

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E  
AMBIENTAL

**FABRICAÇÃO DE TIJOLOS Prensados com Agregados Reciclados de  
Telhas Cerâmicas, Cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz**

HENRIQUE DO CARMO BARROS

Cuiabá, MT  
Dezembro de 2012

HENRIQUE DO CARMO BARROS

**FABRICAÇÃO DE TIJOLOS PENSADOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE  
TELHAS CERÂMICAS, CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito à obtenção do título de Mestre.

Área de concentração:  
Tecnologia Ambiental

Orientador:  
Prof. Dr. Paulo Modesto Filho

Co-Orientadora:  
Prof<sup>a</sup> Dra. Juzélia Santos

Cuiabá, MT  
Dezembro de 2012

### Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

B277f Barros, Henrique do Carmo.  
Fabricação de tijolos prensados com agregados reciclados de telhas cerâmicas, cimento Portland e cinza de casca de arroz / Henrique do Carmo Barros. -- 2012.  
ix, 120 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Paulo Modesto Filho.  
Coorientadora: Juzélia Santos.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2012.  
Inclui bibliografia.

1. Tijolos prensados - Fabricação. 2. Tijolos - Agregados Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC). 3. Tijolos – Cinza de Casca de Arroz. 4. Pozolanas artificiais. 5. Resíduos cerâmicos – Reciclagem. I. Título.  
CDU 691.421:691.54

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Jordan Antonio de Souza - CRB1/2099

**Permitida a reprodução parcial ou total desde que citada a fonte**



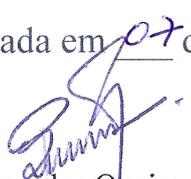
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental  
Campus I da UFMT, Cuiabá, Mato Grosso

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

FABRICAÇÃO DE TIJOLOS PENSADOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE  
TELHAS CERÂMICAS, CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA DE ARROZ

Henrique do Carmo Barros

Dissertação aprovada em 07 de DEZEMBRO de 2012

  
Prof. Dr. Douglas Queiroz Brandão  
COORDENADOR DO PPGEEA

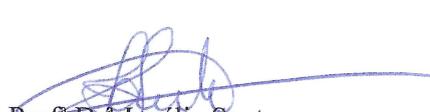
Banca Examinadora

  
Prof. Dr. Paulo Modesto Filho  
(Presidente e Orientador)

Departamento de Engenharia Sanitária e  
Ambiental  
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e  
Tecnologia  
Universidade Federal de Mato Grosso

  
Profª Drª Sandra Maria de Lima

Departamento de Obras Civis  
Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Norte

  
Profª Drª Juzélia Santos  
(Coorientadora)

Departamento de Área da Construção Civil  
Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia de Mato Grosso

  
Prof. Dr. José Manoel Henriques de Jesus

Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e  
Tecnologia  
Universidade Federal de Mato Grosso

Dedico este trabalho à Ivana, minha esposa, e aos meus filhos que me acompanharam, ao longo deste mestrado. A eles uma prova de que sempre há/é tempo de se entregar à pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Paulo Modesto Filho que me aceitou como seu orientando e me oportunizou a realizar esta pós-graduação;

A Professora Doutora Juzélia Santos que me acolheu como seu Co-orientando e me abriu a visão para pesquisar este assunto;

A Universidade Federal de Mato Grosso pelo oferecimento, através da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, deste Programa de Pós-Graduação que me oportunizou realizar este Mestrado;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), por compartilharem sua sabedoria;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso-Campus Cuiabá Cel Octayde Jorge da Silva (IFMT), pelo uso dos laboratórios do DACC;

A Professora Doutora Albéria Cavalcanti Albuquerque pelas sugestões nos ensaios no laboratório do DACC/IFMT;

A Professora Doutora Angela Santana (IFMT) e ainda à minha colega de mestrado Luciana Nascimento pela ajuda na formatação deste trabalho;

Às alunas Isis e Stela, bolsistas do programa de iniciação científica do IFMT, que literalmente “sujaram as mãos” na produção e na moagem das CCA;

Aos alunos laboratoristas (todos) pela gentileza em me ajudar nos vários ensaios nos laboratórios do DACC.

## RESUMO

BARROS, H. C. **Fabricação de tijolos prensados com agregados reciclados de telhas cerâmicas, cimento Portland e cinza de casca de arroz.** 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

O setor das indústrias de cerâmica vermelha destaca-se como grande consumidor de recursos naturais e energia, é responsável por expressiva emissão de gases que provocam o efeito estufa, e também grande gerador de resíduos. Estimativas indicam que o setor produziu no Brasil, em 2009, 76 bilhões de peças, correspondendo a 75% de blocos/ tijolos e 25% de telhas. Nisso, as indústrias cerâmicas consumiram 3.500 GWh de energia; 152 milhões de toneladas de argila; emitiram 185 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada de material produzido e geraram e descartaram entre 4,5 e 6,7 milhões de toneladas de resíduos. Da mesma forma, as indústrias beneficiadoras de arroz, ao utilizarem a queima da casca desse cereal nos processos de parboilização geram cerca de 20% de cinzas que, se descartadas inadequadamente, provocam sérios danos ao meio ambiente. Por outro lado, sabe-se que as Cinzas da Casca de Arroz (CCA), quando devidamente processadas, desenvolvem atividades pozolânicas. O objetivo deste trabalho foi produzir um tijolo prensado a partir de Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC), cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz (CCA). A relevância da pesquisa se justifica no fato de o tijolo resultante não necessitar de extração de mais argila nem de queima, conseqüentemente, não há gastos com energia na sua produção nem emissão de gases que provocam o efeito estufa. Inicialmente, procedeu-se a britagem das telhas e, depois, a separação nas faixas granulométricas, correspondentes a agregados miúdos definidos pela ABNT. Foram usados dois tipos de CCA: a natural, coletada na indústria, e a produzida em laboratório, ambas utilizadas em substituição parcial de 20, 25 e 30% do cimento Portland. Após as caracterizações física, química e mineralógica desses resíduos, os tijolos foram moldados utilizando os traços 1:9 [aglomerante (cimento+CCA) : agregado]. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão revelaram que a substituição parcial do cimento pela CCA, nos percentuais estabelecidos na pesquisa, prejudicou o desempenho mecânico dos tijolos que apresentaram, porém, desempenho satisfatório para serem utilizados como elementos de vedação em paredes internas acima do nível do solo. Os resultados apontam também que a associação desses dois resíduos pode contribuir no sentido de se dar uma destinação ecologicamente correta para ambos.

**Palavras- chave:** Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC); Cinza de Casca de Arroz (CCA); Pozolanas artificiais; Tijolos prensados

## ABSTRACT

BARROS, H. C. **Manufacture of pressed bricks with ceramic tile recycled aggregates, Portland cement and rice husk ash.** Cuiabá, 2012. 120 p. Dissertation. (Master's degree) - Post-Graduation Program in Buildings and Environmental Engineering, Federal University of Mato Grosso.

The red ceramic industry sector stands out as a major consumer of natural resources and energy. It is responsible for considerable greenhouse gas emissions that cause the greenhouse effect. It has also been considered as large generator of waste. Estimates indicate that in 2009, these industries produced in Brazil, 76 billion pieces, accounting for 75% of blocks / bricks and 25% of tiles. Concerning these findings, the ceramic industries consumed 3,500 GWh of energy, 152 million tons of clay; emitted 185 kg of CO<sub>2</sub>/tons of material produced and these sectors generated and discarded between 4.5 and 6.7 million tons of waste. Similarly, the beneficiary industries of rice, when using the method of burning the bark of this cereal in the parboiling processes generates about 20% of ash, if improperly discarded cause serious damage to the environment. Furthermore, it is known that Rice Husk Ash (RHA) when properly processed develop pozzolanic properties. This study aimed at producing a pressed brick from Ceramic Tile Recycled Aggregates of (CTRA), Portland cement and Rice Husk Ash (RHA). The importance of the research is justified by the fact that the resulting bricks do not require extraction of clay, nor require burning, consequently without spending energy in their production, there are no gases emissions which cause greenhouse effect. Initially it was done the procedure of crushing the tiles, after it was initiated the process of separating the particle sizes corresponding to fine aggregates defined by ABNT. It was used two types of RHA: the natural type, collected in the industry and the type produced in the laboratory, both of them used in partial substitution of 20, 25 and 30% of Portland cement. After physical, chemical and mineralogical characterizations of these wastes the bricks were molded using traces 1:9 [binder (cement + RHA): aggregate]. The results of the compressive strength tests revealed that the partial replacement of cement by RHA according to the percentages set forth in research impaired the mechanical performance of the bricks which had, however, a satisfactory performance to be used as sealing elements on the internal walls above the ground level. The results also indicated that the association of these two residues can contribute in order to give an environmentally friendly destination for both.

**Keywords:** Ceramic Tile Recycled Aggregate (CTRA); Rice Husk Ash (RHA); Artificial pozzolans; Pressed bricks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Origem dos RCD em alguns municípios brasileiros.....	24
Figura 2 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga-SP.....	25
Figura 3 – Estocagem inadequada de tijolos em canteiro de obra.....	25
Figura 4 – Área de 12 hectares degradada pela retirada de argila sendo reaterrada em Várzea Grande-MT. ....	27
Figura 5 – Resistência à compressão com a idade dos corpos de prova, pura por imersão. ....	31
Figura 6 – Resistências de argamassas com vários teores de CCA.....	40
Figura 7 – Micrografia Eletrônica de Varredura da Cinza da Casca de Arroz.....	45
Figura 8 – Diagrama esquemático patenteado por Sugita (1992). ....	47
Figura 9 – Fornalha para a combustão de CCA em duas etapas. ....	48
Figura 10 – Variação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com o tempo de moagem....	49
Figura 11 – Demanda de água no ensaio de Pozolanicidade.....	49
Figura 12 – Granulometrias de ARTC utilizados na pesquisa, frações retidas (mm). ....	53
Figura 13 – Espectrômetro utilizado para a determinação da composição química. ....	55
Figura 14 – Frasco volumétrico de <i>Le Chatelier</i> usado no ensaio de massa específica do cimento.....	55
Figura 15 – Equipamentos para o processamento dos agregados: (a) britador de mandíbula, (b) moinho de bolas, (c) conjunto de peneiras. ....	56
Figura 16 – Determinação da massa específica de agregados miúdos pelo método do frasco <i>Chapman</i> . ....	57
Figura 17 – Moldagem das barras, conforme a NBR 15577-4/2008.....	60
Figura 18 – Leitura das barras: ensaio de absorção de água pelo ARTC.....	61
Figura 19 – Ensaio de Absorção de Água pelo ARTC: (a) amostra dos ARTC imersa em água, (b) “lama” formada após a retirada do excesso de água. ....	62
Figura 20 – Secagem do ARTC até obter a condição de saturado superfície seca.....	62
Figura 21 – Secagem do ARTC: (a) moldagem do ARTC no troco-de-cone, (b) leve compactação do ARTC. ....	63
Figura 22 – Conjunto de reservatórios para captação e armazenamento da CCA: (a) fundo do reservatório superior com alçapão para descarte da CCA em caminhões, (b) reservatório inferior e conjunto de bombeamento da cinza. ....	64
Figura 23 – Queima da casca de arroz: (a) forno, (b) CA em caixa adaptada no interior do forno, (b) CCA após segunda fase da queima.....	65
Figura 24 – Peneiramento e moagem das CCA: (a) moinho de disco, (b) peneiramento manual das CCA. ....	66
Figura 25 – Ensaio de massa específica de CCA, método <i>Le Chatelier</i> . ....	66
Figura 26 – Conjunto de balança montado em agitador mecânico.....	67
Figura 27 – Difratômetro de raios X SHIMADZU XRD-6000.....	68
Figura 28 – Termobalança SHIMADZU, DTG 60H.....	69
Figura 29 – (a) mistura, (b) enchimento e (c) pesagem do recipiente contendo ARTC.....	70
Figura 30 – Determinação da umidade ótima por meio de teste táctil-visual. ....	73

Figura 31 – Procedimentos para a moldagem dos tijolos: (a) mistura manual, (b) tijolos após prensagem, (c) tijolos armazenados em câmara úmida, (d) texturas escuras dos tijolos.....	74
Figura 32 – Regularização das faces dos tijolos: (a) capeamento dos tijolos e (b) Determinação da área bruta do tijolo. ....	76
Figura 33 – Rompimento dos tijolos: (a) prensa para rompimento e (b) rompimento de tijolo. ....	76
Figura 34 – Ensaio de absorção de água: (a) ensaio de absorção por imersão e (b) ensaio de absorção por capilaridade.....	78
Figura 35 – Gráfico da reatividade potencial do cimento, ARTC e CCAp.....	82
Figura 36 – Gráfico da reatividade potencial do cimento, ARTC e CCAn.....	82
Figura 37 – Etapas de produção de CCA: (a) primeira etapa, até 400° C e (b) segunda etapa, de 400 a 600° C.....	84
Figura 38 – Curva granulométrica das CCAn e da CCAp. ....	85
Figura 39 – Difratograma de raio X da CCAp. ....	88
Figura 40 – Difratograma de Raio X da CCAn.....	88
Figura 41 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAp.....	89
Figura 42 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAn.....	90
Figura 43 – Tijolo moldado com a composição 10: 20: 70 (textura mais áspera). ....	92
Figura 44 – Tijolo moldado com a composição 25: 35: 40 (Textura mais Fina). ....	92
Figura 45 – Resistência à compressão nos tijolos, nas idades de 7, 14 e 28 dias.....	96
Figura 46 – Comparação das resistências dos tijolos com as CCAn e CCAp, nos percentuais e idades dos ensaios. ....	97
Figura 47 – Percentual de absorção de água por imersão.....	102
Figura 48 – Absorção por capilaridade dos tijolos de ARTC.....	104
Figura 49 – Retirada do tijolo após prensagem .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compilação de pesquisas utilizando subprodutos e resíduos industriais. ....	21
Tabela 2 – Legislações Ambientais (Federal, Estado de Mato Grosso e Município de Cuiabá). ....	22
Tabela 3 – Legislação Nacional: resoluções, normas e outros. ....	23
Tabela 4 – Composição dos resíduos sólidos urbanos no município de Cuiabá <sup>1</sup> , em abril de 2006. ....	24
Tabela 5 – Perdas nos processos de transformação da indústria cerâmica, em 2005. ....	26
Tabela 6 – Produção e perdas em cinco indústrias da Grande Cuiabá. ....	26
Tabela 7 – Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de Agregados Reciclados de RCD. ....	32
Tabela 8 – Produção de arroz em casca/produção CCA safra 2011/2012. ....	33
Tabela 9 – Valores de PCI de alguns combustíveis usados na produção de energia. ....	34
Tabela 10 – Quantidade de cinza gerada por resíduo. ....	35
Tabela 11 – Exigência da NBR 12653/1992. ....	38
Tabela 12 – Pesquisas Abordando a Temperatura da Queima da Casca de Arroz para a Obtenção de Sílica Amorfa. ....	45
Tabela 13 – Resumo dos ensaios e metodologia adotada para ARTC e CCA. ....	51
Tabela 14 – Quantidades de materiais para argamassa. ....	59
Tabela 15 – Granulometria dos ARTC requerida para os ensaios. ....	60
Tabela 16 – Composição dos ARTC no empacotamento experimental. ....	70
Tabela 17 – Exemplo de empacotamento para uma composição de misturas de ARTC. ....	70
Tabela 18 – Equações para os cálculos da massa específica da mistura e do índice de vazios. ....	71
Tabela 19 – Quadro ilustrativo dos empacotamentos experimental e teórico de uma das sete composições. ....	72
Tabela 20 – Quantidade de tijolos produzidos para os ensaios de resistência à compressão. ....	75
Tabela 21 – Denominação dos tijolos, para a apresentação dos resultados e discussões. ....	75
Tabela 22 – Composição química do cimento Portland CP II-F-32. ....	79
Tabela 23 – Massa específica dos cimentos. ....	80
Tabela 24 – Massa específica dos ARTC. ....	81
Tabela 25 – Quantidade em massa para a moldagem de três corpos de prova. ....	81
Tabela 26 – Resultados da resistência à compressão. ....	81
Tabela 27 – Absorção de água pelos ARTC. ....	83
Tabela 28 – Massa específica das CCA. ....	84
Tabela 29 – Resultados da resistência à compressão. ....	85
Tabela 30 – Resultados do índice de atividade pozolânica e água requerida. ....	86
Tabela 31 - Composição química das CCAp e CCAn. ....	87
Tabela 32 – Valores dos empacotamentos experimental e teórico. ....	91
Tabela 33 – Porcentagem de aglomerantes e resistência característica ( $f_{bk}$ ) à compressão dos tijolos nas idades de 7, 14 e 28 dias. ....	93
Tabela 34 – Resistências individuais dos 6 CP das amostras do tijolo 1 (20% CCAn). ....	94

Tabela 35 – Resistências individuais dos 6 CP das amostras do tijolo referência. ....	94
Tabela 36 – Classes dos blocos vazados de concreto simples (NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). ....	98
Tabela 37 – Requisitos para resistência característica à compressão (NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). ....	99
Tabela 38 – Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 10.834/2012 (ABNT, 2012). ....	100
Tabela 39 – Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 7170/ 1983 (ABNT, 1983).	101
Tabela 40 – Percentual de absorção de água por imersão. ....	102
Tabela 41 – Relação de resistência à compressão e absorção de água por imersão em tijolos.....	103
Tabela 42 – Absorção por capilaridade dos tijolos de ARTC. ....	104
Tabela 43 – Comparação da absorção de água dos tijolos de ARTC com a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). ....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregados Reciclados de Concreto
ARM	Agregados Reciclados Mistos
ARTC	Agregados Reciclados de Telha Cerâmica
ATTS	Área de Transbordo e Triagem para Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos
CA	Casca de Arroz
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CDES	Conselho de Desenvolvimento Econômico e Social
CEF	Caixa Econômica Federal
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DESA	Departamento de Desenvolvimento Econômico e Assuntos Sociais
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
I&T	Consultoria Informações e Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
IFMT	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
ONU	Organização das Nações Unidas
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCC	Resíduo da Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RRCV	Resíduo Reciclado de Cerâmica Vermelha
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMINFE	Secretaria Municipal de Infraestrutura de Cuiabá
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SSS	Saturado Superfície Seca
UNFPA	Fundo de População das Nações Unidas
UN-HABITAT	Agência das Nações Unidas para Assentamentos Humanos

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>15</b>
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	16
1.2 QUESTÃO DA PESQUISA.....	18
1.2.1 Objetivo Geral .....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	19
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL.....	20
2.2 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS .....	21
2.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	23
2.3.1 Geração de Resíduos Cerâmicos .....	25
2.4 RECICLAGEM DE RESÍDUOS CERÂMICOS .....	27
2.4.1 Agregado Cerâmico Reciclado para Concreto .....	28
2.4.2 Agregado Cerâmico Reciclado para Argamassas.....	29
2.4.3 Agregado Reciclado de Cerâmica para Pavimentos e Outros Fins .....	30
2.4.4 Atividade Pozolânica em Resíduos Cerâmicos .....	31
2.5 CASCA DE ARROZ (CA).....	32
2.5.1 Produção Mundial/Nacional de Arroz em Casca .....	32
2.5.2 Uso da Casca de Arroz (CA) .....	33
2.5.3 Composição Química e o Potencial Energético da Casca de Arroz.....	34
2.6 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA).....	35
2.6.1 Usos da CCA .....	36
2.7 MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	37
2.7.1 Definição .....	37
2.7.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos (NBR 12653/1992).....	38
2.7.2.1 <i>Pozolanas Naturais</i> .....	38
2.7.2.2 <i>Pozolanas Artificiais</i> .....	39
2.7.3 Comportamento das Pozolanas em Matrizes de Cimento Portland.....	39
2.7.4 Métodos para a Determinação da Atividade Pozolânica .....	41
2.7.4.1 <i>Método de Luxan</i> .....	41
2.7.4.2 <i>Método de Chapelle</i> .....	41
2.7.4.3 <i>Método do IAP com a cal (NBR 5751/1992)</i> .....	41
2.7.4.4 <i>Método do IAP com o cimento (NBR 5752/1992)</i> .....	42
2.8 PROCESSAMENTO DA CCA.....	43
2.8.1 Efeitos das Temperaturas de Queima nas Características da CCA .....	43
2.8.2 Efeitos da Moagem nas Características da CCA .....	48

<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>51</b>
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1 MATERIAIS .....	52
3.1.1 Cimento Portland.....	52
3.1.2 Água de Amassamento .....	52
3.1.3 Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC).....	52
3.1.4 Cinza de Casca de Arroz .....	53
3.2 MÉTODOS.....	54
3.2.1 Cimento Portland.....	54
3.2.1.1 <i>Caracterização Química</i> .....	54
3.2.1.2 <i>Caracterização Física</i> .....	55
3.2.2 Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC).....	56
3.2.2.1 <i>Produção dos ARTC</i> .....	56
3.2.2.2 <i>Caracterização Físico-química dos ARTC</i> .....	57
3.2.3 Cinza de Casca de Arroz (CCA).....	63
3.2.3.1 <i>Produção da CCA na Indústria e em Laboratório</i> .....	63
3.2.3.2 <i>Peneiramento e Moagem das CCA</i> .....	65
3.2.3.3 <i>Caracterização Física, Química e Mineralógica das CCA</i> .....	66
3.2.4 Fabricação dos Tijolos.....	69
3.2.4.1 <i>Empacotamento Experimental dos Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC)</i> .....	69
3.2.4.1 <i>Definição do Traço para a Moldagem do Tijolo</i> .....	72
3.2.4.3 <i>Prensagem da Mistura</i> .....	74
3.2.4.4 <i>Ensaio de Resistência à Compressão</i> .....	74
3.2.4.5 <i>Ensaio de Absorção de Água por Imersão</i> .....	77
3.2.4.6 <i>Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade</i> .....	77
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>79</b>
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	79
4.1 CIMENTO PORTLAND.....	79
4.1.1 Composição Química .....	79
4.1.2 Massa Específica .....	80
4.2 AGREGADO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA (ARTC).....	80
4.2.1 Caracterização Física e Química .....	80
4.2.1.1 <i>Massa Específica</i> .....	80
4.2.1.2 <i>Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com a Cal</i> .....	81
4.2.1.3 <i>Reatividade Potencial do ARTC – Reação Álcali-agregado</i> .....	82
4.2.1.4 <i>Ensaio de Absorção de Água pelo ARTC</i> .....	83
4.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA).....	83
4.3.1 Produção da CCA em Laboratório .....	83
4.3.2 Caracterização Física, Química e Mineralógica das CCA .....	84
4.3.3.1 <i>Massa Específica</i> .....	84

4.3.3.2	<i>Determinação da Granulometria da CCA<sub>n</sub> e da CCA<sub>p</sub></i> .....	84
4.3.3.3	<i>A Determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das CCA</i> .....	85
4.3.3.4	<i>Análise Química das CCA</i> .....	86
4.3.3.5	<i>Análise Mineralógica das CCA</i> .....	87
4.3.3.6	<i>Análise Térmica das CCA</i> .....	89
4.4	<b>FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS</b> .....	91
4.4.1	Empacotamentos Experimental e Teórico.....	91
4.4.1.1	<i>Definição do Empacotamento</i> .....	92
4.4.2	Ensaio de Resistência à Compressão.....	93
4.4.2.1	<i>Metodologia de Cálculo das Resistências</i> .....	93
4.4.2.2	<i>Análise dos resultados em relação ao percentual de cca utilizada</i> .....	95
4.4.2.3	<i>Análise dos resultados em relação ao tipo de CCA utilizada</i> .....	97
4.4.2.4	<i>Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 6136:2007 (ABNT, 2007)- Resistência à compressão</i> .....	98
4.4.2.5	<i>Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 7170/1983 (ABNT, 1983) e a NBR 6460/1983 (ABNT, 1983)- quanto à resistência à compressão</i> .....	100
4.4.3	Ensaio de Absorção de Água por Imersão.....	101
4.4.4	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	103
	<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>106</b>
	5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
	5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	106
	5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	110
	<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>111</b>
	6 REFERÊNCIAS.....	111

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

Em 2011, a população mundial atingiu, conforme previsão da agência da Organização das Nações Unidas, a casa de 7 bilhões de pessoas (DESA, 2010). Segundo a UNFPA (2007), em 2030, haverá aproximadamente 5 bilhões de pessoas vivendo em áreas urbanas. No Brasil, áreas urbanas já recebem 84% da população brasileira contra 16% da rural (IBGE, 2010).

