


Figura 4.89 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas convencionais e incorporadas com CA, envelhecimento acelerado, curados por períodos de 28, 63, 91, 180 e 360 dias, traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Analisando a Figura 4.89 onde estão apresentados os resultados para a resistência à compressão simples das argamassas convencionais, nos traços 1:4, 1:6 e 1:8 e com percentuais de substituições do agregado miúdo por casca de arroz em 10% e 20%, observou-se que as argamassas incorporadas com casca de arroz tiveram seus valores de resistência à compressão simples aumentando entre os períodos de cura de 28 e 180 dias, mesmo após exposição a vários ciclos de molhagem e secagem, isto se deve, provavelmente, ao fato de que o hidróxido de cálcio já tenha sido consumido na reação, conforme pode ser verificado na difração de raios X e análise térmica diferencial, logo a lignina presente na estrutura da casca de arroz dificultou o ataque à argamassa, fazendo com que não ocorressem prejuízos a durabilidade do composto.

Avaliando os corpos-de-prova das argamassas, em função do percentual de casca de arroz incorporado, verificou-se que os corpos-de-prova com 10% de incorporação obtiveram melhor

comportamento mecânico, em todas as idades de cura. Para 28 dias de cura, a resistência à compressão simples foi cerca de 26,60%, 31,50% e 50,00% superior às argamassas com 20% de CA, com valores de: 4,21MPa, 3,65MPa e 3,37MPa, para os traços 1:4, 1:6 e 1:8, respectivamente, aumentando, aos 180 dias de cura, para: 6,02MPa, 5,33MPa e 4,49MPa. Beraldo (2001), estudando tijolos de solo-cimento-resíduo (casca de arroz), também verificou que a incorporação deste material melhorou o comportamento mecânico dos tijolos estudados com 10% de incorporação, obtendo valor máximo aos 180 dias de cura de 4,96MPa.

De acordo com a NBR 13279 (2001), a argamassa no traço 1:4, com 10% de CA classificou-se como padrão II, pois apresentou  $4,0 \text{ MPa} \leq \text{RCS} < 8,0 \text{ MPa}$ , aos 28 dias de cura. As argamassas nos traços, 1:4 com 20% de CA, 1:6 e 1:8 com 10% e 20% de CA classificaram-se como padrão I, devido apresentar RCS variando entre 0,1MPa e 4,0MPa, aos 28 dias de cura.

Os estudos dos corpos-de-prova das argamassas alternativas com percentuais de casca de arroz evidenciaram que este resíduo pode ser utilizado em argamassas para uso na construção civil, nos percentuais de 10% de incorporação. Apesar das argamassas com 20% de incorporação do resíduo ter sido classificada dentro dos padrões prescritos pelas normas da ABNT, não se recomenda o uso deste percentual devido o alto índice de absorção apresentado pelos compósitos, podendo ser prejudicial ao sistema, como um todo, no decorrer do tempo.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÕES

Após os estudos da durabilidade das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduos de cinza e casca de arroz, pode-se chegar às seguintes conclusões:

#### **Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas**

- a) a cinza da casca apresentou distribuição de tamanho de partículas e área específica adequada para uso como aglomerante;
- b) a casca de arroz apresentou elevada absorção de água;
- c) a cinza de casca de arroz apresentou fase mineralógica amorfa;
- d) a cinza de casca de arroz apresentou propriedades pozolânicas de acordo com as normas da ABNT.