O processo de urbanização traz consigo demandas sociais por infraestrutura em saneamento básico, transporte, geração e distribuição de energia e, principalmente, habitação, dentre outras. Estimativas apontam que o Brasil detém um déficit habitacional avaliado em cerca de 5,6 milhões de domicílios, e reconhece que é uma das mais graves dívidas sociais do país (CBIC, 2011).

No âmbito do Programa de Aceleração de Crescimento (PCA II), o governo federal criou, entre outros objetivos, o programa chamado Minha Casa, Minha Vida visando construir 2 milhões de unidades habitacionais, até 2014 (CEF, 2012). Os recursos previstos aquecerão a demanda por produtos de transformação do chamado setor dos não metálicos (cimento, cerâmicas vermelha e de revestimento, vidro, cal, gesso, entre outros) que, por sua vez, demandará extração de recursos naturais, consumo de energia, aumento de emissões de CO<sub>2</sub> e geração de resíduos (MME, 2010).

Na cadeia produtiva da construção civil, a indústria do cimento é responsável por grande consumo de materiais, energia e geração de resíduos. Necessita de cerca de 4 GJ de energia por tonelada de cimento produzida; emite cerca de 900 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada de cimento produzido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Da mesma forma, estimativas indicam que o setor das indústrias de cerâmica vermelha produziu no Brasil, em 2009, 76 bilhões de peças, correspondendo a 75% de blocos/ tijolos e 25% de telhas. Nisso, o setor consumiu 3.500 GWh de energia; 152 milhões de toneladas de argila; emitiu 185 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada de material produzido e gerou entre 4,5 e 6,7 milhões de toneladas de resíduos nos processos de produção (MME, 2010).

Resíduos sólidos de atividades agroindustriais, classificados pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) como resíduos agrossilvopastoris, também inspiram preocupações diante do volume e da forma como são descartados. Dafico et al. (2003) afirmam que a Casca de Arroz (CA), quando incinerada, gera aproximadamente 20% de Cinza de Casca de Arroz (CCA).

A preocupação com o esgotamento de recursos naturais, gastos de energia, emissões de gases e geração de resíduos tem movido muitos centros de pesquisas do mundo na busca de novos materiais utilizando resíduos. No Brasil, existem muitos pesquisadores trabalhando com Resíduos de Construção e Demolição (RCD), porém poucos são os trabalhos encontrados com uso específico de Resíduos de Cerâmicas Vermelha (RCV), como por exemplo: Baldo, Costa, Martins e Sordi (2004), pesquisando Concretos não estruturais usando agregados reciclados da indústria de cerâmica vermelha; Dias (2004), avaliando resíduos de telhas cerâmicas para camadas de pavimentos, entre outros.

No país, existem muitas pesquisas visando ao aproveitamento da CCA na construção civil. Pouey (2006), Cordeiro (2009), Tashima et al. (2012) e Bezerra (2010) têm suas pesquisas voltadas para o uso das propriedades pozolânicas da CCA para aplicação na fabricação de cimentos, concretos e argamassas. No IFMT – Campus Cuiabá, Martinez et al. (2005) desenvolveram argamassa composta com Casca de Arroz (CA) para painéis de fechamento vertical em habitações populares.

No IFMT – Campus Cuiabá, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com tijolos de solo-cimento (WILSON et al., 2002); com agregados reciclados de Resíduos de Cerâmica Vermelha (RCV) para concretos e argamassas (COSTA e SANTANA, 2007; FAVINE e COSTA, 2009); com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para blocos de alvenaria (ALBUQUERQUE e SANTOS, 2012); RCD para concreto autoadensável (LIMA e GUIA, 2012); RCD para base e subbase de pavimentos (AMORIM e QUEIROZ, 2011), etc.

Seguindo a linha de pesquisa de reaproveitamento de resíduos, este trabalho visa produzir um tijolo prensado a partir da utilização de Agregados Reciclados de Telhas Cerâmicas (ARTC), cimento Portland e Cinza da Casca de Arroz (CCA). Na sua confecção, pretende-se a redução de cimento na mistura, economia de energia e eliminação de emissões de gases e, principalmente, explorar as potencialidades desses dois resíduos (ARTC e CCA) que, hoje, são descartados na natureza.

## 1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A superação dos problemas ambientais acontecerá com o desenvolvimento de materiais de alta ecoeficiência, que consumam menos materiais que os tradicionalmente utilizados nos dias atuais. “O desafio é desmaterializar a construção: construir utilizando menos matérias-primas” (GLEIZE e JOHN, 2007). Os desafios futuros a serem vencidos pela humanidade – como redução da poluição (resíduos, emissão de gases), do consumo de energia

e de materiais não renováveis, além do uso racional da água – passam pela cadeia produtiva da construção civil.

A proposta desta pesquisa de desenvolver um tijolo prensado utilizando resíduos cerâmicos e Cinza de Casca de Arroz está em sintonia com os desafios aos quais os autores acima se referem, pois é uma forma de viabilizar um componente construtivo tradicional sem a exploração de recursos naturais, consumindo menos energia, reduzindo a emissão de gases e também dando uma destinação a esses resíduos, hoje descartados na natureza.

O produto resultante deste trabalho é um componente construtivo, vazado, destinado à alvenaria sem função estrutural. Embora guardando – pela conformidade da forma, dimensões e texturas – certa similaridade com tijolos de solo-cimento, a opção para balizar a pesquisa foi a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007), que estabelece os requisitos para blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

Foram dois tipos de CCA usadas em substituição parcial (20, 25 e 30%) do cimento Portland na confecção dos tijolos: A CCAn (cinza natural coletada na indústria, peneirada e moída em laboratório); CCAp (cinza produzida e moída em laboratório). Esse enfoque foi no sentido de se comparar o desempenho mecânico dos tijolos associando-o ao tipo de CCA e sua quantidade em substituição do cimento Portland.

Optou-se por estudo específico de Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC), eliminando-se, com isso, as variáveis de propriedades inerentes a outros materiais constituintes dos RCD (concreto, argamassa, cerâmica, gesso, etc.). Outra razão para a escolha dessas telhas foi porque são provenientes de uma demolição seletiva e, por isso, livres de “contaminação” por argamassas de revestimento ou assentamento, por tintas e outras patologias, como ocorrem, por exemplo, com tijolos oriundos da demolição de alvenaria de vedação.

O uso de um agregado reciclado a partir de um material cerâmico poderá servir também de referência a outras pesquisas utilizando resíduos de construção, já que a fração cerâmica (tijolos furados, maciços, lajotas, etc.) ocupa uma fatia expressiva na composição dos RCD (AGOPYAN e JOHN, 2000).

Justifica-se também porque as indústrias cerâmicas poderiam, a partir desta pesquisa, viabilizar e disponibilizar para o comércio uma linha “verde” de produtos a partir dos resíduos “virgens” gerados nos seus processos de produção. Questionários aplicados às indústrias cerâmicas da Grande Cuiabá, das quais cinco responderam, demonstram que é expressivo o volume de resíduos gerados nos seus processos produtivos.

Os dados compilados apontam a média de 434 toneladas/mês de resíduos nos processos de produção, que são utilizados para o aterramento no entorno das indústrias cerâmicas. Ainda que a NBR 10.004/1987 (ABNT, 1987) classifique resíduos cerâmicos como inertes, não existem estudos sobre a solubilidade do resíduo no meio a que ficará exposto (COSTA, 2006).

A exemplo do que ocorre com as indústrias cimenteiras que utilizam resíduos de outros setores industriais, como pneus descartados, nos fornos na produção do clínquer (SNIC, 2010), as indústrias cerâmicas, ao utilizarem seus resíduos associados à CCA, estariam contribuindo com as usinas beneficiadoras de arroz na questão da destinação dos resíduos provenientes da queima da casca de arroz.

Iniciativas como esta, isoladamente, podem não repercutir para o contexto econômico e socioambiental, mas, quando inseridas num cenário que envolve agentes como governos, iniciativa privada e organizações não governamentais, podem resultar em política, não de governos, mas de Estado, para o enfrentamento dos problemas socioambientais. Exemplo disso é a recente Lei nº 9.696/2012, sancionada pelo governo do Estado de Mato Grosso em março de 2012, que incentiva a produção de tijolos de solo-cimento e de outros tipos. A preferência por esse tipo de material em obras públicas estaduais será dada inclusive como critério de desempate nas licitações (AL/MT, 2012).

Sabe-se ainda que a cadeia produtiva do setor da construção civil responde pelo consumo expressivo de muitos recursos naturais: 42% da energia disponibilizada, 21% da água tratada e 25% da emissão de gases na atmosfera, além de gerar de 60 a 70% do entulho no Brasil (SNIC, 2009). Com esse passivo ambiental, a cadeia produtiva da construção civil poderia absorver, nos processos construtivos de habitação de interesse social, esse tipo de tijolo, contribuindo para a diminuição do déficit habitacional do país.

## 1.2 QUESTÃO DA PESQUISA

Seria viável a associação de agregados reciclados de resíduos cerâmicos e das CCA na confecção de um tijolo, como forma de mitigar o descarte inadequado na natureza dos resíduos cerâmicos provenientes de canteiro de obras ou descartados pelas indústrias cerâmicas e das cinzas geradas pelas indústrias beneficiadoras de arroz?

### 1.2.1 Objetivo Geral

Produzir um tijolo prensado a partir da utilização de Agregados Reciclados de Telhas Cerâmicas (ARTC), cimento Portland e Cinza da Casca de Arroz (CCA) que seja viável técnica, econômica e ambientalmente.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Proceder às caracterizações físicas, químicas e mineralógicas dos ARTC e das CCA;
- b) Analisar a resistência mecânica de tijolos confeccionados com ARTC e cimento Portland, que servirá de referência aos tijolos moldados com adição da CCA;
- c) Analisar a resistência mecânica de tijolos de ARTC com adição de CCA nas proporções de 20, 25 e 30%, em substituição parcial do cimento Portland;
- d) Analisar a resistência mecânica de tijolos de ARTC com adição de CCAp nas proporções de 20, 25 e 30%, em substituição parcial do cimento Portland;
- e) Comparar as resistências mecânicas de tijolos de ARTC associando-as ao tipo de CCA utilizada na moldagem dos tijolos;
- f) Comparar os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade associando-os ao tipo e ao percentual de CCA utilizada na moldagem dos tijolos.

### 1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado conforme os seguintes capítulos:

O Capítulo 1 teve como propósito apresentar a problemática da explosão demográfica do mundo contemporâneo, as demandas sociais advindas do fenômeno da urbanização, os investimentos e os impactos ambientais decorrentes. Demonstrou ainda a relevância na escolha do tema, definindo seus objetivos geral e específicos, bem como sua estruturação.

O Capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica, abordando legislações existentes no país para questões como geração e reciclagem de resíduos e pesquisas para o desenvolvimento de materiais alternativos para a construção civil.

No Capítulo 3, são abordados o programa experimental, os materiais e os métodos para o desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões.

No capítulo 5, são feitas as considerações finais e comentados aspectos positivos, dificuldades, falhas e são feitas ainda sugestões para futuras pesquisas.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as referências bibliográficas.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Gleize e John (2007), os materiais de construção que são empregados hoje, com exceção dos plásticos, foram desenvolvidos há mais de 100 anos. Houve, nesse período de tempo, a melhoria das suas propriedades, porém só recentemente está ocorrendo uma revolução tecnológica. Assim, na escala do tempo, assistiu-se à melhoria de materiais de construção e evolução de técnicas e tecnologias construtivas.

Componentes construtivos para a execução de paredes, por exemplo, evoluíram da construção em terra crua (taipa de pilão) a tecnologias como o Sistema Light Steel Framing (LSF), composto de paredes, pisos e cobertura que, reunidos, possibilitam uma integridade estrutural da edificação resistindo aos esforços que solicitam a estrutura (FREITAS, 2007).

No entanto, a preocupação com o meio ambiente trouxe de volta materiais e técnicas construtivas utilizadas há milênios, como é o caso da construção com a terra crua utilizando os processos da taipa de pilão ou mesmo o adobe, mas, desta feita, estabilizados com emulsões betuminosas; pozolanas como cinza volantes e cinza de casca de arroz que, adicionadas à cal, se tornam agentes cimentantes (ISAIA, 2007).

Assiste-se, nos dias atuais, ao desenvolvimento de muitas pesquisas na busca de materiais a partir da associação de resíduos industriais e agrícolas, visando à produção de materiais alternativos para a construção civil. Calmon (2007) destaca que o fato de a indústria da construção civil e outros setores industriais e agrícolas apresentarem notáveis possibilidades de absorver os resíduos e os subprodutos gerados por eles desencadeou inúmeras pesquisas no mundo e no Brasil.

No Brasil, várias universidades e centros de pesquisas passaram a publicar seus trabalhos em eventos, tais como: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), Encontro sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (ENECS), Seminário Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil, Congresso Brasileiro de Concreto (IBRACON), entre outros.

Embora sejam preocupantes os problemas advindos com a geração e o descarte de resíduos industriais e agrícolas, eles devem ser analisados também sob a ótica das

potencialidades do seu aproveitamento. Calmon (2007) lista algumas publicações abordando o uso de subprodutos e resíduos industriais e agrícolas, sinalizando a tendência das pesquisas sobre essa área, conforme mostra a Tabela 1.

**Tabela 1 – Compilação de pesquisas utilizando subprodutos e resíduos industriais.**

<b>Material Pesquisado</b>	<b>Subprodutos e Resíduos Industriais</b>				
<b>Argamassa para Revestimento</b>	Resíduo de vidro e couro.	Resíduo de mármore e granito.	Resíduo de caulim	Rejeito virgem de cerâmica e cimento.	Escória de cobre.
<b>Concreto Convencional</b>	Pó de vidro.	Resíduo de mármore e granito.	Resíduo de polimento de porcelanato	Resíduo de escória de ferro/cromo.	Escória de aciaria.
<b>Blocos Pré-moldados e Tijolos</b>	Resíduo de mármore e granito.	Resíduo de Construção e Demolição (RCD).	Cinza da Casca de Arroz (CCA).	Resíduo da cerâmica vermelha.	Resíduos de EVA.

Fonte: CALMON, 2007.

## 2.2 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS

No Brasil, são ainda incipientes as preocupações com questões relacionadas a resíduos gerados nos centros urbanos. Consequentemente, são também incipientes legislações que tratam do assunto, diferente de países como EUA, onde, no final da década de 1960, já existia uma política para resíduos, chamada de *Resource Conservation and Recovering Act (RCRA)* (AGOPYAN e JOHN, 2000).

Durante a ECO-92, realizada no Rio de Janeiro, e a definição da *Agenda 21*, foi destacada a necessidade urgente de se implementar um adequado sistema de gestão ambiental para os resíduos sólidos (GÜNTHER, apud TRINDADE, 2008).

A partir da *Agenda 21*, em 1992, todos os países que participaram do acordo assumiram o compromisso de elaborar e implementar sua própria Agenda Nacional. Desta forma, a *Agenda 21* brasileira foi elaborada pelo Ministério do Meio Ambiente, pela Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e pela Agenda 21 Nacional (CPDS), sendo que o processo de construção ocorreu entre os anos de 1996 e 2002. Esta agenda propõe a aplicação progressiva dos conhecimentos científicos e tecnológicos disponíveis a todos os agentes dos diferentes setores econômicos, em favor do desenvolvimento sustentável (MMA, 2000; DEGANI, 2003).

No sentido de estabelecer um marco legal que desencadeou toda a legislação brasileira para questões ambientais, pode-se afirmar que, de certa forma, a Lei nº 6.938/81 antecipou os temas constantes na Agenda 21. Essa Lei, denominada de Política Nacional do Meio Ambiente, é de grande relevância, uma vez que instituiu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que representa o conjunto de órgãos, entidades e normas de todos os entes federativos da União, Estados, Distrito Federal e municípios responsáveis pela gestão ambiental, assim como princípios e conceitos fundamentais para a proteção ambiental, estabelecendo ainda objetivos e instrumentos até então inexistentes na legislação. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é seu órgão central, que delibera sobre as formas de controle ambiental por meio de Resoluções, que são normas técnicas e administrativas com força de lei (tema controvertido), voltadas para a execução das diretrizes abstratas constantes na Lei nº 6.938/81. Nas Tabelas 2 e 3, foram compiladas as legislações existentes nos âmbitos federal, estadual e municipal.

**Tabela 2 – Legislações Ambientais (Federal, Estado de Mato Grosso e Município de Cuiabá).**

Federal		Estadual (Mato Grosso)		Municipal	
Instrumento Legal	Objetivo	Instrumento Legal	Objetivo	Instrumento Legal	Objetivo
Lei nº 6.938/81	Institui a política nacional do meio ambiente.	Lei nº 7.862/2002	Institui a política estadual de resíduo sólido.	Lei nº 4.949/2007	Institui o sistema de gestão sustentável de RCD e cria o PIGRCC.
Lei nº 12.305/2010	Institui a política nacional de resíduo sólido.	Leis nº 9.132/2009 e nº 9.263/2009 Lei nº 9.696/2012	Acrescentam incisos à Lei nº 7.862/2002; Incentiva a produção de tijolo “ecológico”.	Decreto nº 4.76119/02/2009	Regulamenta a Lei nº 4.949/2007.

Fonte: Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br/>>; <<http://www.mt.gov.br/>>; <<http://www.cuiaba.mt.gov.br/pages>>.

**Tabela 3 – Legislação Nacional: resoluções, normas e outros.**

<b>Instrumento Legal</b>	<b>Resumo dos Objetivos</b>
Resolução CONAMA n° 307/2002 Resolução CONAMA n° 348/2004 Resolução CONAMA n° 431/2011	Responsabiliza os geradores pelos resíduos da construção civil, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos; Acrescenta o amianto na classe dos resíduos perigosos, estabelecidos pela Resolução n° 307/2002. Altera o art. 3° da Resolução n° 307, de 05/07/2002, do CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso.
NBR 10.004/1987	Para efeitos desta norma, os resíduos eram enquadrados em três classes: a) Classe I – perigosos; b) Classe II – não inertes; e c) Classe III – inertes.
NBR 10.004/2004	A ABNT altera a NBR 10.004/87 e classifica os resíduos em apenas duas classes: a) Classe I – perigosos; e b) Classe II – não perigosos; sendo a Classe II subdividida em outras duas classes, IIA – não inertes; e II B – inertes.
NBR 15112/2004	Diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem.
NBR 15113/2004	Esta Norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.
NBR 15114/2004	Esta Norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.
NBR 15115/2004	Esta norma versa sobre a utilização de agregados reciclado de RCD para a execução de camadas de pavimentação.
NBR 15116:2004	Esta norma estabelece os requisitos para o emprego do agregado reciclado destinado à obra de pavimentação viária e obra que utilize o concreto sem função estrutural.
PBQP-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. Este programa tem como objetivo promover a qualidade e a produtividade do setor da construção civil.

Fonte: Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index>>; <<http://www.abnt.org.br/>>.

### 2.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A geração de resíduos sólidos urbanos é um fenômeno decorrente do processo de urbanização e ocorre em todos os aglomerados urbanos do mundo. Um estudo propondo indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas para a União Europeia constata que os resíduos se originam a partir da atividade de nova construção, reabilitação e demolição de edifícios, obras públicas e outras estruturas gerando nela mais de 500 milhões de toneladas (BRAVO et al., 2011).

Ângulo et al. (2009) informam que, quanto à origem dos resíduos nos municípios brasileiros, destacam-se como predominantes as reformas, ampliações e demolições. Ilustram com dados, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Origem dos RCD em alguns municípios brasileiros.



Fonte: PINTO e GONZALES, 2005.

Uma pesquisa contratada pelo município de Cuiabá-MT constatou-se que os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) representavam, em abril de 2006, 65% do total da composição dos Resíduos Sólidos Urbanos gerados diariamente em Cuiabá, conforme mostra a Tabela 4.

**Tabela 4 – Composição dos resíduos sólidos urbanos no município de Cuiabá<sup>1</sup>, em abril de 2006.**

<b>VOL-Resíduos Volumosos<sup>2</sup></b> <b>(t/dia)</b>	<b>DOM-Resíduos Domiciliares</b> <b>(t/dia)</b>	<b>RSS-Resíduos dos Serviços da Saúde</b> <b>(t/dia)</b>	<b>RCD-Resíduos de Construção e Demolição</b> <b>(t/dia)</b>	<b>Total</b> <b>(t/dia)</b>
41,4		7,3	785,4	208,5
3%	331%	1%	65%	100%

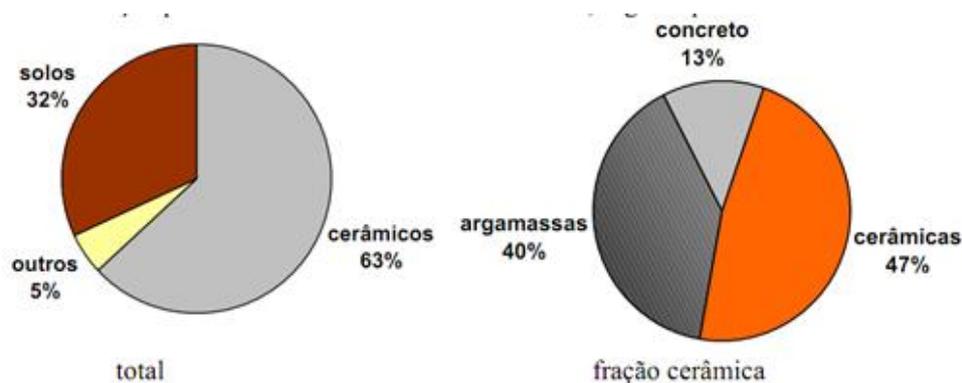
<sup>1</sup> Considerados 26 dias úteis/mês e desconsiderados os resíduos industriais. <sup>2</sup>Inclui podas, móveis e utensílios inservíveis. Fonte: SEMINFE, I&T (PMC, 2006).

Segundo Miranda (2005), os materiais cerâmicos provenientes de alvenarias podem representar uma fração importante do volume total de RCD, demonstrando que, nas usinas de Socorro-SP e São Bernardo do Campo-SP, eles são a maioria.

### 2.3.1 Geração de Resíduos Cerâmicos

Agopyan e John (2000) demonstram que a fração cerâmica (telhas, tijolos e outros) prevalece dentre a porção dos “cerâmicos” (rochas naturais, concreto, argamassas, cerâmicas vermelha e branca, e outros) na composição geral dos RCD, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga-SP.



Fonte: AGOPYAN e JOHN, 2000.

A presença da fração cerâmica (telhas, tijolos e outros) nos RCD se deve não apenas às perdas nos processos construtivos (obras novas, reformas, demolições), mas também à forma de estocagem inadequada desses materiais nas obras, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Estocagem inadequada de tijolos em canteiro de obra.



Fonte: O autor (2012).

Segundo Costa (2006), nos processos de fabricação de muitos materiais destinados à construção civil, também são verificadas geração de resíduos. A pesquisadora ilustra essa afirmação citando o exemplo da fabricação de cerâmica vermelha (tijolos e telhas), da cerâmica branca (louças) e da cerâmica para revestimento (pisos, paredes), muito utilizadas na

construção tradicional. Segundo a autora, a indústria de cerâmica vermelha movimenta 60 milhões de toneladas de matéria-prima por ano. Desse total, 54 milhões de toneladas são transformadas em produtos, sendo que 10% correspondem a perdas que ocorrem durante o processo de transformação (água de cristalização, matéria orgânica, carbonatos, etc.). A Tabela 5 evidencia as perdas que ocorrem nos processos de transformação do parque industrial brasileiro de cerâmica, conforme os registros da pesquisadora.

**Tabela 5 – Perdas nos processos de transformação da indústria cerâmica, em 2005.**

<b>Produto Cerâmico</b>	<b>Unidade</b>	<b>Produção (milhões)</b>	<b>Perda (%)</b>	<b>Total de Resíduos</b>
Cerâmica vermelha	Tonelada	54	3 a 5	1,6 a 2,7 milhões
Cerâmica de Revestimento	M <sup>2</sup>	600	1,5	9 milhões
Louças	Peças	14,2	3	426 mil

Fonte: Compilação feita a partir de COSTA, 2006.