#### **Propriedades físico-mecânicas**

- a) as argamassas alternativas e convencionas foram classificadas de acordo com a norma da ABNT como padrão II e III.
- b) Os traços convencionais e incorporados com CCA apresentaram comportamento mecânico após 28 dias de cura dentro das especificações das normas da ABNT.
- c) os valores de absorção de água dos traços das argamassas convencionais e alternativas com incorporação de CCA, aos 28 dias de cura, estão de acordo com as especificações técnicas das normas da ABNT.
- d) os resultados da absorção de água dos traços com incorporação de 20% de casca de arroz, aos 28 dias de cura, não alcançaram valores dentro das especificações técnicas das normas da ABNT.
- e) todos os traços com incorporação de CCA após 180 dias de cura obtiveram melhor desempenho mecânico que o traço convencional.

f) as argamassas no traço 1:4 incorporadas com 10% de CA foram classificadas como sendo padrão II de acordo com as normas da ABNT. Os traços 1:4 com 20% de CA, 1:6 e 1:8 com 10% e 20% de CA foram classificados como padrão I.

g) a incorporação do resíduo de casca de arroz em uma matriz de cimento reduz o valor de sua massa específica aparente.

h) devido ao elevado valor de absorção de casca de arroz, a incorporação superior a 20% comprometeu o comportamento mecânico das argamassas.

### **Envelhecimento acelerado:**

a) foram observadas após envelhecimento acelerado com as argamassas incorporadas com CCA, as seguintes fases mineralógicas: quartzo, portlandita, C-S-H, calcita e traços de etringita, alita e belita, destacando-se aos 28 dias a presença de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

b) o processo de envelhecimento das argamassas alternativas incorporadas com CCA, com relação ao comportamento mecânico, se deu após 180 dias de cura.

c) verificou-se que o envelhecimento favorece a reação pozolânica com as argamassas convencionais e alternativas incorporadas com CCA quando submetidas ao processo de envelhecimento acelerado.

d) a carbonatação das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com CCA, contribui diretamente para a alteração no comportamento mecânico das argamassas.

e) o resultado do comportamento mecânico das argamassas convencionais e alternativas após o processo de envelhecimento enquadrou-se dentro das especificações das normas da ABNT.

f) O processo de envelhecimento acelerado até 180 dias de cura, não afetou a durabilidade dos compósitos com casca de arroz, devido à presença da lignina na estrutura da casca.

### **Conclusão final**

Constatou-se nos resultados obtidos a importância do estudo do envelhecimento das argamassas com resíduos da cinza e casca de arroz. Ficou evidenciado a importância do conhecimento do comportamento físico, mineralógico e mecânico dos traços alternativos, como

---

fundamento tecnológico, para a formação de banco de dados técnico quanto à forma de uso, condições, quantidade e qualidade dos materiais produzidos com reciclagem dos resíduos, além da contribuição à conservação das reservas naturais e preservação do meio ambiente.

Os trabalhos desenvolvidos evidenciaram um processo de envelhecimento, principalmente, nos corpos-de-prova de argamassas incorporados com cinza de casca de arroz quando submetido ao processo de envelhecimento acelerado, enquanto que os corpos-de-prova incorporados com casca de arroz apresentaram uma melhor resistência ao processo de envelhecimento através dos ciclos de secagem e molhagem.

Esta discrepância deve-se aos mecanismos de reação ocorridos nos dois casos, em que o envelhecimento acelerado com os corpos-de-prova incorporados com cinza de casca de arroz favoreceu as reações pozolânicas, enquanto que no caso dos corpos-de-prova incorporados com casca de arroz a durabilidade não foi afetada, isto se justifica, devido á presença da lignina na estrutura da casca e falta da reação pozolânica ocorrida no compósito.

---

## CAPÍTULO 6

### 6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- a) avaliar a durabilidade dos corpos-de-prova incorporados com cinza e casca de arroz através de câmara climatizada em diversas condições de temperaturas e umidade relativa;
- b) analisar o efeito da penetração da carbonatação na durabilidade das argamassas alternativas incorporadas com cinza e casca de arroz;
- c) verificar a durabilidade da cinza da casca de arroz após queima nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C;
- d) avaliar a durabilidade de protótipo com as argamassas incorporadas com cinza e casca de arroz;
- f) avaliar a durabilidade das argamassas incorporadas com resíduos de cinza e casca de arroz através dos processos de carbonatação e reação álcali-sílica.

## REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

\_\_\_\_\_. Determinação do índice de atividade pozolânica com cal. **NBR 5751**. 1992.

\_\_\_\_\_. Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento. **NBR 5752**. 1992.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. **NBR 6474**. 1998.

\_\_\_\_\_. Calibração de desempenho – dinamômetro, calibração de cilindro padrão. **NBR 6674**. 2002.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão simples. **NBR 7215**. 1996.

\_\_\_\_\_. Agregados. Determinação da composição granulométrica. **NBR 7217**. 1987.

\_\_\_\_\_. Agregados. Determinação do teor de materiais pulverulentos dos agregados.. **NBR 7219**. 1982.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da área específica. **NBR 7224**. 1984.

\_\_\_\_\_. Agregados no estado solto. Determinação da massa unitária. **NBR 7251**. 1982.

\_\_\_\_\_. Agregados. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. **NBR 9776**. 1987.

\_\_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. **NBR 9778**. 1994.

\_\_\_\_\_. Resíduos Sólidos. **NBR 10004**. 2004.

\_\_\_\_\_. Lixiviação de resíduos. **NBR 10005**. 2004.

\_\_\_\_\_. Solubilização de Resíduos. **NBR 10006**. 2004.

\_\_\_\_\_. Amostragem de Resíduos. **NBR 10007**. 2004.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland. Especificação. **NBR 11578**. 1991.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland Comum. **NBR 11579**. 1991.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland. Determinação do tempo de pega. **NBR NM 65**. 2003.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da finura pelo método da permeabilidade ao ar (Método Blaine). **NBR NM 76**. 1998.

\_\_\_\_\_. Materiais Pozolânicos. Definições. **NBR 12652**. 1992.

\_\_\_\_\_. Materiais Pozolânicos. Exigências químicas e físicas. **NBR 12653**. 1997.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à compressão simples - Método de Ensaio. **NBR 13279**. 2005.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade massa aparente no estado endurecido - Método de Ensaio. **NBR 13280**. 2005.

ABRABI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE BIOTECNOLOGIA. Disponível em <http://www.abrabi.org.br>. Acesso em agosto de 2007.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR., H. **Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira**. In: Seminário Iberoamericano de Materiales Fibrorreforzados 1, y Reunión Proyecto PIP VIII.5 Cytel, 3. Universidade Del Valle, Cali, 1997.

ALMEIDA, I. R. **Superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos**. Técnica, p. 30-33. São Paulo/SP, 1996.

AKERS, S. A. S.; STUNDINKA, J. B. **Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 11, n. 2, 93 – 97p, May, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. **ASTM D 1037**. Annual Book of ASTM Standards. Section 4. Volume 04.09 Wood. 1990.

ARAÚJO, S. M. **Introdução a ciências do ambiente. Notas de aula**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande/PB, 1995.

ASTM - American Society for Testing and Materials Standards from ANSI – C 618 (1978).

BARTHA, P., HUPPERTZ, E. A. – **Structure and crystallization of silica and rice husk, Product Utilization**, v. 1, 60-65p, 1974.

BARRINGER, W. L. **Before using fly ash**. Concrete International. V. 19, nº 4. Michigan, 1997.

BAUER, R. J. F. **Falhas em revestimentos**. Anais do Encontro: Argamassas Industrializadas – Uso e Desempenho. São Paulo/SP, 1993.

BERALDO A.L., TOJAL J.H.V. **Utilização de argamassa de cimento e casca de arroz em moradias populares**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. Cascavel: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001.

BEZERRA, A. J. V. **Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA – Etileno Acetato de Vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural**. Dissertação de Mestrado. 115f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2002.

BRAGA FILHO, A. C. **Bambu: generalidades e seu emprego como reforço em vigas de concreto**. Dissertação de Mestrado. 144f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2004.

BUI, D. D., HU, J., STROEVEN, P. **Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete**. Cement e Concrete Composites, v. 27, n. 3, 357-366p. 2005.