Nesta pesquisa, para estimar a geração de resíduos de cerâmica vermelha nos processos de fabricação, foi aplicado um questionário nas indústrias cerâmicas da grande Cuiabá, das quais cinco responderam sobre o tipo de artefato fabricado, volume de produção, perdas e destinação dos rejeitos (peças descartadas por defeitos), entre outros pontos. A Tabela 6 resume dados que ajudam a aferir a geração de resíduos de cerâmica vermelha nos seus processos produtivos.

**Tabela 6 – Produção e perdas em cinco indústrias da Grande Cuiabá.**

	<b>Indústrias / Produção Mensal</b>					<b>Total Mensal (Unidades)</b>
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	
<b>Produção (Unidades)</b>	1.900.000 <sup>1</sup>	600.000 <sup>2</sup>	500.000 <sup>2</sup>	1.300.000 <sup>3</sup>	750.000 <sup>4</sup>	5.050.000
<b>Perda (%)</b>	10	2	3	3 a 5	2,5	4,3% (média)

<sup>1</sup> Tijolos furados, elementos vazados, blocos. <sup>2</sup> Tijolos furados. <sup>3</sup> Tijolos furados e blocos estruturais. <sup>4</sup> Telhas cerâmicas.

Estimando a massa de 2 kg/peça produzida, chega-se ao montante de 10.100.000 kg ou 10.100 toneladas de produtos cerâmicos produzidos nessas indústrias. Aplicando o percentual médio de 4,3% de perdas nos processos de produção, estima-se que está sendo gerado, somente nessas cinco indústrias, algo em torno 434 toneladas de resíduos/mês. Segundo

informações das indústrias pesquisadas, os resíduos são usados para aterramento nos seus pátios.

Como existem 23 indústrias cerâmicas na Grande Cuiabá fabricando principalmente tijolos e blocos cerâmicos de 8 furos, depreende-se que o volume de resíduos é muito mais expressivo. Por isso, a iniciativa de usar resíduos cerâmicos na fabricação de um tijolo prensado, proposto nesta pesquisa, mitigaria danos ambientais como os da região de Carrapicho, em Várzea Grande-MT, causados pela extração de argila por indústrias cerâmicas locais, como se observa na Figura 4.

Figura 4 – Área de 12 hectares degradada pela retirada de argila sendo reaterrada em Várzea Grande-MT.



Fonte: BARROS (2011).

#### 2.4 RECICLAGEM DE RESÍDUOS CERÂMICOS

Resíduos de componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, etc.) são classificados pela Resolução do CONAMA nº 431/2011 como de Classe A, e pela NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004) como Classe II B – inertes e não perigosos.

Na revisão bibliográfica, foram encontrados muitos trabalhos publicados antes de 2010 que tratam de materiais cerâmicos descartados, nomeados de *rejeitos*. No entanto, o inciso XV do art. 3º da Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define rejeitos como “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final

ambientalmente adequada”, por isso nos referimos aos descartes (produtos defeituosos) como resíduos.

Foram encontrados muitos estudos com abordagens de reciclagem de Resíduos Cerâmicos, como agregados para argamassas, concreto e blocos de concreto, porém tratados no contexto dos componentes de RCD. Alguns centros de pesquisa, como o da Construção Civil do IFMT-Campus Cuiabá, estudam o uso de resíduos reciclados de cerâmica como agregados em concretos e argamassas, na confecção de artefatos (tijolos, blocos), em pavimentos (base, sub-base, asfalto) ou mesmo como material pozolânico.

#### **2.4.1 Agregado Cerâmico Reciclado para Concreto**

Segundo Miranda (2005), existe muito preconceito quanto ao uso de agregado reciclado pela sociedade brasileira, principalmente quando proveniente de resíduo de cerâmica vermelha. O autor afirma que, em Socorro-SP, observou a resistência de pedreiros em usar areia de cor avermelha, oriunda da reciclagem de RCD. Cita ainda o exemplo de uma usina de reciclagem de São Bernardo do Campo que foi obrigada a classificar visualmente o RCD, devido ao fato que a clientela só aceitava o RCD reciclado proveniente de concretos britados.

Para Levy e Helene (2000), há evidências da redução de 20 a 30% na resistência mecânica de concreto feito com agregados de alvenaria, porém, conforme os autores, sempre há a possibilidade de confecção de concreto utilizando Agregado Reciclado de Cerâmica Vermelha (ARCV) para emprego que não seja de uso estrutural.

Segundo esses autores, para manter a consistência de  $70 \pm 10$  mm em concreto com ARCV, a demanda por água é visivelmente maior, fato atribuído à maior absorção do ARCV, na ordem de 12 a 13%, enquanto que o agregado natural apresenta entre 0,8 e 1%.

Na sua pesquisa, Zordan (1997) constatou um grande problema para a resistência dos concretos quando confeccionados com RCD que tinham cerâmicos vitrificados entre seus componentes materiais. O autor atribui isso às faces polidas (esmaltadas, vitrificadas), que impediram que houvesse qualquer aderência entre eles e a matriz do concreto, propiciando que houvesse nesse local uma superfície de ruptura.

Leite (2001) encontrou trabalhos como os de Devenny e Khalaf (1999), em que encontraram valores de taxa de absorção de agregados de tijolos cerâmicos britados variando de 5 a 15% em relação à massa do material seco. Chegaram à conclusão de que seria necessário submergir os ARCV 30 minutos antes da mistura do concreto, para compensar a absorção.

Os autores, citados por Leite (2001), pesquisando as massas específicas de concretos produzidos com ARCV (tijolos cerâmicos britados) encontraram valores de 13 a 15% menores quando comparados aos concretos de referência. Segundo eles, um aumento na densidade dos concretos leva ao aumento da resistência à compressão.

Morales et al. (2000), citados por Leite (2001), produziram misturas de concreto reciclado com agregados graúdos de concreto e agregados miúdos de concreto e de alvenaria, separadamente, e observaram que, para a produção dos concretos, é necessário compensar a alta taxa de absorção do material. Os autores informam que a avaliação da consistência das misturas acabava prejudicada, pois a absorção dos agregados reciclados variava com o tempo de contato do material com água e concluíram que a maior dificuldade, nesse caso, é determinar a consistência padrão, pois o parâmetro é muito instável.

Favini e Costa (2009), visando produzir concreto e argamassa, utilizaram nas suas pesquisas agregados reciclados a partir de telhas cerâmicas com mais de 50 anos de uso. Os resultados dos seus ensaios mostram que a resistência à compressão do concreto reciclado foi menor que a do concreto convencional, em todas as idades, por apresentar uma alta absorção de água e índice de vazios, diminuindo assim sua resistência mecânica.

Apesar desses resultados obtidos, o concreto de telha cerâmica vermelha apresentou boas propriedades químicas, não mostrando reatividade potencial.

Considerando que o concreto reciclado está em sua pior situação, pois este é 100% reciclado, conclui-se que qualquer porcentagem de agregado natural acrescentado em sua confecção aumentará a resistência à tração por compressão axial e diametral do concreto produzido (FAVINI e COSTA, 2008).

Segundo as autoras, diante da análise das resistências por compressão axial e diametral das argamassas obtidas com agregado de telha cerâmica, é possível concluir que a argamassa produzida com agregado de resíduos de telha cerâmica vermelha pode ser utilizada como revestimento interno, já que, de acordo com as Normas Brasileiras, uma argamassa com essa função deve ter, no mínimo, 1,5 MPa de resistência, e a argamassa produzida obteve uma resistência de 2,0 MPa.

#### **2.4.2 Agregado Cerâmico Reciclado para Argamassas**

Costa (2006) constatou que a substituição da areia de rio em argamassa para revestimento por resíduos reciclados de cerâmica tradicional é plenamente viável. Pinto (1989), em estudos realizados com argamassas, concluiu que, quando feitas com RCD

reciclado, apresentaram maiores resistências à compressão em todos os casos e que argamassas com cerâmicos são mais resistentes que as demais.

Esse autor concluiu ainda que argamassas com reciclados apresentam maior absorção que as convencionais e o teor de absorção aumenta à medida que se aumentam os resíduos cerâmicos na argamassa.

Levy (1997) pesquisou propriedades de argamassas com material reciclado de diversas composições (blocos cerâmicos de 2ª linha e tijolos maciços, argamassa endurecida e areia lavada). Os resultados mostraram que argamassas com maiores conteúdos de cerâmicos apresentam maiores resistências à compressão.

### **2.4.3 Agregado Reciclado de Cerâmica para Pavimentos e Outros Fins**

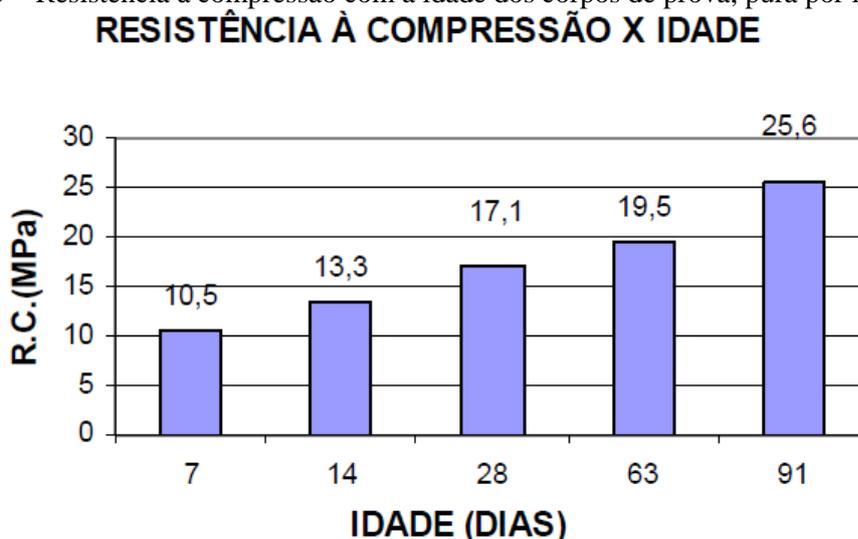
Em sua tese, Dias (2004) constata que pesquisas com RCD encontram-se bem desenvolvidas no Brasil, no entanto se concentram principalmente nas áreas de cimento, concreto e argamassas. Porém, em se tratando de resíduos cerâmicos, as fontes são restritas e ainda mais escassas quando se trata de resíduos de telhas cerâmicas, material utilizado na sua pesquisa sobre aplicação como base e sub-base de pavimentos.

Na mesma obra, ele informa que engenheiros do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais concluíram que resíduos cerâmicos de telhas aplicados em leitos de estradas têm pouca durabilidade (3 a 6 meses). Observaram que o material se quebra à medida que vai sendo solicitado pelo tráfego e vira pó, inviabilizando seu uso sem um material ligante.

Baldo et al. (2004) investigaram os efeitos nas propriedades mecânicas do concreto, quando os agregados naturais são substituídos por agregados de resíduos da indústria de cerâmica vermelha (tijolos e telhas). Concluíram que o concreto resultante é apropriado para a confecção de elementos não estruturais (calçadas, guias, postes domésticos, muros e mourões). Descreveram que, devido à grande absorção, adicionaram uma parte de água para ser absorvida pelos agregados para, a seguir, colocar o cimento e a água restante.

Os autores atribuem a crescente resistência mecânica com a idade a fatores como a fase de hidratação do cimento e a presença dos finos da cerâmica cominuída, que, provavelmente, desenvolvem atividades pozolânicas, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Resistência à compressão com a idade dos corpos de prova, pura por imersão.



Fonte: BALDO et al., 2004.

#### 2.4.4 Atividade Pozolânica em Resíduos Cerâmicos

Levy (1997) atribuiu o aumento de resistência de argamassas com blocos cerâmicos de 2ª linha à parcela do teor de finos dos componentes cerâmicos existente na mistura, que funciona como *filler* na composição.

Amorim et al. (2000), ao estudarem resíduos da cerâmica vermelha para o desenvolvimento de materiais com atividades pozolânicas em argamassas alternativas com cais pozolânicas, concluíram que, quando finamente moídos, conferem um aumento significativo às suas propriedades mecânicas.

Dias (2004) pesquisou o uso de agregado reciclado de telha cerâmica em camadas de pavimento, sem utilização de ligantes. Investigou o possível potencial pozolânico dos materiais cerâmicos usando os métodos do ensaio Chapelle e analisando as curvas de difração de raios X. Concluiu que é possível promover a atividade pozolânica aumentando a superfície específica, através da moagem dos agregados.

Leite (2001) diz que as pozolanas artificiais são obtidas com a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos pela ação de temperaturas que variam entre 500 e 900° C. Este procedimento, que é utilizado no processo de queima dos materiais cerâmicos, ajuda a aumentar a porosidade das partículas e, assim, sua superfície ativa. A autora conclui que é justamente por isso que os materiais cerâmicos podem apresentar propriedades pozolânicas.

Avaliando a atividade pozolânica do material cerâmico presente nos Resíduos de Construção e Demolição da sua pesquisa, ele conclui, através dos ensaios de Índice de

Atividade Pozolânica com a cal (NBR 5751/1992) e com o cimento (NBR 5752/1992), que o material cerâmico apresentou atividade pozolânica.

Levy (1997) utilizou o método de Chappelle para determinar o índice de atividade pozolânica e encontrou os resultados transcritos abaixo, na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resultados do ensaio de pozolanidade pelo método de Chappelle modificado de Agregados Reciclados de RCD.**

<b>Material</b>	<b>Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)</b>
Blocos cerâmicos de 1ª linha	242
Blocos cerâmicos de 1ª linha (passante em # 50)	224
Blocos cerâmicos de 2ª linha (passante em # 50)	454
Tijolos maciços (passante em # 50)	565

Fonte: LEVY, 1997.

Conforme os resultados, o autor concluiu que as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas, os tijolos e blocos cerâmicos de 2ª linha representam os materiais cerâmicos com maior grau de pozolanidade.

## 2.5 CASCA DE ARROZ (CA)

A Casca do Arroz (CA), um dos mais abundantes resíduos agroindustriais, é um material fibroso constituído principalmente de celulose (50%), lignina (30%) e resíduo orgânico (20%), possuindo elevado volume e baixa densidade (BEZERRA, 2010).

A CA é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. Acredita-se que a sílica da CA exista na forma opalina (a opala é uma fase hidroamorfa da sílica). Houston (1972), citado por Dafico (2003), conclui que a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido monossílico, o qual se concentra na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se polimeriza para formar a membrana sílico-celulósica.

### 2.5.1 Produção Mundial/Nacional de Arroz em Casca

A estimativa da produção mundial de arroz em 2011/2012, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), será de 457,86 milhões de toneladas. Tendo à frente a China, os países asiáticos lideram a produção mundial desse importante cereal para a alimentação da população mundial.

O Brasil está entre os dez maiores produtores mundiais, com uma produção estimada para a safra de 2011/2012 de 12,71 milhões de toneladas. No país, o Rio Grande do Sul, com uma safra estimada em 8.283 milhões, ocupa a condição de líder na produção nacional, seguido pelo Estado de Santa Catarina, com uma produção estimada em 1.063 milhões de toneladas. Mato Grosso ocupa a terceira colocação, com uma produção estimada, para a safra de 2011/2012, em 706,5 mil toneladas do cereal (Tabela 8).

**Tabela 8 – Produção de arroz em casca/produção CCA safra 2011/2012.**

<b>Produção</b>	<b>Arroz</b>	<b>CCA-4% arroz em casca</b>
Mundial	457,86 milhões de toneladas	18,314 milhões de toneladas
Brasil	12,71 milhões de toneladas	508,40 mil toneladas
Rio Grande do Sul	8,283 milhões de toneladas	331,320 mil toneladas
Santa Catarina	1.063 milhões de toneladas	42,452 mil toneladas
Mato Grosso	706,5 mil toneladas	28,260 mil toneladas

Fonte: USDA e CONAB, 2011.

### 2.5.2 Uso da Casca de Arroz (CA)

Martinez (2005) pesquisou a CA na confecção de painéis de fechamento verticais para paredes em substituição aos tijolos tradicionais. Souza (2008) verificou a viabilidade de sua utilização em argamassas como substituta de parte do agregado miúdo (areia), com o objetivo de melhorias quanto às propriedades físicas e mecânicas. Ambos concluíram que os produtos pesquisados são viáveis.

Houston (1972) e Govindarao (1980), citados por Pouey (2006), relacionam em seus trabalhos várias aplicabilidades do uso da CA, por exemplo:

- a) *Na agropecuária* – É empregada como cama na criação de animais confinados (avicultura, pecuária, suinocultura). Depois de incorporados os nutrientes provenientes dos dejetos dos animais, a CA é usada para adubação;
- b) *Na construção civil* – Associada à argila, pode ser empregada na fabricação de tijolos, painéis e telhas, com bom isolamento de calor; também é adicionada ao concreto, para a obtenção de concreto de baixa densidade, principalmente em peças pré-moldadas;
- c) *Na geração de energia* – Devido ao seu alto poder calorífico, a CA surgiu, naturalmente, como combustível alternativo dentro das próprias indústrias de beneficiamento de arroz para o processo de parboilização do grão. Pouey (2006) relata que, com o objetivo de gerar energia a partir de fontes renováveis, foram construídas duas usinas termoelétricas no Estado do Rio Grande do Sul: UTE Dom Pedrito (6MW) e UTE Capão do Leão (8 MW), ambas utilizando a CA como combustível.

Segundo Hoffmann et al. (2002), a geração de energia através da CA é uma alternativa praticável do ponto de vista tecnológico, viável do ponto de vista econômico e ético do ponto de vista ecológico, uma vez que existe tecnologia para a conversão, a matéria-prima é abundante e todo o CO<sub>2</sub> produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera da Terra.

### 2.5.3 Composição Química e o Potencial Energético da Casca de Arroz

A composição química média em base anidra da casca de arroz corresponde, aproximadamente, a 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. A celulose e lignina podem ser removidas por combustão controlada, deixando para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa, de altíssima superfície específica (MEHTA e PITT, 1977, apud DAFICO, 2003).

A CA equivale a cerca de 20% do peso do grão. Amick (1982), Govindarao (1980) e Houston (1972), citados por Pouey (2006), afirmam que a variação do percentual de sílica na CA depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo. Houston (1972), citado por Dafico (2003), após analisar quimicamente a cinza da CA proveniente de várias regiões do mundo, mostram que o conteúdo de sílica varia de 90 a 95%. Os álcalis K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O ocorrem como as principais impurezas.

Segundo o Balanço Energético Nacional, COMPET-PETROBRÁS/1999, o valor calórico do petróleo é de 10.000 Kcal/kg, enquanto que a biomassa de base seca apresenta um valor calórico de 4.000 Kcal/kg. Dentre os principais combustíveis que são utilizados para a produção de energia, a CA apresenta um Poder Calorífico Inferior (PDI) de 3.300Kcal/kg, o que representa 33% da capacidade térmica do petróleo. Na Tabela 9, estão alguns combustíveis usados na produção de energia e o Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada um.

**Tabela 9 – Valores de PCI de alguns combustíveis usados na produção de energia.**

<b>Combustível</b>	<b>PCI</b>	<b>Combustível</b>	<b>PCI</b>
Gás GLP (50%)	11.025 kcal/kg	Carvão mineral Cambuí-PR	6.200 kcal/kg
Gás natural	9.065 kcal/Nm <sup>3</sup>	Álcool de cana	5.500 kcal/l
Óleo diesel	8.620 kcal/l	Casca de coco	4.000 kcal/kg
Querosene	8.300 kcal/l	Bagaço de cana (12% de água)	3.200 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Casca de arroz	3.300 kcal/kg

Fonte: Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>>.

O uso da CA para a geração de energia nas usinas termoelétrica ou beneficiadoras de arroz, para a geração de calor na secagem dos grãos nos processos de parboilização, não vem acompanhado da preocupação com a qualidade e as potencialidades do resíduo resultante, que é a Cinza da Casca de Arroz (CCA), um material muito rico em sílica.

A queima da CA produz uma quantidade expressiva de CCA. Nenhum outro resíduo agrícola produz tanta quantidade de cinza quando queimado. Na Tabela 10, são listados alguns cereais e o volume de cinza resultante quando queimados.

**Tabela 10 – Quantidade de cinza gerada por resíduo.**

<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 talos	11
Trigo	Folhas	10

Fonte: MEHTA, 1992.

A CCA apresenta características pozolânicas, ou seja, isoladamente, a CCA não tem valor aglomerante, mas, quando finamente moída e em presença de água, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e forma compostos cimentantes (DAFICO, 2003).

## 2.6 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

A CCA é o resíduo resultante da queima da CA, que pode ser obtida por processos de queima que se classificam como sistema artesanal, semi-industrializado e industrializado. No processo artesanal, a CA é queimada sem controle de temperatura em grelhas dispostas paralelamente; no processo semi-industrializado, o ar é injetado através de dutos metálicos para o interior de um cilindro onde a CA cai e é incinerada; e, no processo industrializado, ou seja, na forma automatizada, não existe controle de temperatura de queima, mas da pressão de vapor gerada em função da queima (DELLA, 2001, apud FERREIRA, 2005).

Tanto a CA como a cinza gerada pela sua calcinação são classificadas pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) como resíduos agrossilvopastoris. Autores, como Hoffmann et al. (2002), argumentam que o farelo e o germe do arroz em casca já são comercializados mundialmente; que a CA já é utilizada como combustível e, se houvesse um processo controlado e eficiente da sua queima, geraria uma cinza de excelente qualidade pelas suas

propriedades pozolânicas, o que agregaria valor comercial ao cereal, completando o ciclo da industrialização do arroz, demonstrando que a produção industrial ideal é a que gera resíduo zero.

### **2.6.1 Usos da CCA**

Hoffmann et al. (2002) listaram algumas potencialidades de uso da CCA, através de informações provenientes de pesquisas feitas com esse resíduo:

#### **a) Adsorvente**

As mineradoras de ouro utilizam vários produtos como adsorventes, para promover a pré-concentração de soluções de ouro de baixa concentração. Desenvolveram um adsorvente a partir da CCA, que, segundo estudos, não tem o mesmo poder de adsorção do carbono ativado, no entanto o ouro adsorvido pode ser removido com mais facilidade da CCA. A pesquisa concluiu que a melhor CCA para ser usada como adsorvente é aquela queimada a 300° C.

#### **b) Obtenção de Diferentes Tipos de Silicato**

Segundo Chandrasekhar (2003), a sílica e a sílica gel (provenientes da CCA) têm sido usadas para a preparação de glicolatos reativos e silicatos de catecolatos, por serem fontes acessíveis e baratas de silício. Ferreira (2005) conseguiu desenvolver um processo de obtenção de filme polimérico a partir da CCA.

#### **c) Utilização da Cinza como Carga em Composto de Borracha Natural**

A CCA pode ser utilizada como carga em compostos de borracha natural como, por exemplo, misturas de borracha natural com polietileno de baixa densidade e borracha natural epoxidada (ISMAIL, 1999). Segundo Hoffmann et al. (2002), a cinza é usada em substituição a outros materiais para promover melhores propriedades mecânicas como propriedade de tensão, dureza, alongação, bem como acréscimo de massa fornecendo, assim, um composto de borracha de melhor desempenho.

#### **d) Produção de Sílica Pura**

Foletto et al. (2005), descrevendo aplicabilidades da CCA, afirmam que a sílica é uma combinação de silício e oxigênio na forma  $\text{SiO}_2$  e que a CCA pode conter até 15% em peso de carbono. Se o aquecimento for promovido com a finalidade de eliminar este carbono residual, pode-se obter, aproximadamente, 95% de sílica pura com uma área superficial específica de

10m<sup>2</sup>/g e partículas com tamanho em torno 20 µm gerando, assim, um produto de maior valor agregado.

### e) Produção de Cimento e Uso em Concreto

Foletto et al. (2005) citam, ainda, o uso da CCA como fonte de sílica no cimento, pois diminui a resistência à compressão, aumenta a durabilidade do concreto e reduz a porosidade, o que é extremamente importante em muitas aplicações, tais como canais de irrigação, concretos resistentes à poluição e às intempéries, pisos resistentes à abrasão, etc. Segundo esses autores, várias pesquisas mostram que o cimento pode ser produzido a partir de CCA com sucesso, devido ao seu baixo custo em substituição à areia.