CALLEJA, C. J. **Las Puzolanas**. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Espanha, 1958.

CAVALCANTE, J. R. e CHERIAF, F. M. **Ensaio de avaliação para controle ambiental de materiais com resíduos incorporados**. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos com Materiais de Construção Civil. Anais, 31-37p. São Paulo, WORKSHOP, 1996.

CHANDRASEKHAR, S., SATYANARAYANA, K. G., PRAMADA, P. N., RAGHAVAN, P., **Processing, properties and applications of reactive sílica from rice husk – an overview**. Journal of Materials Science, v. 38, 3159- 3168p. 2003.

CHERIAF, M.; CAVALCANTE R. J.; PERA, J. **Caracterização dos resíduos industriais do Estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil**. In: 1º Encontro sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Anais, 81-86p. Canela, 1997.

CHIAVERINI, V. **Desenvolvimento Sustentado. Metalurgia e Materiais**. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. V 50. nº 435. 1066p. São Paulo/SP. Novembro, 1994.

CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. **Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica, tecnologia de edificações**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Divisão de Edificações do IPT, Editora PINI. São Paulo/SP, 1998.

COLISEU. Foto registrada em fevereiro de 2007. Disponível em <http://www.voltaomundo.net>. Acesso em 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Série histórica de produção – Safras 1997/98 a 2007/08. Avaliação da Safra Agrícola**. <http://www.arroz.agr.br/site/estatisticas/html/tabela3.htm>. Acesso em novembro de 2008.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resoluções CONAMA: 1984/1986**. Brasília, SEMA, 1986.

CORDEIRO, G. C. – **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Mineraiis em Concreto**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

COSTA FILHO, T. B. **Avaliação do desempenho de argamassas com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina em relação à corrosão de armaduras em ambiente contaminado com íons cloreto**. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal/DF, 2005.

DAFICO, D. A. **Estudo do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Tese de Doutorado. 191f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, USP. São Paulo/SP, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C.; POUHEY, M. T.; PAGNUSSAT, D. **Estudo da pozolanidade de cinzas de casca de arroz com diferentes características, submetidas à micronização**. In: XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004, Mendoza. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004.

DELLA, V. P. **Processamento e caracterização de sílica ativa obtida a partir de cinzas de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2001.

DELLA, V. P.; KUNH, I.; HOTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Química Nova, vol. 24, nº 6, 778-782p, 2005a.

DELLA, V. P.; KUNH, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de resíduos agro-industriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica**. Cerâmica Industrial, vol. 10, nº 6, 22-25p. 2005b. Disponível em [http:// www.ceramicaindustrial.org.br](http://www.ceramicaindustrial.org.br). Acesso em setembro de 2008.

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J. A.; OLIVEIRA, A. P. N. - **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz**. Química Nova, vol. 29, nº 6. São Paulo/SP. 2006.

DIAMOND, S. **Sobre as bases científicas do uso da microssílica no concreto**. Trabalho apresentado no Seminário Tecnológico da Ekem/Microssílica. 10p. São Paulo, 1984.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW, N. Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete. Cement and concrete research, vol. 34, n. 9. 2004.

ENBRI. **Development of a framework for environmental assessment of building materials and components**. (ENBRI Proposal to European Community BRITE EURAM Program). Mimeo. 18 mar. 1994.

FAGUERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. **Recomendações para uso de fertilizante fosfato para a cultura de arroz de sequeiro**. Circular Técnica, nº 03, 15p. EMBRAPA – CNPAF, Goiânia, 1980.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**. Tese de doutorado. 121f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2007.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations: online. Reportagem disponível em: [http://www.onu-brasil.org.br/view\\_news.php?id=6633](http://www.onu-brasil.org.br/view_news.php?id=6633) Acesso em novembro de 2008.

FELLENBERG, H. G. **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. 2ª Edição, 193p. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 1980.

FENG, Q.; LIN, Q. Y.; YU, Q. J.; ZHAO, S. Y.; YANG, L. F.; SHUICHI, S. **Efficiency of highly active rice husk ash on the high-strength concrete**. In: International Congresso n the Chemistry of Cement, 11., 2003. Durban- South Africa. Proceedings. Durban: The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003. 816-822p. 1 CD-ROM.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloretos**. Dissertação de Mestrado. 225f. Universidade Federal de Goiás/GO, 2003.

FILEV, R. **Escória de alto forno**. Graduando da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP/PCC). Bolsista FAPESP. 2006. Disponível em: [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria\\_de\\_aciaria.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm). Acesso em 21/03/2006.

FLAUZINO, V. D. **Durabilidade de materiais e componentes das edificações – metodologias e suas aplicações no caso de pinturas externas e chapas onduladas de plástico**. Dissertação de Mestrado. EPUSP. São Paulo/SP, 1998.

FREIRE, W. J. **Materiais Alternativos de Construção**. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. Departamento de Construções Rurais. Disciplina AP 305 Materiais Alternativos de Construção. São Paulo/SP, 1999.

FREIRE, J.W.; BERALDO, L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. 1ª Edição. FAPESP, 354p, São Paulo, 2005.

GADELHA, J. E. V.; BARRETO, A. B. **Arroz (BR – URGÁ – 409) para os perímetros irrigados**. Ministério do Interior. DNOCS, 33p. Fortaleza/CE, 1982.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação de Mestrado. 180f. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2003.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. In: Swamy, R. N., Ed. Natural fibre reinforced cement and concrete. Pg 143 – 172. Galsgow, Blackie, 1988.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação de Mestrado. 147f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 1989.

HABITARE. **Utilização de resíduos na construção civil**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção civil. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4. Porto Alegre/RS, 2002.

HANAFI, S., ABO-EL-ENEIN, S. A., IBRAHIM, D. M., EL-HEMALY, S. A. **Surface properties of silicas produced by thermal treatment of rice-husk ash**. Thermochemica Acta, v. 37, n. 2, 137-143p, 1980.

HWANG, C. L., CHANDRA, S. **The use of rice husk ash in concrete**. In: Chandra, S. (ed), Waste materials used in concrete manufacturing, New Delhi: Standard Publishers Distributors, 184-234p, 2002.

HECKLER, J. C. **Informações técnicas para o cultivo do arroz irrigado em Mato Grosso do Sul**, por João Carlos Heckler. Circular Técnica n° 12, 30p. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dourados/MT, 1986.

HELENE, P.; GRIGOLI, A. S. **Comportamento das adições minerais inertes em poros e zona de transição em concretos**. Disp. em: <http://www.scobinengenharia.com.br/arquivos/art05.pdf>, acesso em outubro de 2008.

HOUSTON, D. F. **Rice hulls, rice chemistry and technology**. American Association of Several Chemistry, Minnesota, 301-352p, 1972. Huston, 1972.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em janeiro de 2006.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de levado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese de Doutorado. 298f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 1995.

JONH, V. M. **Durabilidade de materiais: componentes de edifícios**. Dissertação de Mestrado. CPGE/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 1987.

JOHN, V. M. **Apresentação do sistema de painéis IPT/ DRC**. Agrupamento de materiais de construção civil. Divisão da Engenharia Civil. 4p. 1994 .

JONH, V. M. **Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos**. In: Workshop Sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos com Material de Construção Civil. Anais. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 21-30p. São Paulo/SP, 1996.

JONH, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. **Durabilidade de compósitos de cimento e fibras vegetais**. III Seminário Internacional de Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. PCC/USP, São Paulo/SP, 1997.

JONH, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. Tese de Livre Docência. 102f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2000.

JONH, V. M.; ÂNGELO, S. C. **Metodologia para reciclagem de resíduos vegetais**. Coletânea Habitar: Utilização de resíduos na construção habitacional. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4. Porto Alegre/RS, 2002.