No breve resumo sobre a aplicabilidade da CCA, percebe-se que ela contém alto teor de sílica (> 92%), o que a torna um resíduo valorizado. No entanto, essa CCA só terá alto valor econômico se tiver alta qualidade, que é mensurada pela alta superfície específica, tamanho e pureza de partícula. A seguir, faz-se uma breve revisão sobre as pozolanas.

## 2.7 MATERIAIS POZOLÂNICOS

O termo *pozolana* remete às cinzas vulcânicas encontradas próximo ao Monte Pozzuoli, na Itália. Passou a ser usado de forma mais abrangente com a descoberta de novos materiais naturais que, ao reagir com a cal, apresentavam propriedades cimentícias. Anteriormente à descoberta do cimento Portland, no século XIX, misturas de cal e pozolanas eram os materiais empregados na construção de estruturas, em todo o mundo (TASHIMA, 2006).

Segundo Cincotto (1988), apud Tashima (2006), o termo *pozolana* é empregado para todos os materiais, sejam eles naturais ou artificiais, que apresentam características semelhantes à cinza vulcânica encontrada na Itália; aí, estão incluídas as cinzas oriundas de resíduos agroindustriais, como a cinza volante, a sílica ativa e a CCA.

### 2.7.1 Definição

A NBR 12653/1992 (ABNT, 1992) define *pozolana* como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividida e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

No Brasil, segundo Cordeiro (2009), as pozolanas são muito utilizadas na produção do cimento em substituição a uma parte do clínquer, gerando os chamados cimentos com adições

e/ou cimentos pozolânicos. São também usadas em substituição a uma parte do cimento na produção de concreto e argamassas. A substituição do clínquer na produção do cimento, ou deste na produção de concretos e argamassas por pozolanas, reverte-se em grande ganho ambiental, tendo em vista a diminuição da demanda por cimento e, conseqüentemente, da exploração das jazidas de onde são retirados o calcário e a argila (TASHIMA, 2006).

### 2.7.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos (NBR 12653/1992)

A NBR 12653/1992 (ABNT, 1992) classifica os materiais pozolânicos baseada na origem dos materiais, em três grupos (Tabela 11), suscitando críticas de muitos pesquisadores acerca das razões de não se mencionarem as pozolanas altamente reativas, como a sílica ativa, metacaulim e a CCA (TASHIMA, 2006).

**Tabela 11 – Exigência da NBR 12653/1992.**

RECOMENDAÇÃO	Classe N	Classe C	Classe E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	70	50
$\text{SO}_3$ (% Max.)	4	5	5
Teor de umidade (% máx.)	3	3	3
Perda ao fogo (% máx.)	10	6	6
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$ (% máx.)	1,5	1,5	1,5

Classe N: Pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas); Classe C: cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão; Classe E: os que não se enquadram nas Classes N ou C. Fonte: ABNT, 1992.

Gava (1999) também faz restrições à Norma, pois a mesma estabelece alguns requisitos mínimos no que se refere às características físicas e químicas das pozolanas, tais como: perda ao fogo máxima de 6% para as classes C e E e, 10% para a classe N; outra exigência é que a soma, de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , seja no mínimo de 70%. A crítica em relação a esta exigência, segundo a autora, é pelo fato de que a soma de 70% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  pode até existir, porém, se esses elementos estiverem na forma cristalina as atividades pozolânicas ficam prejudicadas, ou mesmo não existirem. No que se refere à origem as pozolanas, classificam-se em naturais e artificiais.

#### 2.7.2.1 Pozolanas Naturais

Pozolanas naturais são materiais derivados de rochas ou minerais vulcânicos que, depois de passados por processos de britagem, moagem e classificação, são ativados

termicamente, para a retirada de impurezas que diminuem a atividade pozolânica. Exemplos desses materiais são os tufos vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

As pozolanas naturais passam por um processo de grande aquecimento, seguido de um resfriamento abrupto que lhes confere um elevado caráter vítreo ou amorfo, como é o caso do magma que, após ações eruptivas violentas, é lançado na atmosfera, sofrendo um resfriamento rápido. A composição química destas pozolanas é bastante variável, ainda que consistam basicamente de sílica, alumínio e óxido de ferro (TASHIMA, 2006).

#### **2.7.2.2. Pozolanas Artificiais**

Vários autores definem pozolanas artificiais como resíduos ou subprodutos agroindustriais de várias origens e possuindo diversas características, possuindo em comum a atividade pozolânica. Segundo Calmon (2007), a distinção entre um produto nobre e subprodutos/resíduos industriais e agrícolas é muito tênue. O autor ilustra essa afirmação dando o exemplo do, outrora, resíduo da indústria do ferro-silício (sílica ativa). Hoje, sua vasta aplicação como adição ao cimento transformaram-no em produto nobre, com alto valor agregado.

Na construção civil, as pozolanas artificiais mais empregadas são: as cinzas volantes, procedentes das usinas termoelétricas; as escórias de alto forno; e a sílica ativa, resíduo oriundo da siderurgia do silício metálico e ligas à base de silício. Existem, porém, inúmeras aplicações de outros resíduos, tais como: bagaço da cana-de-açúcar e Cinza de Casca de Arroz.

#### **2.7.3 Comportamento das Pozolanas em Matrizes de Cimento Portland**

A sílica ativa age em concretos e argamassas de duas formas: uma delas é quimicamente através da reação pozolânica, ou seja, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar os resistentes silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), favorecendo a resistência da pasta do cimento. A outra forma é fisicamente através do chamado efeito “filler”, ou seja, de acordo com as dimensões de suas partículas, preenchendo os vazios da estrutura, contribuindo para a melhoria da coesão e a compacidade do concreto fresco e também refinando a estrutura de poros do material, agindo como ponto de nucleação dos compostos de hidratação do cimento (BEZERRA, 2010).

Segundo a autora, as sílicas ativas agem quimicamente no processo de hidratação, de acordo com a disponibilidade do hidróxido de cálcio. A sílica deixa de reagir quimicamente

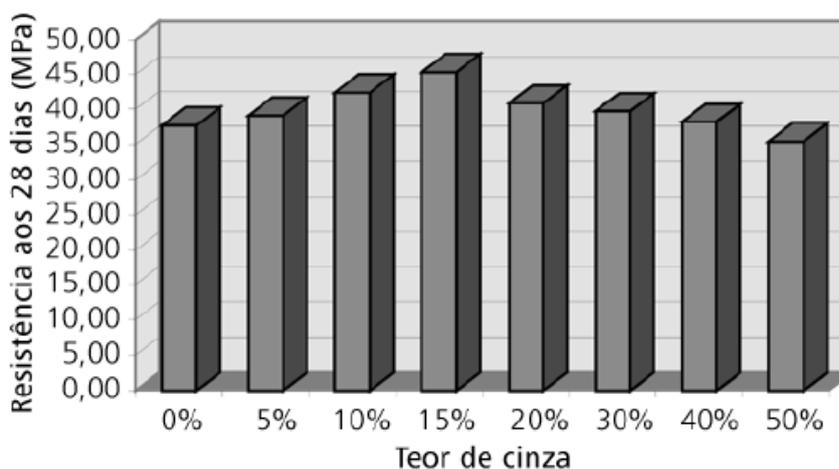
de maneira significativa como um aglomerante, depois de certo tempo, e o restante da sílica passa a atuar como um *filler* inerte (ação física).

Este fenômeno acontece porque os finos preenchem os vazios entre as partículas maiores (efeito de empacotamento) e, como consequência, reduzem o tamanho dos vazios pela segmentação dos poros maiores na pasta, com a porosidade aumentando a durabilidade do concreto (BEZERRA, 2010).

Segundo Santos (2006), o cimento Portland comum, em determinados aspectos, apresenta deficiências, ou insuficiências, para atender necessidades específicas da construção civil, especialmente sob o aspecto da durabilidade. A autora ilustra essa afirmação relatando os efeitos da adição de pozolanas em concretos usados em meios agressivos, como obras marítimas e barragens. Informa ainda que, nas últimas décadas, a Cinza da Casca de Arroz (CCA) vem merecendo atenção especial por parte dos pesquisadores. Segundo ela, muitos autores chegaram à conclusão de que a reatividade da CCA é similar ou até superior à da sílica ativa, chegando a ser chamada de *superpozolana* (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Prudêncio Jr. et al. (2003), estudando argamassas com diferentes teores de CCA, observaram que o melhor desempenho nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias foi verificado com 15% de substituição parcial de cimento por CCA (Figura 6). Verificou-se também que, com 40% de substituição do cimento por cinza, obteve-se o equivalente à apresentada pela argamassa sem cinza, que foi de 37,68 MPa. Nesse estudo, a argamassa de referência possuía um traço de 1:3:0,52 (cimento: areia: água). As substituições do cimento foram feitas em volume e o traço foi ajustado para manter-se a mesma relação entre água e aglomerante em volume, sem alteração da consistência (flor de  $220 \pm 10$  mm).

Figura 6 – Resistências de argamassas com vários teores de CCA.



Fonte: SANTOS, 2006.

De acordo com Santos (2006), para a CCA adquirir a condição de *superpozolana*, deve-se atentar para o teor do material empregado, características de dosagem e propriedades como alto teor de sílica amorfa, superfície específica elevada e diâmetro médio das partículas bastante reduzido, fatores que lhe conferem atributos importantes para o uso como adição na produção de concretos.

#### **2.7.4 Métodos para a Determinação da Atividade Pozolânica**

Cordeiro (2009) relata que a variedade de métodos de ensaios existentes para quantificar atividades pozolânicas de um material demonstra a grande dificuldade que o meio acadêmico tem de encontrar uma metodologia que sirva para todos os tipos de pozolanas. Nesse sentido, segundo a autora, essa avaliação deve ocorrer de forma ampla considerando as características químicas, morfológicas e físicas do material e a resistência mecânica dos produtos de reação da pozolana com a cal e com o cimento. Ela cita os seguintes ensaios:

##### **2.7.4.1 Método de Luxan**

Este método consiste em medir a pozolanicidade através da variação da condutividade de uma solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , antes e depois de 2 minutos da pozolana ser adicionada e misturada de forma contínua na solução a  $40^\circ\text{C}$  (5 g de pozolana para 200 ml de solução).

##### **2.7.4.2 Método de Chapelle**

Esse método permite caracterizar uma pozolana pela taxa de reação com a cal em um tempo padronizado, geralmente 16 horas, por um processo acelerado de elevação de temperatura. A proposta do método é que a pozolanicidade de um material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana, através da comparação de uma mistura de pozolana com óxido de cálcio, e outra sem pozolana.

##### **2.7.4.3 Método do IAP com a cal (NBR 5751/1992)**

Trata-se de um método físico para determinar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal (NBR 5751/1992) (ABNT, 1992). Pode ser realizado misturando-se o material fino (material pozolânico) com a cal (hidróxido de cálcio) numa argamassa composta com nove partes em massa de areia normal do IPT, uma parte em massa de hidróxido de cálcio puro,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e duas partes do material pozolânico correspondente ao dobro do volume da cal utilizada.

A NBR 12653/1992, que especifica as exigências químicas e físicas para que um material seja considerado uma pozolana, estabelece que o índice de atividade pozolânica de um material com a cal, aos 7 dias, deve ser igual ou superior a 6 MPa.

#### **2.7.4.4 Método do IAP com o cimento (NBR 5752/1992)**

Trata-se de um método físico para determinar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com o cimento (NBR 5752/1992) (ABNT, 1992). Esse método consiste em moldar corpos de prova (50 mm x 100 mm) com dois tipos de argamassa, a primeira contendo apenas cimento Portland com areia padrão, segundo a NBR 7214/2012 (ABNT, 2012), extraída do rio Tietê e comercializada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), de onde já vem separada em frações granulométricas; a outra argamassa com 35% do volume absoluto de cimento substituído por material pozolânico, passante na peneira 45 µm (nº 325). São moldados três corpos de prova de cada argamassa, conforme exigência da norma. Após a moldagem, os corpos de prova são colocados na câmara úmida ainda nos moldes com as faces expostas ao ar úmido, por 24 horas. Após essa fase, são desmoldados e armazenados em recipientes hermeticamente fechados e estanques, durante 27 dias.

Decorrido esse período, são retirados do recipiente e submetidos a ensaios de resistência à compressão. Os resultados são comparados com a NBR 12653/1992 (ABNT, 1992), que estabelece os índices de pozolanicidade. Existem críticas de pesquisadores em relação às exigências desta norma.

Gava (1999) tece uma crítica no que se refere à exigência de caráter físico em relação à determinação do índice de atividade pozolânica com cimento, cujo valor esta Norma estabelece o mínimo (aos 28 dias) de 75%; com a cal, o valor mínimo é de 6 MPa. A outra exigência é em relação à água requerida para a mistura, sendo que o máximo aceito para as pozolanas da Classe N é de 115% e, para as Classes C e E, de 110%.

Segundo a autora, a fixação da trabalhabilidade faz com que a demanda por água para pozolanas muito finas seja elevada, fazendo com que a resistência das argamassas com pozolanas seja diminuída, quando comparadas com a argamassa padrão.

Cordeiro (2009), citando Weber (2001), também faz críticas ao método de determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento, pois os resultados podem ser facilmente influenciados por fatores externos como, por exemplo, a composição do cimento usado e a variação da relação água/aglomerante.

Para ilustrar a crítica que faz à NBR 12653/1992 (ABNT, 1992), Tashima (2006) cita o trabalho de Silva (2004), que encontrou um valor de 60,7% de índice de atividade

pozolânica com o cimento para sua CCA, não alcançando as exigências da Norma, no entanto, quando observou os resultados de resistência à compressão, verificou ganhos de 24% para concretos e de 28% para argamassas.

## 2.8 PROCESSAMENTO DA CCA

Dafico (2001), fazendo uma retrospectiva do uso da CCA como material pozolânico, estabeleceu a década de 1970, principalmente na Índia e nos EUA, como marco em que se desencadearam pesquisas com esse material, mas conclui que foi a partir do desenvolvimento do Concreto de Alto Desempenho (CAD), na década de 1980, que as pesquisas se intensificaram. Conforme o autor, a norma americana ASTM C989 classifica a CCA, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade, juntamente com a sílica ativa.

A busca por um processo produtivo que gerasse um material de alta reatividade pode ter sido, segundo Santos (2006), o fator responsável pelo fato de a CCA não ter entrado no mercado como pozolana. Focadas apenas nas propriedades pozolânicas, refletidas em parâmetros como a cristalinidade e superfície específica do material, as pesquisas colocaram de lado o fator comercial, que vê no aspecto da cor escura da CCA um elemento depreciador desse material.

A CCA contém carbono e, por essa razão, tende a ser preta, mas, segundo Dafico (2006), pode ser também cinza, púrpura ou branca, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. Segundo ele, há muitas pesquisas que buscam produzir CCA de cor clara e, mesmo assim, continuam tendo boa reatividade. Portanto, alguns fatores são necessários para a obtenção dessa *superpozolana*: efeitos das temperaturas de queima e moagem.

### 2.8.1 Efeitos das Temperaturas de Queima nas Características da CCA

A queima da casca de arroz usualmente praticada ou é para a obtenção de calor no processo de parboilização do grão pelas beneficiadoras de arroz, ou para a geração de energia nas usinas termoelétricas, ou mesmo para a diminuição do excessivo volume de CA nos pátios das pequenas indústrias que refinam o cereal.

Portanto, na maioria das vezes, não há, por parte dessas indústrias, preocupações com a qualidade da CCA gerada após o processo de calcinação. A queima da CA, executada com controle de temperatura – tempo de residência das CCA nos fornos visando à produção de cinzas com baixo teor de carbono (cinza clara) e alta reatividade (sílica amorfa) – só ocorre,

atualmente, em processos de investigação científica nos quais se buscam as potencialidades pozolânicas das CCA.

O aumento da temperatura de queima promove as transformações de fases da sílica contida na CCA, influenciando diretamente na quantidade da sílica reativa (HANAFI et al., 1980, apud CORDEIRO, 2009). Ao comparar o forno comum àquele de tipo leito fluidizado, os pesquisadores concluíram que este último leva vantagem, pois em seu interior inexistem diferenças de gradientes, coisa que ocorre no forno comum (ibid.).

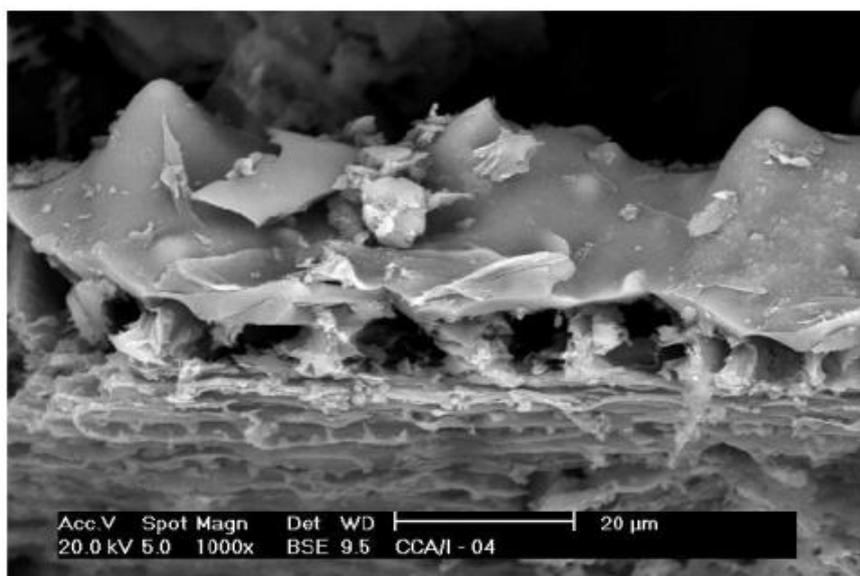
O contato bastante efetivo entre a CA e o ar propicia rendimentos de combustão extremamente elevados, cinzas com teores de carbono quase nulos, granulometria fina e, principalmente, forma estruturalmente constante (ibid.).

Conforme Santos (2006), a reatividade do material vai depender da formação durante o processo de queima, em função de diferentes temperaturas, de proporções relativas de sílica na forma cristalina ou amorfa; quanto maior esta última, maior a reatividade.

Ernst (1971), citado por Dafico (2001), descreve as fases polimórficas da sílica cristalina na pressão atmosférica: quartzo  $\alpha$ , quartzo  $\beta$ , tridimita e cristobalita. A forma mais estável, em temperatura ambiente, é o quartzo  $\alpha$ , que se transforma em quartzo  $\beta$  a 573° C e assim permanece até a temperatura de 870° C. Entre essa temperatura e 1.470° C, permanece como tridimita e, daí até 1.713° C, como cristobalita. Acima de 1.713° C, ocorre a fusão da sílica.

Dafico (2001), na busca por métodos para a produção de CCA para Concreto de Alto Desempenho (CAD), ilustrou, através de uma micrografia, a seção transversal de uma partícula de CCA produzida em laboratório, em combustão controlada e com extremo cuidado no manuseio para se preservar a estrutura silicosa da casca (Figura 7). Na parte superior da Figura, uma epiderme corrugada e densa é claramente visível. Segue-se, logo abaixo, uma estrutura em tubo e depois o parênquima, estrutura celular com paredes muito finas.

Figura 7 – Micrografia Eletrônica de Varredura da Cinza da Casca de Arroz.



Fonte: DAFICO, 2001.

Vários autores estudaram a questão da influência das condições de temperatura e tempo de residência no processo de combustão da CCA. A Tabela 12 foi compilada a partir de pesquisadores citados por Cordeiro (2009), que trataram desse assunto.

**Tabela 12 – Pesquisas Abordando a Temperatura da Queima da Casca de Arroz para a Obtenção de Sílica Amorfa.**

Autores	Conclusão sobre a temperatura de queima da casca de arroz para a obtenção de sílica amorfa
Bartha e Huppertz (1974)	A cristalização ocorre em torno dos 725° C.
Hamad e Khattab (1981)	Temperatura de queima entre 500 e 600° C; 800° C detectou cristobalita; 1.150° C detectou cristobalita e tridimita.
Smith (1984)	Temperatura de queima até 700° C (queima entre 3 e 5 horas).
Al-Khalaf e Yousift (1984)	Temperatura de queima até 500° C, por 2 horas.
Dass (1984)	Temperatura de queima até 700° C. A partir de 1.100° C, pozolanicidade perdida.
Boateng e Skeete (1990)	Temperatura de queima entre 800 e 900° C.
Sugita et al. (1992)	Temperatura de queima entre 400 e 660° C.

Fonte: CORDEIRO (2009).

Conforme se depreende da Tabela 12, no meio científico, não há um consenso a respeito da temperatura ideal para a obtenção da sílica no estado amorfo. Há, no entanto, a temperatura média, em torno de 700° C. A questão esbarra nas condições de queima (tipo de

forno, tempo de permanência, taxa de aquecimento, etc.). Por isso, muitos pesquisadores desenvolveram métodos de queima visando produzir CCA em escala comercial.

Na revisão bibliográfica para sua tese, Santos (2006) constatou que possivelmente os pioneiros na tentativa de obtenção da CCA de cor clara foram Tutsek e Bartha (1977), que relataram que a condicionante para a produção de CCA com baixo teor de carbono e alta reatividade é a taxa de aquecimento da CA antes do processo de combustão propriamente dita. Os autores relatam que, para a gaseificação, é preciso aquecer o material numa taxa de 10 a 40° C por minuto.

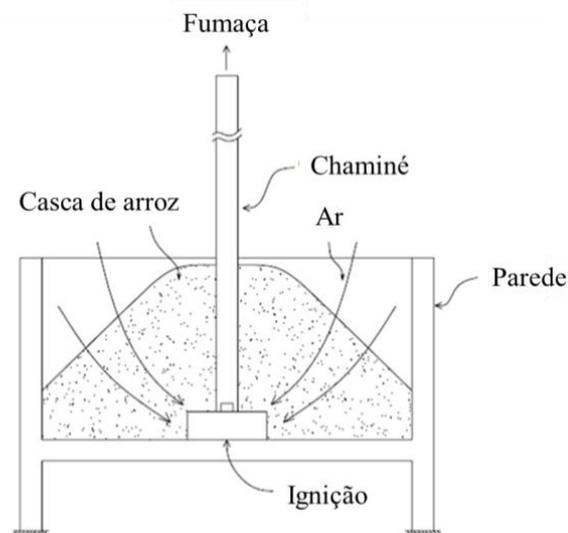
Nesse procedimento, em forno elétrico, relatam que a dificuldade encontrada se dá pelo fato de que as resistências do forno, para atenderem todo o seu volume interior, aquecem mais que a taxa exigida no processo para a gaseificação. Dessa forma, pode ocorrer que existam regiões do interior do forno com temperaturas mais elevadas, o que desencadeia a combustão da casca antes do momento, levando à cristalização do material e diminuindo a sua reatividade.

Yamamoto e Lakho (1982), citados por Santos (2006), fizeram vários ensaios, em mufla, com diferentes temperaturas e tempos de exposição com e sem suprimentos de ar, concluindo que as melhores cinzas foram as produzidas em temperaturas mais baixas, recebendo suprimentos de ar constante durante a queima e cujo resfriamento à temperatura ambiente tenha se dado instantaneamente após a queima.

Com isso, esses autores obtiveram CCA de cor clara e apenas uma fina camada de cor escura na parte de baixo. Posteriormente, foram separadas e as CCA de cor clara apresentaram maior reatividade que a escura. Depois, realizaram outros ensaios nas mesmas condições, porém sem o suprimento de ar e as CCA resultantes foram de cor escura, ou seja, com alto teor de carbono.

Sugita (1992), visando obter cinza de cor clara de alta reatividade, propôs o método da queima de uma pilha de CA, no meio da qual instalou uma chaminé para possibilitar a circulação de ar dentro dela, concluindo que, com isso, há certo controle sobre a temperatura de queima (Figura 8).

Figura 8 – Diagrama esquemático patenteado por Sugita (1992).



Fonte: SUGITA, 1992.

No mesmo estudo, o autor propôs uma outra maneira de queima, chamada “método de queima em dois passos”, realizada num forno contínuo semi-industrial. Na primeira etapa, ocorre a incineração, entre 300 e 350° C, para a retirada de toda a água e da matéria orgânica presente. Na segunda etapa, eleva-se a temperatura até 600° C para que a combustão se complete. O autor relata que, com isso, produziu CCA de alta reatividade e na cor clara. Para que a CCA tenha elevada reatividade, são necessários uma elevada superfície específica e baixo teor de carbono (SANTOS, 2006). Nesse sentido, a autora cita pesquisas de Maeda et al. (2001) sobre um forno em que a casca entra por meio de um alimentador helicoidal (rosca sem fim), cai sobre um leito e é remexida continuamente por um agitador, que confere ao sistema continuidade de ar. A carga da alimentação determina a superfície específica do material obtido.