KATZ, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**. Cement and Concrete Research, 33. 703-711p. 2003.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration**. Cement and Concrete Research, v. 33, n° 12, 1939-1947p. 2003.

LEAL, A. F.; **Utilização de resíduos das indústrias de cerâmicas e de calçados na elaboração de materiais e produtos à base de cimento Portland reforçados com fibras de sisal.** Tese de Doutorado. 128f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2004.

LEE, S. L.; TAM, W. J. NG, TING, S. K. e LOO, Y. H. **Durability Test on Precast Concrete Wall Panels with Exposed Aggregate Finishes.** Durability of Building Materials and Components. Proceeding of the Fifth International Conference held in Brighton, UK, 7-9p. 445-452. 1990.

LEIRIAS, H. S.; SANTOS, A. C.; ARAÚJO, W. M.; CONCIANI, W. **Estabilização do solo saprolítico da Baixada Cuiabana com adição de cinza da casca de arroz.** In: Simpósio de Solos Tropicais e Processos Erosivos, 2. Goiânia/GO, 2002.

LEIRIAS, H. S.; FERREIRA, H. C.; CONCIANI, W. **Estudo da influência da cinza da casca de arroz na massa de argila para produção de blocos cerâmicos de 8 furos.** I Seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social. Anais. Cuiabá/MT, 2005.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria.** Tese de doutorado. 194f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/ SP, 2001.

LIDDLE, B. T. **Construction for Sustainability and the Sustainability of the Construction Industry.** In CIB TG 16 Sustainability Construction. Proceedings. 47-56p. Tampa, Flórida, 1994.

LIMA, J. B. M. **Cais pozolânicas, caracterização e desempenho mecânico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, UFPB/CAMPUS II. Campina Grande/PB, 1993.

LIMA, M. S. **Utilização do resíduo de caulim para uso em blocos de concreto sem função estrutural.** Dissertação de Mestrado. 79f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2005.

LUDWIG, V. S. **A agroindústria processadora de arroz: um estudo das principais características organizacionais e estratégicas das empresas líderes gaúchas.** Dissertação de Mestrado. 137f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2004.

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

MARTINEZ, R.G. **Placas pré-moldadas de argamassa armada e casca de arroz** Dissertação de Mestrado. 89f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2003.

MARTINEZ, R.G.; FERREIRA, H.C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. & NOGUEIRA, J. S. **Placa de argamassa composta com casca de arroz para painéis de fechamento vertical em habitações populares.** I Seminário Mato- Grossense de Habitação de Interesse Social. Anais, 509-524p. Cuiabá/MT, 2005

MASSAZZA, F. **Chimica delle aggiunte pozzolaniche e dei cementi di miscella.** II Cement, 73 (1) 3-38. Roma, Itália, 1974.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: Hewlett, P. C. (ed), Lea's chemistry of cement and concrete, 4<sup>a</sup> ed. 471-631p. New York, 1988.

MATTOS, L. R. S.; DAL MOLIN, D. C. C. **Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA (Brasil): estudo do comportamento no estado fresco**. Engenharia Civil, UM, n° 15. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS. Porto Alegre/RS, 2002.

MEIRA, G. R. **Materiais à base de cimento – estrutura, propriedades e durabilidade. Notas de aula**. Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2006.

MEHTA, P.K., AİTCIN, P.C. **Principles underlying production of High-Performance Concrete**. Cement, Concrete e Aggregates, Philadelphia: ASTM. v. 12, n° 2, 70-78p, 1990.

MEHTA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material**. Advances in Concrete Technology, 407-431p. Ottawa: Canmet, 1992.

MEHTA, P. K. **Point of view durability – critical issues for the future**. Concrete International. American Concrete Institute. Detroit. v. 19, n° 7, 27-33p, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. Editora PINI. São Paulo, 1994.

MENEZES, R. R.; FAGURY-NETO, E.; FERNANDES, M. C.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. **Obtenção de mulita porosa a partir da sílica da casca de arroz e do acetato de alumínio**. Cerâmica 54, 245-252P. 2008.