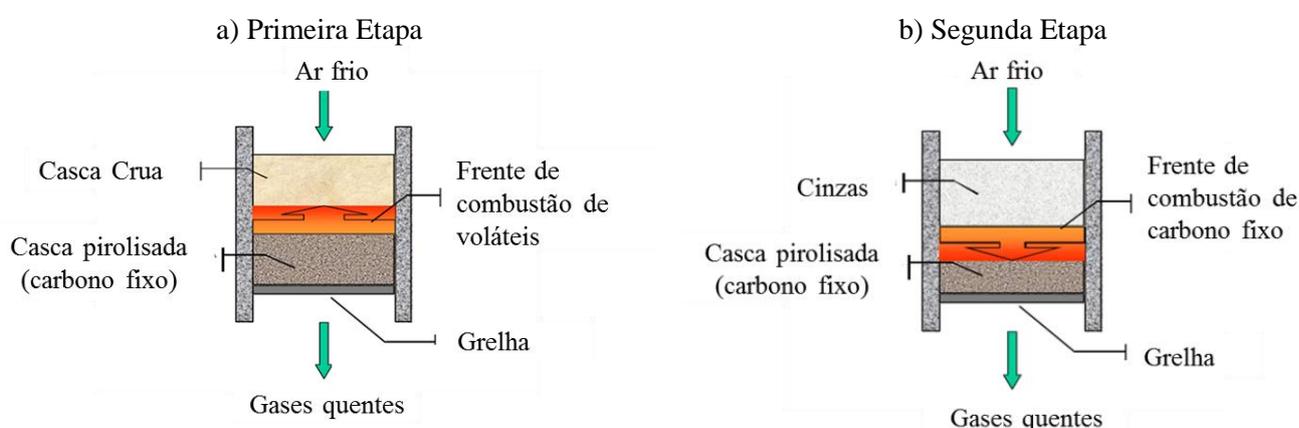
Os autores concluíram que, com 14 kg/h, a superfície específica do material foi de 100 m<sup>2</sup>/g; com a redução da carga para 11 kg, a superfície específica subiu para 150 m<sup>2</sup>/g. Outra conclusão é de que a temperatura influencia na superfície específica da CCA. Com temperaturas entre 400 e 500° C, a superfície fica em torno de 100m<sup>2</sup>/g e, à medida que é elevada para 700° C, essa superfície diminui para 50 m<sup>2</sup>/g.

Em sua tese de doutorado, Dafico (2001) projetou e construiu uma fornalha protótipo de leito fixo para a combustão de CA. Para o controle das temperaturas dentro do forno, ele utilizou válvulas de fluxo que regulavam o ar injetado, monitorado através de medidores tipo rotâmetro. O autor dividiu a combustão em duas etapas distintas e separadas no tempo. Na primeira, a combustão eliminou os materiais altamente combustíveis na presença de pouco

oxigênio. Na segunda, com a injeção abundante de ar, eliminou o carbono fixo. Essa estratégia teve o objetivo de evitar os elevados níveis de temperatura que ocorrem em uma combustão normal, quando se permite que os compostos altamente combustíveis, volatilizados na primeira fase da pirólise, entrem em combustão muito próximos do centro das partículas de sua origem, provocando com isso a fusão da sílica seguida de sua cristalização.

A Figura 9 ilustra as duas etapas de calcinação que, segundo o pesquisador, possibilitou a produção de CCA praticamente livre de carbono, por isso branca, e com altíssima superfície específica.

Figura 9 – Fornalha para a combustão de CCA em duas etapas.



Fonte: DAFICO, 2001.

### 2.8.2 Efeitos da Moagem nas Características da CCA

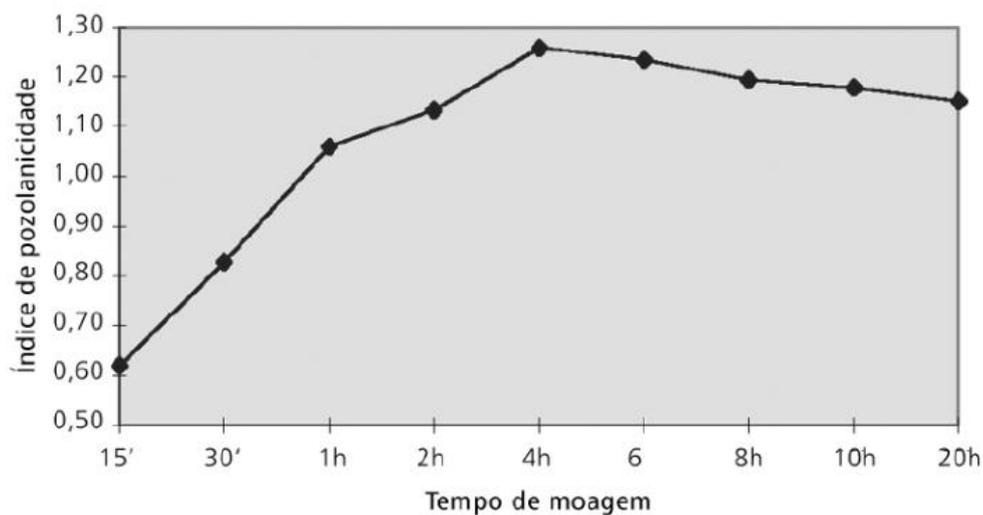
A moagem consiste na fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elementos que provocam deformação das partículas a ponto de conferir compacidade à mistura. Ela pode ser realizada de modo seco ou úmido, dependendo do material a ser moído e do processo subsequente (CORDEIRO, 2009).

Segundo a autora, existem diversos equipamentos que podem ser utilizados para a cominuição das partículas de CCA, dentre os quais estão o moinho de bolas horizontal e vertical, o moinho de disco, o agitador, o planetário e o micronizador. Torna-se necessário um peneiramento para eliminar todo e qualquer resíduo ou mesmo o material que não tenha sido bem queimado.

Prudêncio Jr. et al. (2003) relataram que a pozolanicidade aumenta à medida que se aumenta o tempo de moagem. Em moagens prolongadas, esse efeito não é mantido (Figura

10). Isso se dá em função da dificuldade de se dispersarem as partículas muito finas nas argamassas.

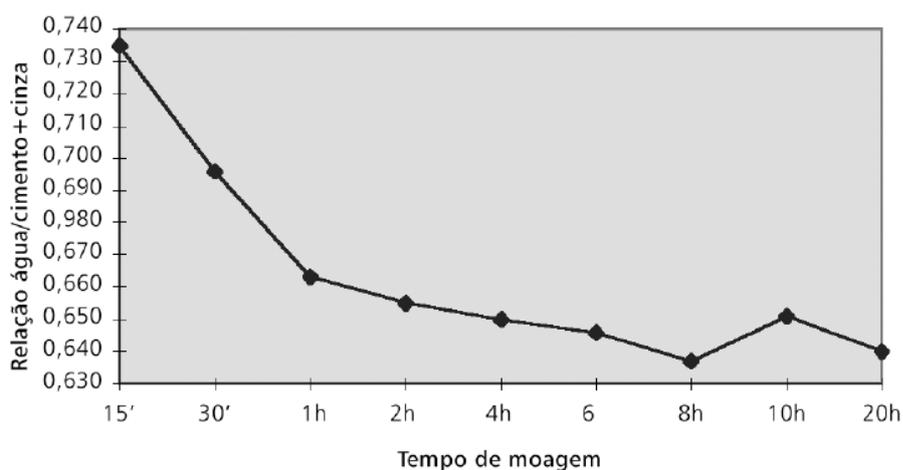
Figura 10 – Variação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com o tempo de moagem.



Fonte: SANTOS, 1997.

Prudêncio Jr. et al. (2003) constataram também a diminuição da demanda de água das argamassas com o aumento do grau de moagem, atribuída à destruição progressiva da estrutura esponjosa da cinza (Figura 11).

Figura 11 – Demanda de água no ensaio de Pozolanicidade.



Fonte: SANTOS, 1997.

Na sua pesquisa, Bezerra (2010) utilizou CCA residual sem controle de queima de temperatura, obtida junto a uma beneficiadora de arroz da região de Caicó-RN, justificando pela opção de utilizar um material de fácil acesso e que tivesse menor consumo energético

para a sua preparação. Entretanto, o único beneficiamento foi o de passar a CCA por um processo de moagem durante 2 horas, visando diminuir as partículas.

Cordeiro (2009) relata que o tempo de moagem leva a diferentes superfícies específicas e que estas influenciam de forma significativa na pozolanicidade do material. Conclui ainda que, ao extrapolar um tempo ótimo para a moagem, pode-se acarretar a dispersão da pozolana na mistura, prejudicando o resultado final.

Farias e Recena (1990), citados por Cordeiro (2009), concluíram que o aumento da finura da CCA melhora a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa.

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são abordados o programa experimental, os materiais e os métodos utilizados para a confecção de tijolos para alvenaria, resultantes da prensagem de mistura homogênea de Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC), cimento Portland, Cinza da Casca de Arroz (CCA) e água.

Os procedimentos para atingir estes objetivos foram desenvolvidos nos Laboratório do Departamento de Área de Construção Civil (DACC) do IFMT – Campus Cuiabá. Ensaios realizados em outros locais estão referidos no texto. As etapas desta pesquisa estão resumidas na Tabela 13.

**Tabela 13 – Resumo dos ensaios e metodologia adotada para ARTC e CCA.**

Material	Etapa		Ensaio	Método/Equipamento
Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC)	Produção		Britagem	Britador de mandíbula
			Moagem	Moinho de bola
			Peneiramento	Conjunto de peneiras
	Caracterização	Física	Massa específica	NBR NM 23/2000
			Granulometria	NBR NM 248/2000
		Química	IAPC <sup>1</sup>	NBR 5752/1992
		RAA <sup>2</sup>	NBR 1577/2008	
Cinza da Casca de Arroz (CCA)	Produção		Calcinação	Fornalha / Forno Mufla
			Moagem	Moinho de disco
			Peneiramento	Manual (#75)
	Caracterização da CCA produzida e da CCA da indústria	Física	Massa específica	NBR NM 23/2000
			Granulometria	Conjunto de peneira e agitador mecânico
		Química	IAPC <sup>1</sup>	NBR 5752/1992
			RAA <sup>2</sup>	NBR 1577/2008
			EDX	Espectrômetro EDX-700HS
Mineralógica	DRX	Difratômetro de raio x		
Tijolos = (ARTC + cimento + CCA)	Definição dos traços Moldagem dos tijolos		Empacotamento Prensagem	NBR NM 45 Prensa hidráulica

<sup>1</sup>Índice de Atividade Pozolânica com o Cimento. <sup>2</sup>Reatividade Álcali-agregado.

## 3.1 MATERIAIS

### 3.1.1 Cimento Portland

O mercado nacional dispõe de oito opções de cimento Portland, aos mais variados tipos de obras: o cimento Portland comum CP I (CP I e CP I-S); o cimento Portland composto CP II (CP II-E, CP II-Z e CP II-F); o cimento Portland de alto forno (CP III); o cimento Portland Pozolânico (CP IV); o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); o cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS); o cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC); e o cimento Portland Branco (ABCP, 2012).

Nos primeiros experimentos desta pesquisa, foi utilizado o cimento Portland CP IV-32 RS, por ser o tipo encontrado com mais facilidade no mercado de materiais de construção de Cuiabá-MT, já que é fabricado na cidade de Nobres-MT, município próximo da capital mato-grossense.

Como o objetivo do experimento foi investigar a pozolanicidade das CCA em substituição parcial do cimento no tijolo, e pelo fato de o cimento Portland CP IV-32 RS conter de 15 a 50% de pozolana em sua composição (ABCP, 2012), optou-se pelo uso do cimento Portland CP II-F-32 da marca Cimpor, fabricado na cidade de Cezarina-GO.

Cimentos Portland do tipo CP II-F são classificados como uma linha intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto forno e pozolânicos). Este tipo de cimento caracteriza-se por possuir de 6 a 10% em massa de material carbonático, que são rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição. Este tipo de adição, conhecido como *filler calcário*, funciona como um verdadeiro *lubrificante*, pois torna os concretos e as argamassas mais trabalháveis (ABCP, 2012).

### 3.1.2 Água de Amassamento

A água de amassamento utilizada no experimento foi a fornecida pela Companhia de Abastecimento de Cuiabá (CAB).

### 3.1.3 Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC)

Para esta pesquisa, foram utilizados ARTC produzidos a partir da britagem de telhas cerâmicas oriundas da demolição de uma residência construída em 1975, portanto com, aproximadamente, 37 anos de uso. Mesmo apresentando impurezas, como lodo acumulado ao longo do tempo de uso, as telhas não foram lavadas.

Agregados com granulometrias abaixo de 4,75mm são classificados pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) como agregados miúdos. Para efeito desta pesquisa, serão feitas as seguintes denominações para as granulometrias dos agregados miúdos utilizados: (a) pós (0,15mm e fundo); (b) Areia (0,6 e 0,3mm); (c) Pedrisco (2,4 e 1,2mm). Os agregados utilizados nos experimentos são ilustrados na Figura 12.

Figura 12 – Granulometrias de ARTC utilizados na pesquisa, frações retidas (mm).



Fonte: O autor (2012)

### 3.1.4 Cinza de Casca de Arroz

A casca e a CCA utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas por uma indústria beneficiadora de arroz instalada no Distrito Industrial de Cuiabá, localizado na região sul da capital mato-grossense. Refina, atualmente, cerca de 2.500 toneladas/mês de arroz (safra 2012) procedente da região norte de Mato Grosso. Gera 500 toneladas/mês de CA, que é utilizada na produção de calor nos processos de parboilização do grão.

Trata-se de um processo hidrotérmico, onde o arroz em casca é imerso em água a uma temperatura variável de 68° C a 72° C (pré-cozimento) em que os nutrientes da película e do germe são passados integralmente para o grão (COOPERJA, 2012).

No processo de parboilização, a incineração da casca gera em torno de 20% de CCA (BEZERRA, 2010). Dessa forma, estima-se que só essa indústria esteja produzindo cerca de 100 toneladas/mês de cinza. Nesse procedimento não existe, por parte da indústria, a preocupação quanto às condições de incineração da casca, portanto as CCA são geradas sem nenhum controle de temperatura de queima.

Sabe-se que as potencialidades aglomerantes das CCA dependem de fatores como o controle da temperatura em que são geradas, do tempo de exposição ao calor e do grau de finura quando finamente moídas. As CCA geradas nessas condições desenvolvem atividades

pozolânicas por meio de reações físico-químicas (TASHIMA et al., 2012; CORDEIRO, 2009).

Seria utópica uma tentativa de convencimento do setor industrial de beneficiamento de arroz quanto às condições ideais de incineração da CA para se obter CCA de qualidade satisfatória para explorar suas propriedades pozolânicas na produção de novos materiais, por isso buscou-se, neste trabalho, investigar as potencialidades da cinza natural (CCAn) coletada da indústria, apenas recebendo o beneficiamento do peneiramento e moagem em laboratório. A fim de comparar as propriedades pozolânicas dessa CCAn como aglomerante em substituição parcial do cimento nos tijolos, utilizaram-se também cinzas produzidas em laboratório (CCAp), sob condições de temperatura controlada de queima.

A produção da CCA ocorreu no laboratório do Departamento de Construção Civil do IFMT – Campus Cuiabá.

## 3.2 MÉTODOS

A seguir são apresentadas as etapas para a produção dos materiais e dos equipamentos utilizados; os ensaios necessários para as caracterizações física, química e mineralógica dos materiais constituintes desta pesquisa: cimento Portland, Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC) e Cinza de Casca de Arroz (CCA). São apresentados também os procedimentos para a fabricação do tijolo prensado, objeto desta investigação.

### 3.2.1 Cimento Portland

#### 3.2.1.1 Caracterização Química

Para determinar os óxidos presentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{F}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}$ ) no cimento Portland CP II-F-32, utilizou-se a técnica de fluorescência de raio X por dispersão de energia (EDX), através de um espectrômetro modelo EDX-700HS, da Shimadzu, com um tempo de aquisição de 200 s por canal analítico. As amostras foram confeccionadas em pastilhas pelo método de prensagem, com pressão de 5 toneladas. Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como fluorescência.

As análises foram realizadas no Laboratório de Multiusuários de Técnicas Analíticas (LAMUTA) do Departamento de Recursos Minerais (DRM) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Figura 13 – Espectrômetro utilizado para a determinação da composição química.



Fonte: O autor (2012).

### 3.2.1.2 Caracterização Física

#### a) Massa Específica do Cimento

Para a caracterização física do cimento Portland usado nesta pesquisa, foi elaborado apenas o ensaio de massa específica utilizando o método do frasco volumétrico de Le Chatelier, normatizado pela NBR NM 23/2001 (ABNT, 2001), ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Frasco volumétrico de *Le Chatelier* usado no ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: O autor (2012).

O método consiste em colocar, no frasco, um líquido não reagente ao cimento, no caso o querosene, até a marca “0” ( $V_1$  : 1ª leitura). Pesam-se 60 g de cimento numa balança de precisão e introduzem-nas no frasco, tomando-se o cuidado em promover movimentos a fim de eliminar a presença de bolhas de ar na massa de cimento depositada no fundo do

recipiente. Após o repouso de 30 minutos do frasco em água (temperatura ambiente), procede-se a leitura final ( $V_2$ ) do líquido deslocado pela massa do cimento introduzida no frasco.

O resultado da massa específica é dada pela fórmula 3.1:

$$\delta = M/V \quad (3.1)$$

Onde:

$\delta$ : é a massa específica do material ensaiado em gramas por centímetro cúbico;

M: é a massa do material ensaiado em gramas;

$V = V_2 - V_1$ : é o volume do líquido deslocado pela massa do material ensaiado, em centímetros cúbicos.

### 3.2.2 Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC)

#### 3.2.2.1 Produção dos ARTC

Inicialmente, as telhas utilizadas no experimento foram quebradas com martelo e, a seguir, colocadas num britador do tipo mandíbula, que processou o material em partículas acima de 2,4 mm. O material foi então colocado num moinho de bolas, a fim de se obter partículas mais finas e, depois, classificado em um conjunto de peneiras e separado nas seguintes faixas granulométricas: 2,4 e 1,2 mm; 0,6 e 0,3 mm; 0,15 mm e fundo, conforme a NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). Os equipamentos utilizados nessa operação são do DCCC/IFMT – Campus Cuiabá (Figura 15).

Figura 15 – Equipamentos para o processamento dos agregados: (a) britador de mandíbula, (b) moinho de bolas, (c) conjunto de peneiras.



Fonte: O autor (2012).

### 3.2.2.2 Caracterização Físico-química dos ARTC

#### a) Massa Específica

Para a determinação das massas específicas das 3 faixas granulométricas dos ARTC (0,15 mm e fundo; 0,6 e 0,3 mm e 2,4 e 1,2 mm;), foram utilizados os métodos do Frasco Chapman e o do Frasco de Le Chatelier. Pelo fato de os agregados cerâmicos consumirem muita água, só foi possível realizar o ensaio pelo método do Frasco Chapman para a faixa granulométrica de 0,3 e 0,6 mm.

O ensaio pelo método do Frasco Chapman, normatizado pela NBR NM 52/2009 (ABNT, 2009), consiste em separar 500 g de ARTC devidamente seco e introduzi-las cuidadosamente no frasco contendo 200 cm<sup>3</sup> de água (V<sub>1</sub>, 1ª leitura). Após a introdução do agregado, a leitura final (V<sub>2</sub>) no gargalo do frasco indica o volume, em cm<sup>3</sup>, ocupado pelo conjunto água/agregado miúdo (Figura 16). A determinação da massa específica é dada pela fórmula 3.2:

$$\delta = M/V \quad (3.2)$$

Onde:

$\delta$  = é a massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico;

M = 500 g: é a massa do material ensaiado em gramas;

V = V<sub>2</sub> (leitura final) – V<sub>1</sub> (200 cm<sup>3</sup>): é o volume do líquido deslocado pela massa do material ensaiado, em centímetros cúbicos.

Figura 16 – Determinação da massa específica de agregados miúdos pelo método do frasco *Chapman*.



Fonte: O autor (1012).

Para determinar as massas específicas das faixas granulométricas 2,4 e 1,2, 0, 15 mm e fundo, utilizou-se o método do frasco de Le Chatelier, normatizado pela NBR NM 23/2001 (ABNT, 2001). Para estes ensaios, utilizaram-se apenas 45 g de cada amostra. Este método consiste em introduzir a amostra de agregado devidamente seco no recipiente contendo água até a marca zero (primeira leitura).

Procede-se este ensaio fazendo pequena agitação no frasco para eliminar bolhas de ar no interior da massa do agregado. Após esta operação, coloca-se o frasco em repouso por 30 minutos num recipiente com água (temperatura ambiente) e, a seguir, faz-se a segunda leitura. Os cálculos são realizados da mesma maneira descrita na determinação da massa específica do cimento, no item 3.2.1.2.

#### **b) Índice de Atividade Pozolânica com a Cal**

Nas literaturas pesquisadas sobre resíduos de cerâmica vermelha, vários autores fazem referência às atividades pozolânicas das partículas mais finas, manifestadas na presença de componentes de cal e cimento. Para constatar essas propriedades, foi providenciado o ensaio que determina o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com a cal, baseado na NBR 5751/1992 (ABNT, 1992).

Trata-se de um método físico para determinar o IAP com cal. Realiza-se misturando o material fino do Agregado Reciclado da Telha Cerâmica (ARTC) com a cal (hidróxido de cálcio), numa argamassa composta com 9 partes em massa de areia normal, comercializada pelo IPT, uma parte em massa de hidróxido de cálcio puro  $\text{Ca(OH)}$  e duas partes de ARTC correspondentes ao dobro do volume da cal utilizada.

Após a moldagem em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, as argamassas são submetidas à cura por 7 dias nos próprios moldes, sendo que, nas primeiras  $(24 \pm 2)$  h, devem ficar a uma temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$  e, nas  $(144 \pm 2)$  h posteriores, devem ser mantidas à temperatura de  $(55 \pm 2)^\circ \text{C}$  até, aproximadamente, 5 horas antes dos ensaios de compressão.

A NBR 12653/1992 (ABNT, 1992), que especifica as exigências químicas e físicas para que um material seja considerado uma pozolana, estabelece que o índice de atividade pozolânica de um material com a cal, aos 7 dias, deve ser igual ou superior a 6 MPa.

Cabe destacar que há restrições de alguns pesquisadores com relação aos métodos para a determinação do IAP, tanto com cimento quanto com a cal, conforme foi observado no item 2.7.4.4. do Capítulo 2 deste trabalho.

### c) Reatividade Potencial do ARTC – Reação Álcali-agregado

A Reação Álcali-agregado, comumente conhecida pela sigla RAA, é uma reação química entre alguns constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Quando ocorre, provoca fissurações em componentes construtivos como o concreto, expondo as armaduras a processos de oxidação.

Em todo o mundo, é consenso que a prevenção a esse tipo de reação é a melhor alternativa, já que é tecnicamente inviável interrompê-la. Portanto, a adoção de medidas sistemáticas de prevenção vem, atualmente, evitando a ocorrência dessas patologias com a utilização de materiais pozolânicos (TÉCHNE, 2011).

Em vários estudos, dentre os quais o de Favini e Costa (2009), que utilizaram agregados reciclados de telha cerâmica em concretos, os autores concluíram que esse tipo de agregado não apresenta reação álcali-agregado com os hidróxidos alcalinos existentes no cimento. No entanto, como os ARTC desta pesquisa são provenientes de telhas com 37 anos de uso e contêm impurezas, entendeu-se necessária a realização do ensaio RAA.

Os ARTC foram avaliados quimicamente, objetivando conhecer suas propriedades diante da possibilidade de ocorrer reações do tipo álcali-agregado. Tais características foram avaliadas por meio do método acelerado de determinação da expansão em barras de argamassas, segundo a NBR 15577-4/2008 (ABNT, 2008). O ensaio consistiu em preparar duas argamassas contendo os ARTC e o cimento Portland CP II-F-32 que, numa argamassa, foi parcialmente substituído em 20% por CCAp (produzida em laboratório, ou seja, com controle de temperatura) e noutra por CCAn (cinza natural da indústria, sem controle de temperatura e moída em laboratório).

O traço utilizado para ambas as argamassas foi o 1:2,25 (aglomerante: ARTC) e uma relação água/cimento igual a 0,47 (NBR 15577-4/2008). As quantidades necessárias para a moldagem de 3 barras para cada argamassa e as granulometrias utilizadas dos ARTC estão transcritas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente.

**Tabela 14 – Quantidades de materiais para argamassa.**

Material	Massa (g)	
	Norma	Argamassa
Cimento Portland	440	352
Cinza de Casca Arroz (CCA)	–	88
Agregado (ARTC)	990	990
Água (ml)	206,8	406,8

Tabela 15 – Granulometria dos ARTC requerida para os ensaios.

Peneiras com Abertura de Malha		Quantidade de Material em Massa	
Passante (mm)	Retido (mm)	(%)	(g)
4,8	2,4	10	99
2,4	1,2	25	247,5
1,2	0,6	25	247,5
0,6	0,3	25	247,5
0,3	0,15	15	148,5
Total		100	990

Conforme se observa na Tabela 14, a água absorvida nas argamassas foi maior que o citado na norma para confecções das barrinhas, devido à sua grande absorção pelo ARTC, bem como o material pozzolânico (CCA).

As argamassas foram misturadas manualmente e, após, foram moldados os corpos de prova. Para cada argamassa, foram confeccionadas três barras prismáticas, de seção quadrada, com 25 mm de lado e 285 mm de comprimento, com duas camadas adensadas com 20 golpes de soquete (Figura 17).

Figura 17 – Moldagem das barras, conforme a NBR 15577-4/2008.



Fonte: O autor (2012).

Os moldes foram colocados em câmara úmida, por 24 h. Em seguida, o material foi desmoldado e submerso em água destilada, a 80° C, por outras 24 h. Retirado da água, foi feita uma leitura inicial do comprimento e, em seguida, submerso na solução de NaOH 1N (hidróxido de sódio 1 normal), a 80° C. Após a leitura zero (leitura inicial), foram efetuadas leituras nas idades de 16 e 30 dias, e três leituras intermediárias em cada período, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Leitura das barras: ensaio de absorção de água pelo ARTC



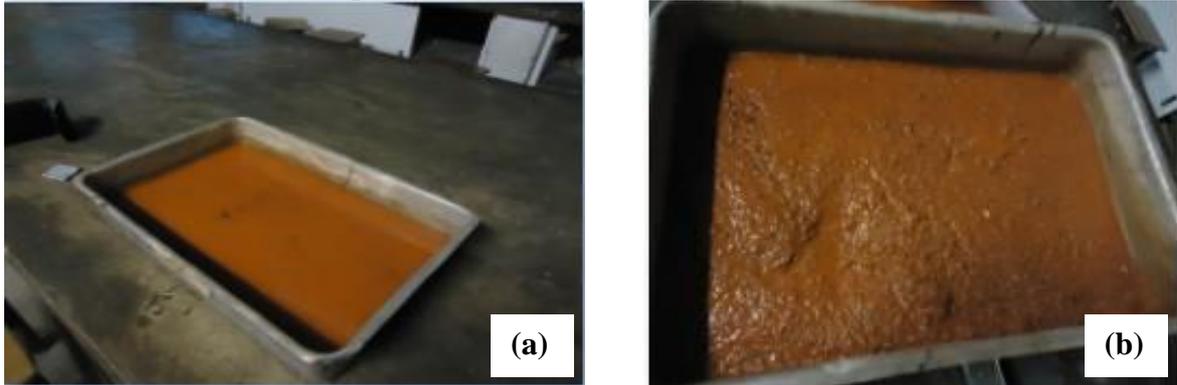
Fonte: O autor (2012).

O ensaio foi realizado baseado na NBR NM 30/2001 (ABNT, 2001). Consiste em determinar a absorção de água de agregados miúdos na condição saturados superfícies seca, que é observada quando os agregados cujas partículas absorveram o máximo de água apresentando ainda a superfície seca.

Inicialmente, foi separado, aproximadamente, 1 kg de ARTC obedecendo a sua composição na confecção dos tijolos. Na primeira tentativa, a composição utilizada foi de 25:35:40 (pós: areia: pedrisco, em %). Seguindo essa composição, separou-se 250 g/2 das frações fundo e 0,15 mm (pós); 350 g/2 das frações 0,3 e 0,6 mm (areia) e 400 g/2 das frações 1,2 e 2,4 mm (pedrisco). Após misturados, os ARTC foram cobertos por água e descansaram por 24 h.

Ato seguinte, o excesso de água foi retirado e começado o processo de secagem dos ARTC. Nesse procedimento, observou-se a dificuldade, já relatada por Dias (2004), da secagem do ARTC, devido à presença do material fino na mistura, formando uma espécie de “lama” (Figura 19).

Figura 19 – Ensaio de Absorção de Água pelo ARTC: (a) amostra dos ARTC imersa em água, (b) “lama” formada após a retirada do excesso de água.



Fonte: O autor (2012).

Visando retirar o excesso de umidade da amostra, a bandeja foi colocada num forno por, aproximadamente, 1 h e só então foi possível prosseguir com o processo de secagem. Foi usado um secador de cabelo para promover o enxugamento do ARTC, até poder realizar o teste com o tronco-de-cone, conforme estabelece a NM 30/2001 (ABNT, 2001) (Figura 20).

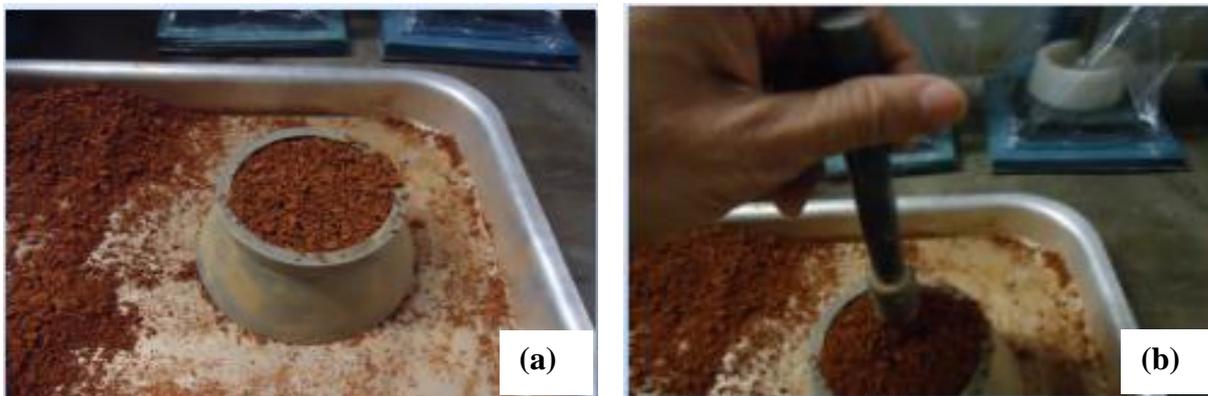
Figura 20 – Secagem do ARTC até obter a condição de saturado superfície seca.



Fonte: O autor (2012).

Dando prosseguimento ao ensaio, foi realizado o teste com o tronco-de-cone. Consiste em colocar no seu interior uma quantidade de ARTC até o seu preenchimento. Depois, o material foi levemente compactado com 25 golpes, utilizando uma haste metálica e então o molde foi retirado. Caso os grãos continuassem unidos pela umidade e com a forma moldada, seria necessário prosseguir a secagem e repetir o procedimento até que amostra tendesse a desmoronar, demonstrando que adquiriu a condição de Saturado Superfície Seca (Figura 21).

Figura 21 – Secagem do ARTC: (a) moldagem do ARTC no troco-de-cone, (b) leve compactação do ARTC.



Fonte: O autor (2012).

A seguir, a amostra foi pesada e levada ao forno por tempo necessário até a estabilização da massa do ARTC e, depois, novamente pesada para avaliar o resultado.

Em razão da dificuldade da realização deste ensaio com o traço 25: 35: 40 (pós: areia: pedrisco), devido à presença de 25% de material fino, foi realizado também outro ensaio, desta feita sem essa fração na composição, utilizando um traço 44:56, sendo 440 g/2 com as frações 0,3 e 0,6 (areia), e 560 g/2 com as frações 1,2 e 2,4 mm (pedrisco). Os procedimentos foram os mesmos do ensaio anterior. A intenção deste segundo ensaio foi compará-lo ao primeiro.

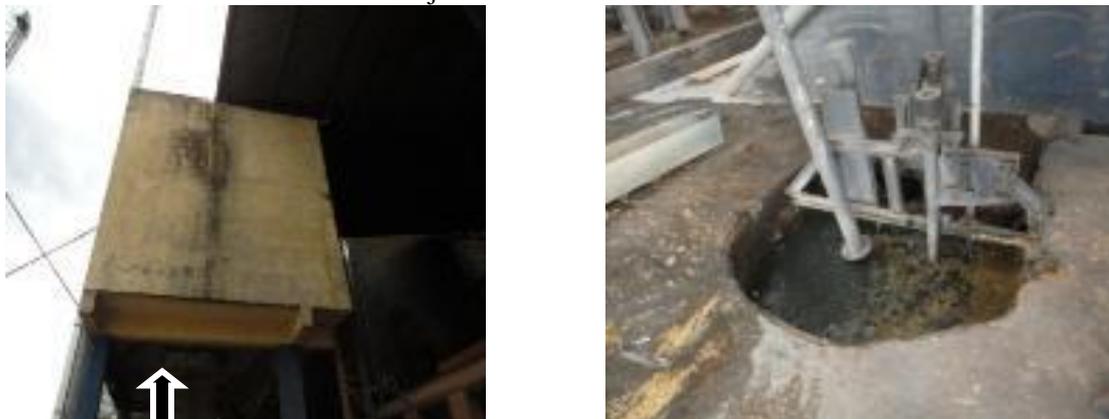
### 3.2.3 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

#### 3.2.3.1 Produção da CCA na Indústria e em Laboratório

##### a) Produção da CCA na Indústria (CCAn)

A indústria fornecedora da casca e da Cinza de Casca de Arroz natural (CCAn) mantém, para o processo de parboilização do arroz, um sistema composto de fornalha, caldeira, filtros e reservatórios (elevado e enterrado). Após a queima, a CCAn é captada por uma calha, sob a fornalha, e conduzida por água corrente até um reservatório enterrado e, a seguir, é bombeada para um reservatório elevado, onde é armazenada para futuro descarte em caminhões (Figura 22).

Figura 22 – Conjunto de reservatórios para captação e armazenamento da CCAn: (a) fundo do reservatório superior com alçapão para descarte da CCA em caminhões, (b) reservatório inferior e conjunto de bombeamento da cinza.



Fonte: O autor (2012).

Há que se destacar que, quando coletada na indústria, a CCAn encontrava-se encharcada, por isso foi necessária a secagem ao sol de todo o volume coletado, o que demandou duas semanas. A CCAn devidamente seca foi armazenada em saco plástico, para posterior utilização.

#### **b) Produção da CCA em Laboratório no DACC/IFMT – Campus Cuiabá**

Com a CA devidamente seca ao sol e após peneirada, procedeu-se sua queima. Nessa operação, utilizou-se um forno mufla, marca Pelegrine 230/380 V, com aquecimento elétrico e temperatura máxima de 1.200° C.

Tendo em vista a quantidade de CCA a se obter, bem como a característica do interior do forno mufla de conter resistências nas paredes laterais e na base, realizou-se a queima numa caixa, adaptada no interior do forno de tal forma que não prejudicasse o funcionamento das resistências instaladas na sua base. A quantidade de CA disposta na caixa foi, em média, de 1 kg/queima, distribuída numa camada de, aproximadamente, 9 cm de espessura (Figura 23). Foram feitas várias queimas até reunir uma massa em torno de 5 kg.

Figura 23 – Queima da casca de arroz: (a) forno, (b) CA em caixa adaptada no interior do forno, (b) CCA após segunda fase da queima.



Fonte: O autor (2012).

Todas as queimas foram realizadas conforme Sugita (1992), que propôs o método de queima em dois passos, com Taxa de Aquecimento (TA) de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Seguindo esta taxa de aquecimento, na primeira etapa de queima, elevamos a temperatura até atingir  $400^{\circ}\text{C}$ , num tempo de 40 minutos.

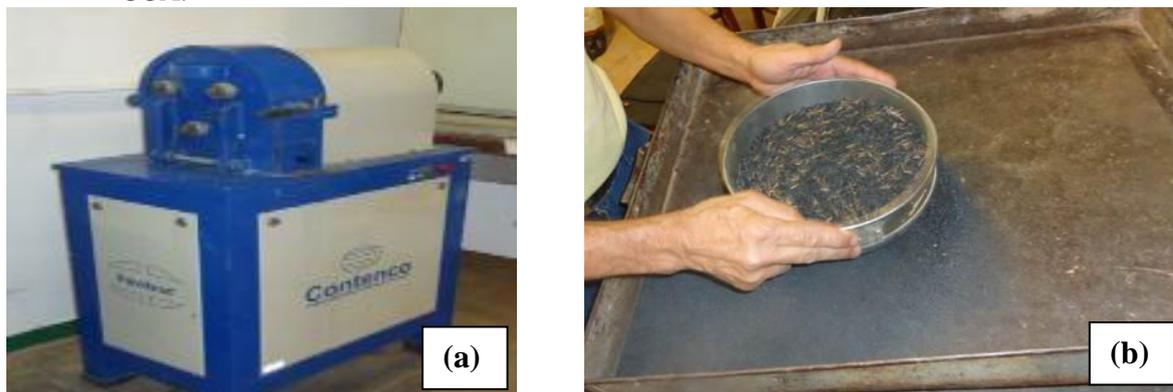
Ato contínuo, o forno foi desligado e aberto para promover nele um resfriamento natural. Após uma hora, a cinza foi revolvida a fim de oxigenar a massa do material que ficou por baixo na primeira etapa da queima. A seguir, iniciou-se a segunda etapa de queima, que começou com o reaquecimento do forno até  $400^{\circ}\text{C}$  e, a partir de então, adotamos a mesma TA até atingir  $600^{\circ}\text{C}$ , o que demandou mais 20 minutos, totalizando um tempo de queima de 60 minutos.

### 3.2.3.2 Peneiramento e Moagem das CCA

As CCAn fornecidas pela indústria beneficiadora foram peneiradas (peneira de 1.2 mm) para a retirada de resíduos e cascas que não foram devidamente queimadas. Após, foram moídas num moinho de disco e peneiradas na peneira de 0,075 mm.

As CCAp produzidas no laboratório também passaram pelo processo de moagem e, posteriormente, pelo peneiramento na peneira de 0,075 mm. O moedor utilizado foi um moinho de disco, que foi sendo ajustado para se obter uma granulometria semelhante ao cimento. A Figura 24 ilustra o equipamento utilizado para a moagem e o peneiramento manual das CCAn. Após esses procedimentos, as CCA moídas e peneiradas foram embaladas em sacos plásticos, para posterior utilização.

Figura 24 – Peneiramento e moagem das CCA: (a) moinho de disco, (b) peneiramento manual das CCA.



Fonte: O autor (2012).

### 3.2.3.3 Caracterização Física, Química e Mineralógica das CCA

#### a) Massa Específica

As massas específicas dos dois tipos de CCA foram determinadas pelo ensaio com o frasco de Le Chatelier (Figura 25). Nestes ensaios, foram utilizados 45 g de cada tipo de CCA. Para este método, recomenda-se o uso de um líquido que não reaja quimicamente com o material e que tenha densidade igual ou superior a  $0,731 \text{ g/cm}^3$ , a  $15^\circ \text{ C}$ , e inferior à dos materiais a serem ensaiados. Os cálculos são os mesmos descritos para a massa específica do cimento, no item 3.2.1.2.

Figura 25 – Ensaio de massa específica de CCA, método *Le Chatelier*.



Fonte: O autor (2012).

#### b) Determinação da Granulometria das CCAn

Um dos objetivos desta pesquisa é utilizar as CCAn como são coletadas na indústria e beneficiadas, apenas, pela moagem em laboratório. Pretende-se comparar o comportamento

mecânico dos tijolos produzidos com essas cinzas, substituindo parcialmente o cimento Portland, com os tijolos que utilizam CCAp beneficiadas pelos processos de queima controlada e moídas em laboratório.

Sabe-se que a sílica ativa age em concretos e argamassas quimicamente através da reação pozolânica, ou seja, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar os resistentes silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Outra forma é fisicamente através do chamado efeito “filler”, ou seja, de acordo com as dimensões de suas partículas, preenchendo os vazios da estrutura (BEZERRA, 2010).

Visando estimar a massa de material fino (passante na peneira de 0.075 mm) presente na CCAn, foi feito o ensaio para determinar sua granulometria, no DACC/IFMT – Campus Cuiabá. Da mesma forma, realizou-se também o ensaio com a Cinza de Casca de Arroz produzida em laboratório (CCAp), a fim de compará-las. A intenção desses ensaios é demonstrar que mesmo as CCAn contêm parcela expressiva de material fino que pode agir fisicamente através do chamado efeito “filler” na mistura.

O ensaio para determinar a composição granulométrica das CCA é o mesmo para agregados miúdos e é baseado na NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). Preparou-se uma amostra de 50 g de CCAn e outra de 50 g com CCAp. Para esse procedimento, foi utilizado um conjunto de peneiras colocado num agitador mecânico, por cerca de 15 minutos (Figura 26).

Figura 26 – Conjunto de balança montado em agitador mecânico.



Fonte: O autor (2012).

### c) Análise Química das CCA

A análise para determinar a composição química das CCA foi realizada pela técnica de fluorescência de raio X, por dispersão de energia (EDX), através de um espectrômetro modelo EDX-700HS, da Shimadzu, com um tempo de aquisição de 200 s por canal analítico. Os procedimentos deste ensaio são os mesmos realizados para determinar as composições químicas do cimento usado na pesquisa e descrito no item 3.2.1.1 deste trabalho.

### d) Análise Mineralógica das CCA

A difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de análise para a caracterização mineralógica das CCA. A realização deste ensaio é importante, pois identifica as fases cristalinas presentes nas pastas, sendo realizada por análise dos picos presentes no difratograma e pela comparação com bancos de dados específicos. Com este ensaio, é possível determinar quanto uma amostra é amorfa ou cristalina (BEZERRA, 2010).

As análises de difração de raios X foram realizadas em equipamento Shimadzu XRD-6000, com radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), operando com uma diferença de potencial no tubo de 40 kV e uma corrente elétrica de 30 mA (Figura 28). A varredura de  $2\theta$  foi feita na faixa de 5 a 80° C. Todas as medidas foram realizadas através do método do pó (Figura 27).

Esta análise foi realizada no laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA), localizado no Departamento de Recursos Minerais da Universidade Federal de Mato Grosso (DRM-UFMT).

Figura 27 – Difratômetro de raios X SHIMADZU XRD-6000.



Fonte: O autor (2012).

### e) Análise Térmica das CCA

Esta análise foi realizada objetivando a verificação do comportamento térmico (estabilidade e decomposição), ou seja, as faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações endotérmicas e exotérmicas das CCA. Os ensaios que determinam tal comportamento são as análises termogravimétricas (TG) e as térmicas diferenciais (DTA).

As curvas termogravimétricas (TG) foram obtidas em uma termobalança Shimadzu DTG 60H, a uma razão de aquecimento programada em  $10^{\circ} \text{C min}^{-1}$ , numa faixa de temperatura de 25-1.000 $^{\circ} \text{C}$  sob atmosfera de nitrogênio. Essa análise foi realizada no LAMUTA do DRM/UFMT (Figura 28).

Figura 28 – Termobalança SHIMADZU, DTG 60H.



Fonte: O autor (2012).

### 3.2.4 Fabricação dos Tijolos

#### 3.2.4.1 *Empacotamento Experimental dos Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC)*

Para a definição dos traços para a moldagem dos tijolos, foi necessário realizar o empacotamento experimental dos agregados, que consiste em encontrar a maior massa unitária compactada e um menor índice de vazios em composições de ARTC preestabelecidas.

Nesta pesquisa, foram feitas as seguintes denominações para as três faixas granulométricas dos agregados miúdos utilizados: Pós (0,15 mm e fundo), Areia (0,6 e 0,3 mm) e Pedrisco (2,4 e 1,2 mm). Foram utilizados sete tipos de composições entre as três faixas granulométricas dos ARTC, conforme mostra a Tabela 16.

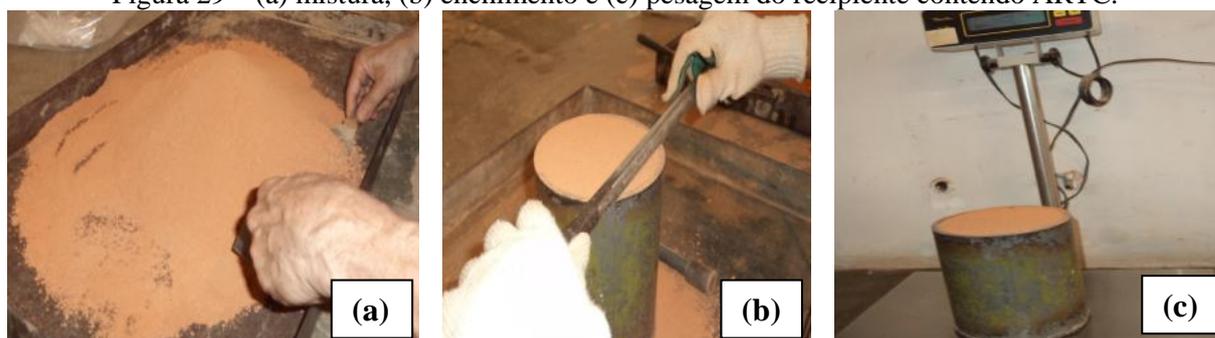
**Tabela 16 – Composição dos ARTC no empacotamento experimental.**

<b>Pós (fundo + 0,15 mm)</b> (%)	<b>Areia (0,3 + 0,6 mm)</b> (%)	<b>Pedrisco (1,2 + 2,4 mm)</b> (%)
10	25	65
15	30	55
20	30	50
25	35	40
15	25	60
10	20	70
15	65	20

Fonte: Adaptado de: COSTA, 2006.

O empacotamento experimental, segundo o que estabelece a NBR NM 45/2006 (ABNT, 2006), foi feito com 5.000 g de ARTC colocado dentro de um recipiente, em camadas, sendo a primeira correspondente a um terço, mediante 25 golpes da haste de adensamento e continuando até seu preenchimento, como ilustra a Figura 29.

Figura 29 – (a) mistura, (b) enchimento e (c) pesagem do recipiente contendo ARTC.



Fonte: O autor (2012)

Para cada composição, foram adotadas 4 pesagens e daí se extraiu a média para posterior determinação da Massa Unitária Compactada (MUC), conforme exemplifica a Tabela 17.

**Tabela 17 – Exemplo de empacotamento para uma composição de misturas de ARTC.**

<b>(%) de ARTC</b> <b>(pós: areia:</b> <b>pedrisco)</b>	<b>Pesagem das Massas dos ARTC + Massa Recipiente (g) = Mar</b>				<b>Mar<sup>1</sup></b> <b>Média (g)</b>
	<b>1ª Pesagem</b>	<b>2ª Pesagem</b>	<b>3ª Pesagem</b>	<b>4ª Pesagem</b>	
10:25:65	7.290	7.300	7.260	7.300	7.287,50

<sup>1</sup>Mar: Massa dos ARTC + massa do recipiente.

#### **a) Cálculo das MUC dos Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC)**

A NBR NM 45/2006 (ABNT, 2006) estabelece o método para a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado solto ou compactado. Para a realização desse ensaio, é necessário que a

amostra se constitua com, aproximadamente, 150% da quantidade de material requerido para encher o recipiente e deve ser manipulada de forma a evitar sua segregação.

De posse da média da pesagem de cada composição, procede-se o cálculo da Massa Unitária Compactada (MUC), segundo a Equação 3.3:

$$MUC = (M_{ar} - M_r) / V_r \quad (3.3)$$

Onde:

MUC: Massa Unitária Compactada, em kg/m<sup>3</sup>;

Mar: Massa do agregado + massa do recipiente, em kg;

Mr: Massa do recipiente, em kg;

Vr: Volume do recipiente, em m<sup>3</sup>.