MESA VALENCIANO, M. C. **Durabilidade de compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos**. Tese de Doutorado. 186f. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas/SP, 2004.

MILANI, A. P. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado. 113f. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas/SP, 2005.

MONTANHEIRO, J. T.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. **Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: difratometria de raios x como método alternative**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 2003.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Tese de Doutorado. 153f. University of California. Berkeley, Califórnia, 2003.

NAIK, T. R.; SINGH, S. S. **Influence of flay ash on setting and hardening characteristics concrete systems**. ACI Materials Journal. vol. 94, n° 5. Michigan, 1997.

NELSON, B. **Students Turn Glass to Concrete for Science Prize**. Office of Public Affairs Columbia University, New York, N.Y., 1996. Disponível em <http://www.columbia.edu/cu/pr/18929a>. Acesso em 2006.

NEVES, G. A. Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima **cerâmica**. Tese de Doutorado. 256f. Universidade Federal da Paraíba, UFPB. Campina Grande/PB, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª edição, revisada e atualizada. Tradução Salvador E. Gammusso. Pini. São Paulo/SP, 1997.

OLIVEIRA, D. F.; CARVALHO, J. B. Q.; MELO, A. B.; FARIAS, C. A. S.; SANTOS, V. S.; BRASILEIRO, F.E. **Aproveitamento de entulho da construção civil como agregado na produção de pré-moldados de concreto: avaliação da durabilidade**. V Encontro de Iniciação Científica – V EPG 2001 I Encontro de Pós Graduação – I EPG. Universidade do Vale do Paraíba, 2001.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil**. Tese de Doutorado. 251f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2004.

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais descartáveis pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro/SP, 2002.

OLIVEIRA FILHO, N. L. **Evolução da resistência com o tempo de concretos convencionais e com sílica ativa confeccionados com materiais locais**. Dissertação de Mestrado. 106f. Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Campina Grande/PB, 1999.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**, 13ª edição, revisado por Paulon, V. A. Editora Globo. São Paulo, 1998.

PINHEIRO, B. S. Disponível em, [www.cnpaf.embrapa.br](http://www.cnpaf.embrapa.br). Acesso em 2007

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Estudos com cinzas de casca de arroz buscam aproveitamento em concretos de alto desempenho**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção civil. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, 2002.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Cinzas da casca de arroz**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção civil. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, 242-246p, Porto Alegre – RS: ANTAC, 2003.

RÊGO, J.H.S. **Caracterização do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil**. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31p, 2004, Mendoza-Argentina. Anais... Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Aproveitamento de resíduos na construção**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção habitacional. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, 73-93p. ANTAC. Porto Alegre/RS, 2003.

RODRIGUEZ DE SENSALÉ, G.; REINA, D. **Influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz residual uruguaya como material cementício suplementario en hormigones de alto desempeño.** In: Jornadas Sul-Americanas de Ingeniería Estructural, 31. 2004, Mendoza-Argentina. Anais, Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. 1 CD-ROM, 2004

ROLIM, A. M. **A reciclagem de resíduos de EVA da indústria calçadista.** Texto técnico. Disponível em <http://www.portalga.ea.ufrgs.br>. Acesso em novembro de 2002.

ROSSIGONOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Durability of polymer – modified lightweight aggregate concrete.** Cement and Concrete Composites, vol. 6, 375-380p, 2004.

LA ROVERE, E. L. **O Brasil e a Convenção do Clima.** Gazeta Mercantil, 19 de Dezembro, 2001;

ROVERE, E. L. La (Coord.). **Estudo de viabilidade de projeto voltado à adoção de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL): A utilização da casca de arroz na co-geração de energia e a decorrente mitigação de gases que contribuem para o efeito estufa como mecanismo de desenvolvimento limpo.** IVIG/LIMA/COPPE/UFRJ, 2003. 24 p. RJ. 2003. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.centroclima.org.br>. Acesso em 2006.