#### b) Definição da Composição Considerada Ótima de ARTC

A seguir, compara-se qual a maior MUC das sete composições. Entretanto, para chegar a uma composição, considerada ótima, foi utilizado também o cálculo do índice de vazios e da massa específica da mistura pelo método de empacotamento teórico (O'REILLY DÍAZ, 2005), adaptado por Costa (2006) e que consiste em determinar a maior massa específica da mistura (equação A) e o menor índice de vazios (equação B) através das massas unitárias compactadas, obtidas no empacotamento experimental, conforme as equações transcritas na Tabela 18.

**Tabela 18 – Equações para os cálculos da massa específica da mistura e do índice de vazios.**

Equação (A)	Equação (B)
$\delta t = \sum(\%A \times \delta A + \%B \times \delta B + \%C \times \delta C) / 100$	$Iv = \{(\delta t - MUC) / \delta t\} \times 100$
<p><math>\delta t</math>: Massa específica da mistura, em g/c<sup>3</sup>;            % A, B, C: % (pós, areia e pedrisco);  <math>\delta</math> A, B, C: Massa específica (pós, areia e pedrisco).</p>	<p><math>Iv</math>: Índice de vazios da mistura, em %;  <math>\delta t</math>: Massa específica da mistura;            MUC: Massa Unitária Compactada;            OBS: O <math>Iv</math> deve ser calculado para cada composição.</p>

Na Tabela 19, para efeito de ilustração, estão transcritos os valores obtidos de uma das sete composições, após os empacotamentos experimental e teórico.

**Tabela 19 – Quadro ilustrativo dos empacotamentos experimental e teórico de uma das sete composições.**

Tipos de Composição (%)			Média da Mar <sup>1</sup>	Massa Unitária Compactada <sup>2</sup> MUC = (Mar-M <sub>r</sub> )/V <sub>r</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica das Frações <sup>3</sup> (g/c <sup>3</sup> )(δ)			Massa Específica da Mistura δt (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios <sup>4</sup> (Iv) (%)
Pós	Areia	Pedrisco			Pós	Areia fina	Areia média		
10	25	65	7.287,5	1,29	2,35	2,32	2,42	2,38	45,86

<sup>1</sup>Mar (Massas do Agregado + Recipiente). Para cada composição, foram feitas 4 pesagens e calculada a média; <sup>2</sup>M<sub>r</sub>: Massa do Recipiente = 4.655 g; V<sub>r</sub>: Volume do Recipiente = 2.040 cm<sup>3</sup>; <sup>3</sup>Massa específica de cada faixa granulométrica; <sup>4</sup>Iv: Índice de vazios da mistura, em %.

### 3.2.4.1 Definição do Traço para a Moldagem do Tijolo

Apesar de guardar – pela conformidade da forma, dimensões e texturas – certa similaridade com tijolos de solo-cimento, a opção adotada para balizar esta pesquisa foi a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). A justificativa se deve em razão do uso, no tijolo, de agregados (embora reciclados) tais quais os blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

O traço utilizado foi o 1:9 [aglomerante (cimento + CCA) : agregados], considerado econômico. O percentual de CCA, em substituição parcial do cimento Portland na mistura foi de 20, 25 e 30% para os dois tipos de cinza (CCAn e CCAp). Para definir as quantidades de aglomerantes (cimento e CCA) e agregados (ARTC) na mistura, procedeu-se da seguinte maneira (Equação 3.4):

$$\text{Cimento} = \frac{\text{massa da mistura}}{\text{traço da mistura (1:9)}} \quad (3.4)$$

Nesta fase da pesquisa, das sete composições estudadas de agregados, a que gerou o menor índice de vazios foi a composição com 25% da fração pós (0,15 mm, fundo), 35% da fração areia (0,3 e 0,6 mm) e 40% da fração pedrisco (1,2 e 2,4 mm).

Como ilustração, para preparar 20 kg de material usando apenas o cimento como aglomerante, define-se sua quantidade segundo a Equação 3.5, abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Cimento} &= \frac{20000\text{g}}{1:9} \quad \rightarrow \quad \text{Cimento} = \frac{20000\text{g}}{\frac{1 \times 100}{100} + \frac{9 \times 25}{100} + \frac{9 \times 35}{100} + \frac{9 \times 40}{100}} \quad (3.5) \\ \text{Cimento} &= \frac{20000\text{g}}{1 + 2,25 + 3,15 + 3,60} \quad \rightarrow \quad \text{Cimento} = 2.000 \text{ g} \end{aligned}$$

Para 20 kg de material, usa-se, portanto, 2.000 g de cimento. A proporção dos agregados é feita obedecendo à composição: 25% (pós), 35% (areia) e 40% (pedrisco), segundo as seguintes equações:

Pós (0,15 mm e fundo) = 2.000 g (cimento) x 2,25 = 4.500 g;

Areia (0,6 e 0,3 mm) = 2.000 g (cimento) x 3,15 = 6.300 g;

Pedrisco (1,2 e 2,4 mm) = 2.000 g (cimento) x 3,60 g = 7.200 g.

Para se preparar 20 kg de material, desta feita usando a cinza em substituição parcial do cimento, o procedimento é o mesmo para os agregados, mudando somente a quantidade da massa do cimento na proporção em que é substituída pela CCA.

Por exemplo, numa mistura com 25% de CCA em substituição ao cimento, faz-se conforme descrito abaixo:

Quantidade de CCA = 2.000 g (cimento) x 0,25 (CCA) = 500 g de CCA;

Quantidade de cimento Portland = 2.000 g x 0,75 (cimento) = 1.500 g de cimento.

A água requerida na mistura foi determinada por meio de teste táctil-visual. Observou-se um consumo médio de 650 ml para cada 3 kg de massa de material. Este volume cresceu discretamente, à medida que se aumentava o percentual de CCA na mistura, Figura 30.

Figura 30 – Determinação da umidade ótima por meio de teste táctil-visual.

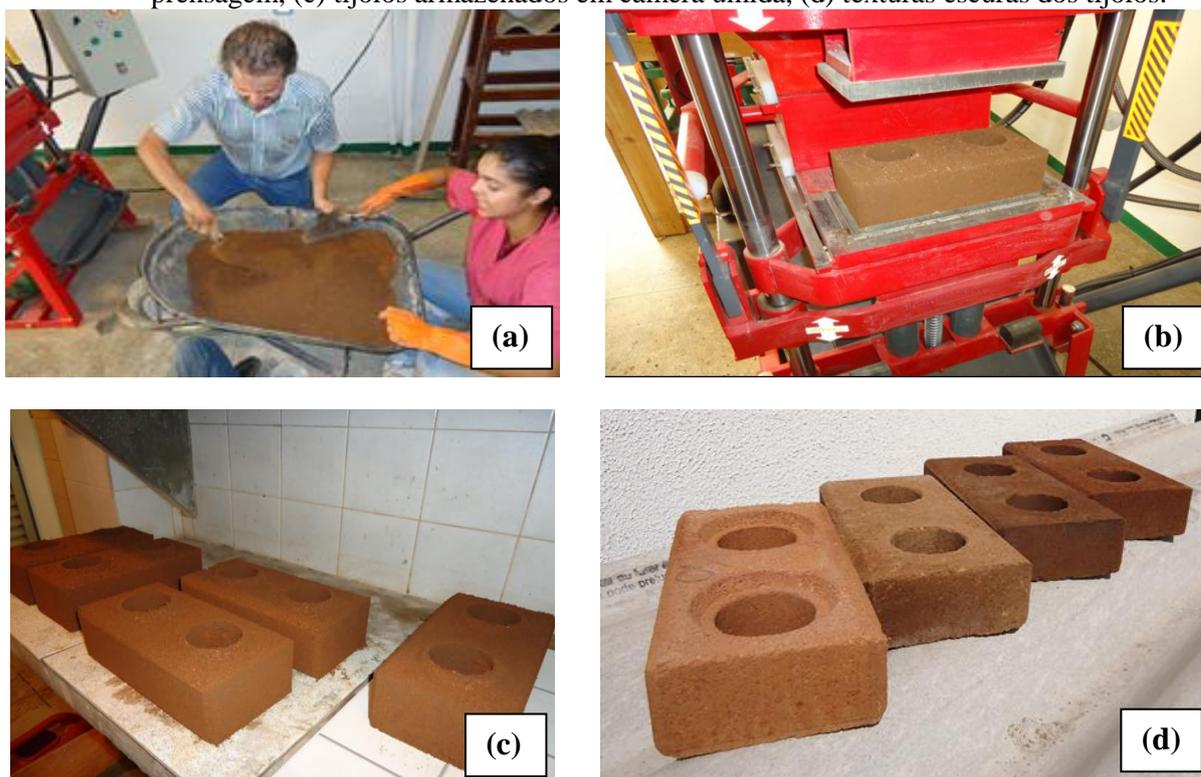


Fonte: O autor (2012).

### 3.2.4.3 Prensagem da Mistura

A mistura foi realizada manualmente e introduzida em um prensa hidráulica para a moldagem dos tijolos, conforme mostra a sequência de fotos na Figura 31. Ato seguinte, após moldados, os tijolos foram colocados em uma câmara úmida, cobertos e molhados diariamente, até a realização dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 31 – Procedimentos para a moldagem dos tijolos: (a) mistura manual, (b) tijolos após prensagem, (c) tijolos armazenados em câmara úmida, (d) texturas escuras dos tijolos.



Fonte: O autor (2012).

### 3.2.4.4 Ensaios de Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a NBR 12118/2010 (ABNT, 2010). Nos ensaios iniciais (1ª fase) desta pesquisa, foi investigada apenas a resistência à compressão dos tijolos, com 7 dias.

Nos ensaios definitivos (2ª fase), para os ensaios de resistência à compressão (com 7, 14 e 28 dias), foram produzidos 18 tijolos (Corpos de Prova – CP) para cada tipo a ser ensaiado, nas quantidades transcritas na Tabela 20.

**Tabela 20 – Quantidade de tijolos produzidos para os ensaios de resistência à compressão.**

Tipos de Tijolos (CP)	Quantidade de CP para Ensaios de Resistência à Compressão		
	7 dias	14 dias	28 dias
100% Cimento + ARTC (referência)	06	06	06
80% Cimento + 20% CCA <sub>n</sub> + ARTC	06	06	06
80% Cimento + 20% CCA <sub>p</sub> + ARTC	06	06	06
75% Cimento + 25% CCA <sub>n</sub> + ARTC	06	06	06
75% Cimento + 25% CCA <sub>p</sub> + ARTC	06	06	06
70% Cimento + 30% CCA <sub>n</sub> + ARTC	06	06	06
70% Cimento + 30% CCA <sub>p</sub> + ARTC	06	06	06

Para efeito de apresentação dos resultados e discussões, os tijolos produzidos serão denominados conforme a Tabela 21.

**Tabela 21 – Denominação dos tijolos, para a apresentação dos resultados e discussões.**

Tipos de Tijolos	Denominação
100% Cimento + ARTC (referência)	Tijolo Referência
80% Cimento + 20% CCA <sub>n</sub> + ARTC	Tijolo 1
80% Cimento + 20% CCA <sub>p</sub> + ARTC	Tijolo 2
75% Cimento + 25% CCA <sub>n</sub> + ARTC	Tijolo 3
75% Cimento + 25% CCA <sub>p</sub> + ARTC	Tijolo 4
70% Cimento + 30% CCA <sub>n</sub> + ARTC	Tijolo 5
70% Cimento + 30% CCA <sub>p</sub> + ARTC	Tijolo 6

Para a avaliação das resistências à compressão, foram feitos os seguintes procedimentos:

#### **a) Capeamento das Faces dos Tijolos**

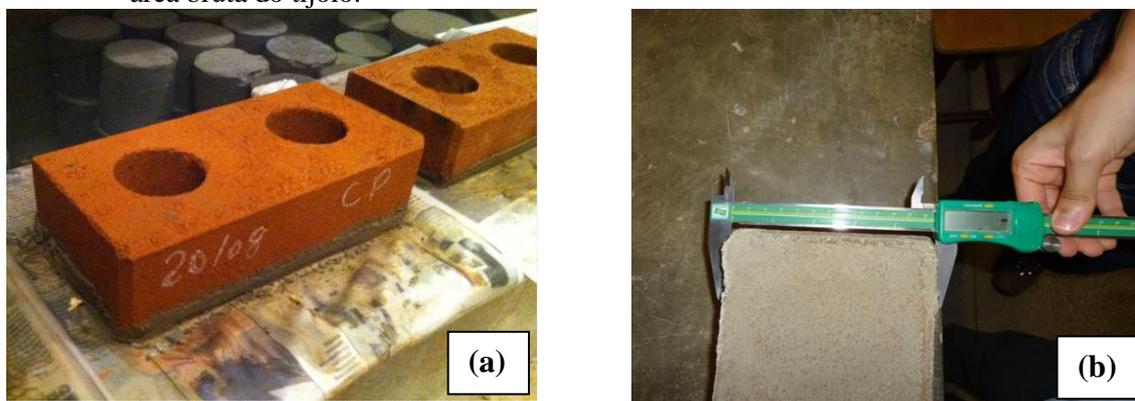
Para a realização dos ensaios de resistências dos blocos, foi necessário regularizar as faces dos blocos com argamassas capazes de resistir às tensões. As argamassas foram colocadas sobre uma superfície plana, com espessura máxima de 3 mm, por sobre as quais as faces dos tijolos (corpos de prova) foram pressionados, de modo que as faces laterais do bloco ficassem perpendiculares à superfície. Para isso, foi utilizado um nível de bolha. O procedimento foi realizado com a outra face, após a devida secagem da primeira.

#### **b) Regularização das Faces**

Após a secagem do capeamento, foi feita a regularização das faces com uma espátula, a fim de eliminar os excessos e conferir-lhes regularidades nas medidas. Segundo esta norma, a área bruta do corpo de prova deve ser calculada com o valor médio das dimensões totais da

seção de trabalho do corpo de prova, sem desconto das áreas de furos ou reentrâncias. A seguir, as fotos da Figura 32 ilustram esses procedimentos.

Figura 32 – Regularização das faces dos tijolos: (a) capeamento dos tijolos e (b) Determinação da área bruta do tijolo.

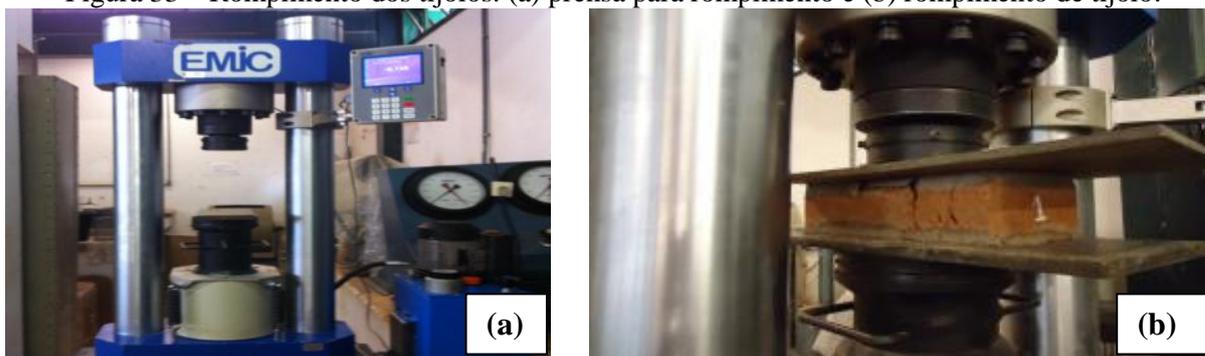


Fonte: O autor (2012).

### c) Rompimento dos Tijolos

Realizaram-se os ensaios de resistência numa prensa da marca EMIC, com capacidade de 2.000 KN e resolução indicador digitalizado de 0,1 KN, observando as orientações da NBR 12118/2010 (ABNT, 2010). O valor da resistência à compressão para cada corpo de prova é obtido dividindo-se a carga máxima em newtons, observada durante o ensaio, pela área bruta em milímetros quadrados, em décimo de unidade, expressa em megapascal (Figura 33).

Figura 33 – Rompimento dos tijolos: (a) prensa para rompimento e (b) rompimento de tijolo.



Fonte: O autor (2012).

O valor da resistência à compressão ( $f_{bk}$ ), bem como a classificação e a avaliação da conformidade dos tijolos, é feita segundo a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007) e calculada pela Equação 3.6:

$$f_{bk\ est} = 2 \left[ \frac{fb(1)+fb(2)+\dots+fb(i-1)}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (3.6)$$

Onde:

$i = n/2$ , se  $n$  for par;

$i = (n - 1)/2$ , se  $n$  for ímpar;

$f_{bk\ est}$  = resistência característica estimada da amostra e expressa em  $g/cm^2$ .

### 3.2.4.5 Ensaio de Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção teve como objetivo investigar a capacidade de absorção de água pelos tijolos, comparando posteriormente os resultados encontrados e associando-os à composição de cada tipo de mistura.

A realização deste ensaio é feita segundo a NBR 12118/2010 (ABNT, 2010). São necessários uma balança, uma estufa e um recipiente de água para a imersão dos tijolos. Para execução deste ensaio, utilizaram-se três corpos de prova (tijolos) de cada tipo de composição estudada, que foram imersos na água por 24 horas (Figura 34).

Após esse tempo, foram retirados e, na condição Saturado com Superfície Seca (SSS), foram pesados. Posteriormente, foram levados a uma estufa com temperatura  $(110 \pm 5)^\circ C$ , na qual permaneceram por 24 horas e, depois, à temperatura ambiente, medidas suas massas secas. O valor da absorção de água é expresso em porcentagem e calculado pela Equação 3.7:

$$a = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

$a$  = absorção total, em porcentagem;

$m1$  = média das massas dos 3 corpos de prova secos em estufa, em gramas;

$m2$  = média das massas dos 3 corpos de prova saturados, em gramas.

### 3.2.4.6 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade teve como objetivo investigar a capacidade de absorção de água pelos tijolos, através da ascensão capilar, comparando posteriormente os resultados encontrados e associando-os à composição de cada tipo de mistura.

A realização deste ensaio é feita segundo a NBR 9779/1995 (ABNT, 1995). Foram utilizados três tijolos de cada tipo de composição estudada. Para sua realização, são necessárias uma estufa, bandejas e balança. Inicialmente, os tijolos são colocados numa estufa

com temperatura  $(110 \pm 5)^\circ \text{C}$ , por 24 horas. Passado esse período, são retirados e, depois que retornam à temperatura ambiente, são medidas suas massas secas.

Posteriormente, os tijolos são acondicionados numa bandeja sobre um suporte que evite seu contato com o fundo da bandeja. A seguir, é colocada água até um nível de 5 mm, tomando-se o cuidado para que este nível seja mantido pelo tempo de realização do ensaio. Determina-se a massa dos tijolos com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h. Após cada medida, retornam imediatamente para o recipiente de ensaio.

Cumprir observar que, inicialmente, os tijolos foram colocados conforme são assentados numa alvenaria, mas, nesta posição, o ensaio restou prejudicado, já que, nas primeiras horas, observou-se a completa absorção de água, pelo fato de os tijolos serem predominantemente de Agregados Reciclados de Telha Cerâmica (ARTC), logo com grande capacidade de absorção. Por isso, no prosseguimento dos ensaios, foram colocados de pé (Figura 34).

O valor da absorção por capilaridade é expressa em  $\text{gr}/\text{cm}^2$  e calculado segundo a Equação 3.8:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (3.8)$$

Onde:

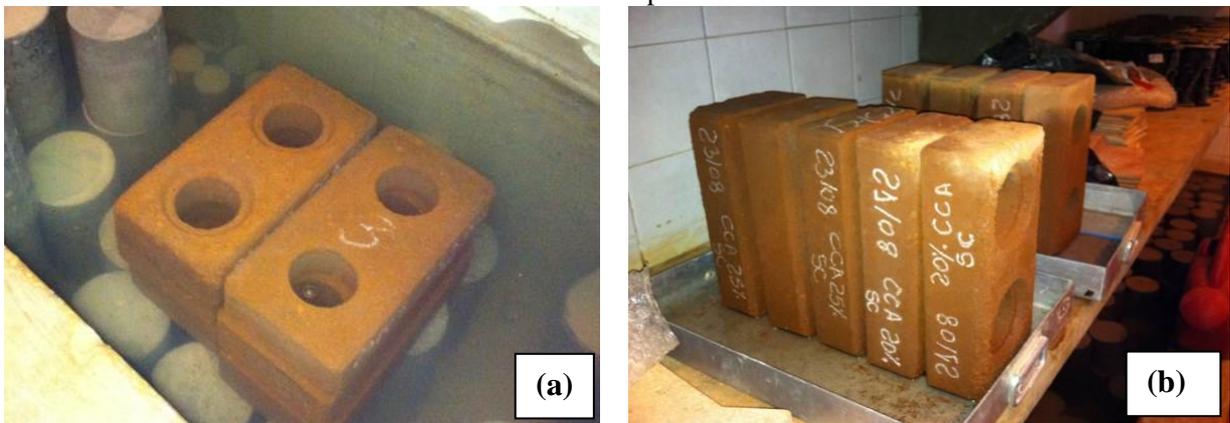
C = absorção por capilaridade, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;

A = média das massas dos corpos de prova saturados, em g;

B = média das massas dos corpos de prova secos, em g;

S = área da seção, em  $\text{cm}^2$ ;

Figura 34 – Ensaio de absorção de água: (a) ensaio de absorção por imersão e (b) ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: O autor (2012).

## CAPÍTULO 4

### 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos das análises relacionadas aos materiais componentes do experimento, na sequência como foram apresentados no programa experimental.

#### 4.1 CIMENTO PORTLAND

##### 4.1.1 Composição Química

Para determinar os óxidos presentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{F}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}$ ) no cimento Portland CP II-F-32, utilizou-se a técnica de fluorescência de raio X, por dispersão de energia (EDX). Os resultados são apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22 – Composição química do cimento Portland CP II-F-32.**

Composição Química	(%)
Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ )	60,194
Dióxido de silício ( $\text{Si O}_2$ )	13,963
Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2 \text{O}_3$ )	4,970
Trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )	3,138
Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ )	2,777
Óxido de magnésio ( $\text{Mg O}$ )	1,185
Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0,426
Dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ )	0,337
Óxido de estrôncio ( $\text{Sr O}$ )	0,348
Dióxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ )	0,023
Óxido de manganês ( $\text{MnO}$ )	0,059
Óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ )	0,0018
Óxido de vanádio ( $\text{V}_2 \text{O}_5$ )	0,031
Perda ao fogo	4,42

Analisando os resultados apresentados na Tabela 22, depreende-se que o cimento Portland CP II-F-32 contempla as exigências da NBR 11578/91(ABNT, 1991), para cimento Portland composto ,apresentando o Trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )  $\leq 4,0\%$ ; Óxido de magnésio ( $\text{Mg O}$ )  $\leq 6,5\%$  e perda ao fogo  $\leq 6,5\%$ .

Os demais óxidos estão abaixo de 5%. De acordo com os resultados, é possível recomendar a utilização destes cimentos para a produção de argamassas de assentamento e

revestimento, concretos simples, armados e protendidos, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, dentre outros (ABCP, 2012).

#### 4.1.2 Massa Específica

A massa específica do cimento corresponde a encontrada por outros pesquisadores, como BEZERRA (2010), como mostra a Tabela 23.

**Tabela 23 – Massa específica dos cimentos.**

<b>Tipo de Cimento</b>	<b>Massa Específica (<math>\delta</math>) (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Cimento Portland CP II-F-32	3,07	Frasco Le Chatelier	NBR NM 23/2000

## 4.2 AGREGADO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA (ARTC)

### 4.2.1 Caracterização Física e Química

#### 4.2.1.1 Massa Específica

Para a determinação das massas específicas dos ARTC, estava previsto, inicialmente, o método de ensaio com o Frasco Chapmam (NM 52/2009). O ensaio prescreve o uso de 500 g de material seco a ser introduzido no recipiente contendo 200 cm<sup>3</sup> de água, porém, em determinado momento, o conjunto água/ART se torna uma pasta, inviabilizando o ensaio.