ROVERE, E. L. **Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz.** Revista de Engenharia Agrícola, vol 28, nº2. Jaboticabal. 2003. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo>. Acesso em 2008.

SANTOS, R. A. **Vidro.** Bolsista de iniciação Científica do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (FUSP/USP). Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/vidro.htm>. Acesso em 2006.

SANTOS, S. **Otimização da produção comercial de cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono.** Exame de qualificação - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2003.

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.** Tese de Doutorado. Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2006.

SAVASTANO Jr, H. **Materiais a base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo.** Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2000.

SENSALÉ, G. P. B. R. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinzas de casca de arroz.** Tese de Doutorado. 250f. Universidade Federal de Santa Catarina. Porto Alegre/RS, 2000.

SEPLAN-RR. Disponível em <http://www.rr.gov.br/investidor.php>. Acesso em abril de 2006.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** Dissertação de Mestrado. 145f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2002.

SILVA, C. R. **Cais aditivadas com pozolana e cimento Portland.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, UFPB/CAMPUS II. Campina Grande/PB, 1992.

SILVA, E. P. **Incorporação de resíduos da indústria de calçados (EVA – Etileno Vinil Acetato) em tijolos prensados de terra crua.** Dissertação de Mestrado. 81f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2003.

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza da casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação de Mestrado. 139f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 1996.

SOUSA, S. M. T. **Tijolos de terra crua reforçada com fibras vegetais.** Dissertação de Mestrado. 135f. Universidade Federal da Paraíba, CAMPUS II. Campina Grande/PB, 1993.

SOUZA, J. **Estudo dos materiais de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal-pozolânica para uso em habitação popular.** Dissertação de Mestrado. 113f. Universidade Federal da Paraíba, CAMPUS II. Campina Grande/PB, 1994.

SOUZA, J; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; BEZERRA, I. M. **The effect of ash from rice husks on the mechanical behavior of concrete blocks without structural application.** CIGR - International Conference of Agricultural Engineering - XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. Porto Alegre/RS, 2008.

SOUZA SANTOS, P. **Tecnologia de Argilas.** Vol II, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1989.

SOUZA, M. F.; YAMAMOTO, J. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz.** Química Nova. Artigo, vol 29, nº 6. São Paul/SP, 1999.

SPINELI et al. **Emprego de solo melhorado com cinza para aumentar a capacidade de suporte de fundações superficiais.** 2000. Portal do MEC. Disponível em: <http://www.mec.gov.br/setec>. Acesso em 2006.

TAN, K.; GJÖRV, O.E. **Performance of concrete under different curing conditions.** Cement and Concrete Research, USA: Pergamon, v. 26, 355-361p, 1996.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2007.

TOLEDO FILHO, R. D. **Utilização de materiais não convencionais nas construções rurais.** Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal da Paraíba, CAMPUS II. Campina Grande/PB, 1990.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Outlook Global 2000 do ambiente.** Relatórios técnicos e regionais. 1999. Disponível em <http://www.unep.org/geo2000>. Acesso em 2006.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**, 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 567f., 1984.

VISCONTE, L. L. Y. **Rejeitos agrícolas em composições poliméricas: cinza da casca de arroz, 2003.** Disponível em <http://www.ima.ufjf.br/linhaspes/modulo>. Acesso em 2006.

WEBER, S. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado. 187f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2001.

WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D. **Percolation and pore structure in mortar and concrete.** Cement and Concrete Research, v. 24, 25-37p. 1994.

YEAU, K. Y; KIM, E. K. **The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag** *Construction and Building Materials*. Cement and Concrete Research. Vol.35, Issue 7, 1391-1399p. July 2005. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science>. Acesso em julho de 2008.

YEAU, K. Y; KIM, E. K. **The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*. Volume 22, Issue 4, 456-462p. April, 2008.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo/SP, 1989.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação de mestrado. Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 1997.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósito à base de cimento e casca de arroz.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 118f. Campinas/SP. 1999.