Essa mesma dificuldade foi relatada por Dias (2004) que, para determinar a massa específica de resíduos de telha na sua pesquisa, teve que recorrer a vários métodos e, ainda assim, fazendo adaptações para consegui-la. O motivo se deve ao fato da grande porosidade dos materiais cerâmicos e a presença de materiais finos, que acabam absorvendo o volume de água determinado pela norma para esse ensaio.

Dias (2004) compilou resultados de massa específica de telhas cerâmicas de várias regiões do Brasil, encontrando valores muito díspares, entre 1,68 g/cm<sup>3</sup> (Campo dos Goytacazes-RJ) e 2,10 g/cm<sup>3</sup> (Monte Carmelo-MG). Favini e Costa (2009) encontraram valores de massa específica de 2,27 g/cm<sup>3</sup> em agregados de telhas cerâmicas com 50 anos de uso, portanto próximos aos encontrados nesta pesquisa.

Neste trabalho, para a determinação da massa específica das três frações granulométricas, foram utilizados os métodos de Chapmam (fração areia) e o de Le Chatelier (frações pós e pedrisco). Cabe destacar que as quantidades requeridas de ARTC para os ensaios de Le

Chatelier foram: 45 g da fração pós e 50 g da fração pedrisco. Os resultados constam na Tabela 24.

**Tabela 24 – Massa específica dos ARTC.**

Faixas Granulométricas dos ARTC	Massa Específica ( $\delta$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio	Norma
Pós (fundo e 0,15 mm)	2,35	Frasco Le Chatelier	NBR NM 23/2000
Areia (0,3 e 0,6 mm)	2,32	Frasco Chapman	NBR NM 52/2009
Pedrisco (1,2 e 2,4 mm)	2,42	Frasco Le Chatelier	NBR NM 23/2000

#### 4.2.1.2 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com a Cal

Na Tabela 25, estão descritas as quantidades de material necessário para a moldagem de três corpos de prova, para a realização do ensaio para determinar o Índice de Atividade Pozolânica do ARTC com a cal, segundo a NBR 5751/92 (ABNT, 1992). Na Tabela 26, são apresentados os resultados dos rompimentos dos CP.

**Tabela 25 – Quantidade em massa para a moldagem de três corpos de prova.**

Material	Massa de Material para Três Corpos de Prova (g)	
	NBR 5751/1992	Ensaio
Cal	104	104
Areia normal (IPT)	936	936
Material pozolânico (CV)	$m = 2 \times \left(\frac{\delta_p}{\delta_c}\right) \times 104g$	199,5
Água (ml)	IC (NBR 7215) = (225±5) mm	260

$\delta_p$  = Massa específica da Cerâmica Vermelha = 2,35 g/cm<sup>3</sup>;  $\delta_c$  = Massa específica da cal = 2,45 g/cm<sup>3</sup>; IC = Índice de consistência da argamassa = 225,4 mm.

**Tabela 26 – Resultados da resistência à compressão.**

Material	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	DR (Max.) %
CV	3,1	2,9	3,2	3,1	6,4

Da Tabela 26, depreende-se que nenhum CP atingiu a resistência de 6 MPa exigida pela NBR 12653/92 (ABNT, 1992) e, ainda, o Desvio Relativo (DR) máximo ultrapassou o valor de 6% estabelecido na norma, que, para esses casos, recomenda a repetição do ensaio.

Existem muitos autores que tecem críticas à NBR 12653/92 (ABNT, 1992). Gava (1999) diz que a fixação da trabalhabilidade faz com que a demanda por água para pozolanas

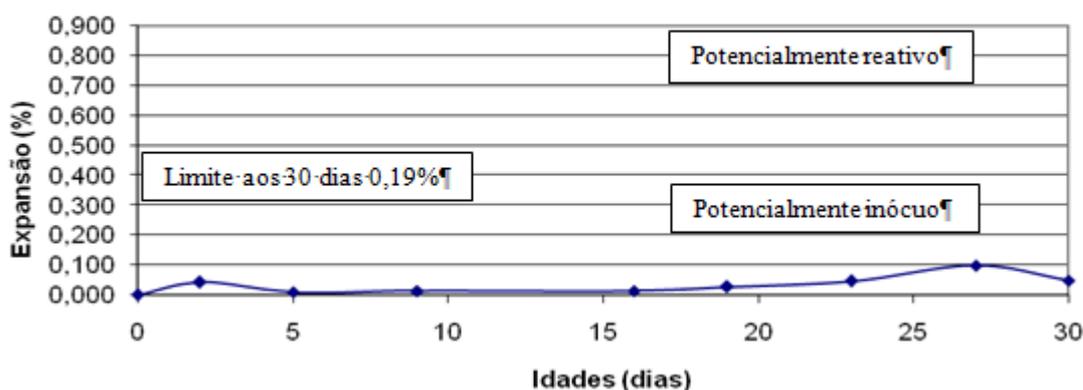
muito finas seja muito elevada, fazendo com que a resistência das argamassas com pozolanas seja diminuída, quando comparada com a argamassa padrão.

#### 4.2.1.3 Reatividade Potencial do ARTC – Reação Álcali-agregado

O ensaio para verificar a reatividade foi realizado segundo os procedimentos estabelecidos na NBR 15577-4/2008 (ABNT, 2008). Foram usadas duas argamassas contendo os ARTC e o cimento Portland CP II-32-F, sendo que, em uma argamassa, o cimento foi parcialmente substituído em 20% por CCAp (produzida em laboratório, ou seja, com controle de temperatura) e em outra por CCAn (cinza natural, sem controle de temperatura e moída em laboratório). Os resultados dos ensaios encontram-se nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Gráfico da reatividade potencial do cimento, ARTC e CCAp.

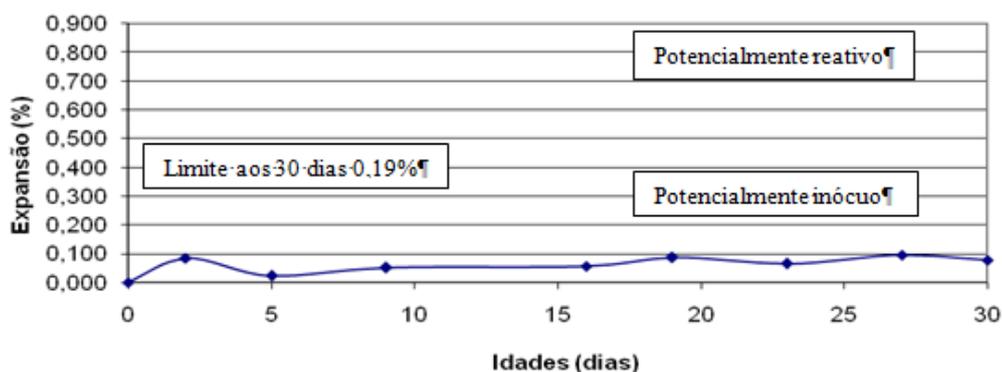
#### REATIVIDADE METODO ACELERADO - NBR 15577-4 - CCC



Fonte: O autor (2012).

Figura 36 – Gráfico da reatividade potencial do cimento, ARTC e CCAn

#### REATIVIDADE METODO ACELERADO - NBR 15577-4 - CSC



Fonte: O autor (2012).

Pode-se observar, pelos gráficos, que a mistura do cimento Portland CP II-32-F com o Agregado Reciclado de Telha Cerâmica, em uma proporção de CCA com e sem controle de temperatura, é potencialmente inócuo.

#### 4.2.1.4 Ensaio de Absorção de Água pelo ARTC

Existem muitos relatos sobre a dificuldade da realização de ensaios para verificar a absorção de água pelos agregados reciclados de cerâmica vermelha, normatizados segundo a NBR NM 30/2001 (AMN, 2001). Nesta pesquisa, também se constatou isso; mesmo assim, foram realizados ensaios com duas amostras de ARTC. Os resultados alcançados encontram-se na Tabela 27.

**Tabela 27 – Absorção de água pelos ARTC.**

<b>Amostras/Composição/Massa (g)</b>	<b>Taxa de Absorção (%)</b>
1ª amostra / 25:35:40 (pós: areia: pedrisco) / 250 g; 350 g; 400 g.	12
2ª amostra / 44:56 (areia: pedrisco) / 440 g; 560 g.	7

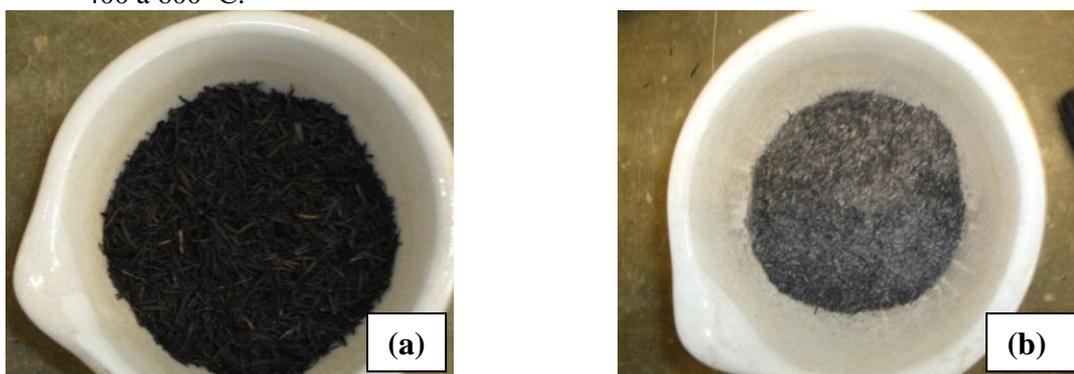
A primeira amostra contendo 25% de pós apresentou uma taxa de absorção de 12%, bem superior que a da segunda amostra (7%), realizada sem a presença do material fino. Comparando esse resultado com os de Santana e Costa (2009), que encontraram uma taxa de absorção de 11,79% com agregado miúdo de cerâmica vermelha, constata-se que a diferença se deve à presença dos finos na composição.

### 4.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

#### 4.3.1 Produção da CCA em Laboratório

As queimas da CA foram realizadas em duas etapas, no DACC/IFMT – Campus Cuiabá. Na primeira etapa da queima, ocorreu a ignição da massa da CA e percebeu-se a perda de massa, mas a CCA manteve uma granulometria próxima da casca antes da queima e com a cor muito escura, justificada pela presença do carbono. Na etapa seguinte, com a elevação da temperatura, ocorreu a queima do carbono residual, diminuindo ainda mais a massa e resultando num material mais claro e mais fino, conforme afirma Sugita (1992) (Figura 37).

Figura 37 – Etapas de produção de CCA: (a) primeira etapa, até 400° C e (b) segunda etapa, de 400 a 600° C.



Fonte: O autor (2012).

### 4.3.2 Caracterização Física, Química e Mineralógica das CCA

#### 4.3.3.1 Massa Específica

A massa específica dos dois tipos de cinza foi determinada pelo ensaio do Frasco de Le Chatelier (NBR NM 23/2000). Para este ensaio, utilizaram-se apenas 45 g de CCA. Os resultados constam na Tabela 28.

**Tabela 28 – Massa específica das CCA.**

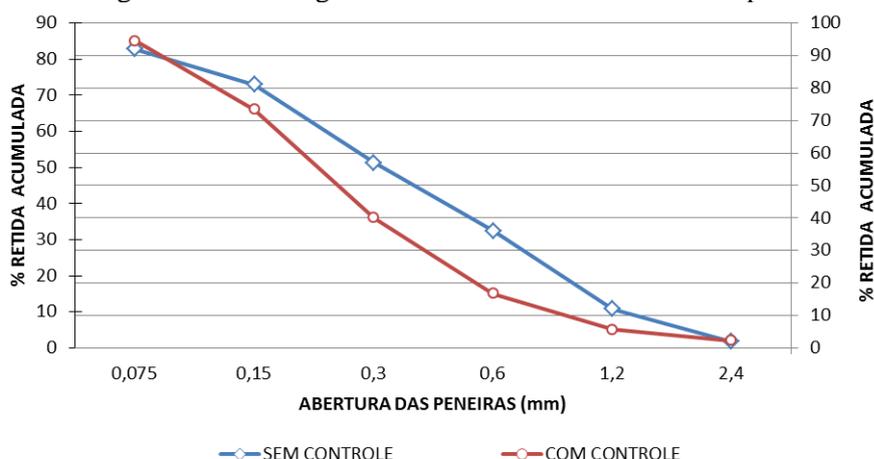
Cinza de Casca de Arroz (CCA) (NBR NM 23/2000)	Massa Específica ( $\delta$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
CCAn	1,91
CCAp	2,00

#### 4.3.3.2 Determinação da Granulometria da CCAn e da CCAp

Nesta pesquisa, a CCAn foi usada após o processo de cominuição de suas partículas tendo em vista o aumento da superfície específica decorrente, possibilitando melhorias na sua pozolanicidade com a ação do chamado efeito “filler” na mistura (CORDEIRO, 2009).

A realização deste ensaio com as CCAn e CCAp foi com a intenção de demonstrar que mesmo a cinza natural coletada na indústria possui parcela expressiva de material fino na sua composição granulométrica. O ensaio foi baseado na NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003) (Figura 38).

Figura 38 – Curva granulométrica das CCAn e da CCAp.



Fonte: O autor (2012).

Analisando-se o gráfico da Figura 38, percebe-se que a retenção da CCAn (coletada na indústria, sem controle de temperatura de queima) é maior que a da CCAp (produzida em laboratório, com controle de temperatura de queima). Na peneira 0,3 mm, por exemplo, o percentual de CCAn é de 57%, enquanto que, nessa peneira, a retenção da CCAp é de 36%. Mesmo assim, a cinza coletada na indústria contém um percentual expressivo de material fino na sua composição.

#### 4.3.3.3 A Determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das CCA

A realização destes ensaios ocorreu na fase inicial desta pesquisa. Para determinar o IAP das CCA, foi utilizado o cimento Portland CP IV-32 RS, conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 5752/92 (ABNT, 1992), cujos resultados estão transcritos nas Tabelas 29 e 30.

**Tabela 29 – Resultados da resistência à compressão.**

Material	CP (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	DR máx.
Argamassa A	24,9	23,4	22,6	23,6	5,5
Argamassa CCAp	15,5	14,8	15,5	15,3	3,3
Argamassa CCAn	13,5	14,1	14,6	14,1	4,2

**Tabela 30 – Resultados do índice de atividade pozolânica e água requerida.**

	Argamassa CCAp (%)	Argamassa CCAn (%)
<b>Índice de Atividade Pozolânica (IAP)</b>	64,8	59,8
<b>Água requerida (%)</b>	112,8	111,7

Da análise da Tabela 29, depreende-se que o Desvio Relativo máximo (DR máx.) está dentro da margem estabelecida pela NBR 5752/1992 (ABNT, 1992), ou seja, encontra-se abaixo de 6%.

Os IAP transcritos na Tabela 30 demonstram que nenhuma das argamassas moldadas com as CCAp e CCPn atingiram as exigências físicas de 75% estabelecidos pela NBR 12653/1992 (ABNT, 1992) para serem consideradas pozolânicas. Weber (2001) comenta que este método tem limitações, já que os resultados podem ser facilmente influenciados por fatores externos como, por exemplo, a composição do cimento usado e a variação da relação água/aglomerante.

O fato de as argamassas deste ensaio não terem apresentado valores conforme as exigências da norma pode ser explicado pelo tipo do cimento utilizado, que foi o CP IV- 32 RS, corroborando as observações feitas por Weber (2001), já que este cimento é rico em pozolana, contribuindo para influenciar no ensaio no qual se busca a pozolanicidade das CCA. Este foi o fator principal que determinou a mudança do cimento CP IV-32 RS pelo CP II-F-32.

A Tabela 31 demonstra também que a água requerida nas duas argamassas está acima das referências estabelecidas pela NBR 12653/1992 (ABNT, 1992) para pozolanas classificadas como Classe E, na qual a CCA está enquadrada. A crítica de Gava (1999) neste quesito é com relação à fixação da trabalhabilidade, que faz com que a demanda por água para pozolanas muito finas seja bastante elevada. Assim, a resistência das argamassas com pozolanas diminui, quando comparada com a argamassa padrão.

#### **4.3.3.4 Análise Química das CCA**

As análises químicas das CCA foram feitas no Laboratório LAMUTA-UFMT através da técnica de fluorescência de raio X por dispersão de energia (EDX). Os resultados estão transcritos na Tabela 31.

**Tabela 31 - Composição química das CCAp e CCAn.**

<b>Composição Química das CCA</b>		<b>CCAp (%)</b>	<b>CCAn (%)</b>
Dióxido de silício	(Si O <sub>2</sub> )	86,600	88,093
Óxido de potássio	(K <sub>2</sub> O)	3,383	2,777
Óxido de fósforo	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,667	2,949
Óxido de cálcio	(CaO)	2,103	1,850
Óxido de alumínio	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,727	2,020
Trióxido de enxofre	(SO <sub>3</sub> )	1,223	0,283
Óxido de magnésio	(Mg O)	1,158	0,935
Óxido de ferro	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,795	0,759
Óxido de manganês	(MnO)	0,279	0,251
Óxido de zinco	(ZnO)	0,033	0,030
Óxido de cobre	(CuO)	0,021	0,023
Óxido de rubídio	(RbO)	0,012	0,011
Óxido de estrôncio	(SrO)	–	0,009
Perda ao fogo		0,04	Não determinado

Pela NBR 12653/1992 (ABNT, 1992), para que um material seja considerado pozolânico, os elementos Si O<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub> devem estar presentes em mais de 70%, para as Classes N e C, e 50% na Classe E. O teor máximo de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) deve estar abaixo de 4%, para a Classe E, e 5%, para as Classes C e E. Conforme se verifica na Tabela 31, as CCA analisadas satisfazem as exigências químicas da norma.

Entretanto, há autores que fazem reservas a esta exigência. Gava (1999), por exemplo, comenta que a soma de 70% de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pode até existir, porém, se esses elementos estiverem na forma cristalina, as atividades pozolânicas ficam prejudicadas, ou mesmo não existem.

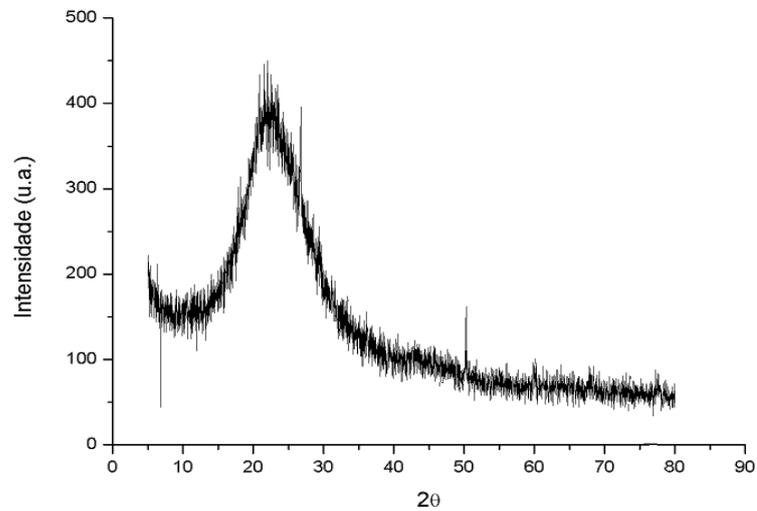
#### **4.3.3.5 Análise Mineralógica das CCA**

A realização deste ensaio é importante, pois identifica as fases cristalinas presentes nas pastas. É efetuado por análise dos picos presentes no difratograma e pela comparação com bancos de dados específicos. Com este ensaio, é possível determinar quanto uma amostra é amorfa ou cristalina.

##### **a) Cinza de Casca de Arroz produzida em laboratório (CCAp)**

Na Figura 39, é apresentado o difratograma de raio X da CCAp, realizado no Laboratório LAMUTA-DRM-UFMT.

Figura 39 – Difratoograma de raio X da CCAp.



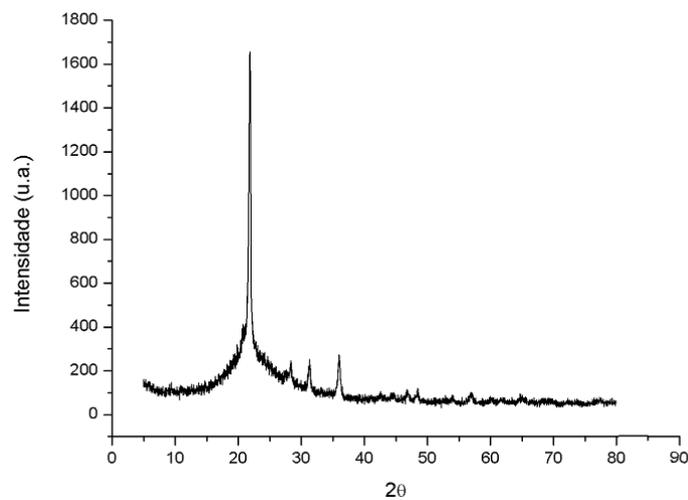
Fonte: O autor (2012).

Observa-se que a CCAp revela o comportamento de um material amorfo, apresentando uma banda correspondente a material amorfo obtida a  $21^\circ$ . Della et al. (2001), citados por Bezerra (2010), obtiveram o mesmo comportamento, relacionando a obtenção destes resultados para a banda aos  $21^\circ$  com a possibilidade de ser uma sílica amorfa.

#### **b) Cinza de Casca de Arroz Natural da Indústria (CCAn)**

Na Figura 40, é apresentado o difratograma de Raio X da CCAn, realizado no Laboratório LAMUTA-DRM-UFMT.

Figura 40 – Difratoograma de Raio X da CCAn.



Fonte: O autor (2012).

A CCAn coletada na indústria não passou por um processo de combustão controlado, porém, no seu espectro (Figura 40), constata-se a nítida verificação da transformação das fases, observada também por Cordeiro (2009) em CCA produzida com 800° C. Na análise de cinza incinerada a esta temperatura, a pesquisadora observou a redução do halo amorfo e a formação de pico de cristobalita, que vai se tornando mais definido à medida que a temperatura aumenta.

Apesar de não se saber a temperatura exata na qual a CA é incinerada, percebe-se que a CCAn coletada na indústria para esta pesquisa esteve exposta a temperaturas mais elevadas que 700° C.

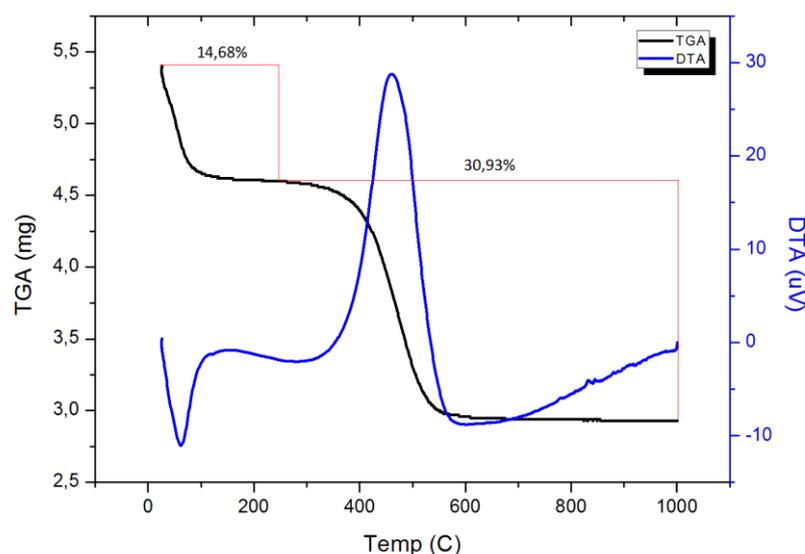
#### 4.3.3.6 Análise Térmica das CCA

Os fenômenos de transformação, tais como desidratações, decomposições, mudanças de fase e reações químicas acompanhadas de efeitos endotérmicos e exotérmicos nos processos de combustão das cinzas usadas nesta pesquisa, são ilustrados nas Figuras 41 e 42 e foram observados no Laboratório LAMUTA-DRM-UFMT.

##### a) Cinza de Casca de Arroz Produzida em Laboratório (CCAp)

Na Figura 41, é apresentado análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAP, realizado no Laboratório LAMUTA-DRM-UFMT.

Figura 41 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAP.



Fonte: O autor (2012).

A partir das análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAP, constatou-se que, na curva da análise termogravimétrica (TGA) da CCAP, entre 50° C e 100° C, tem-se

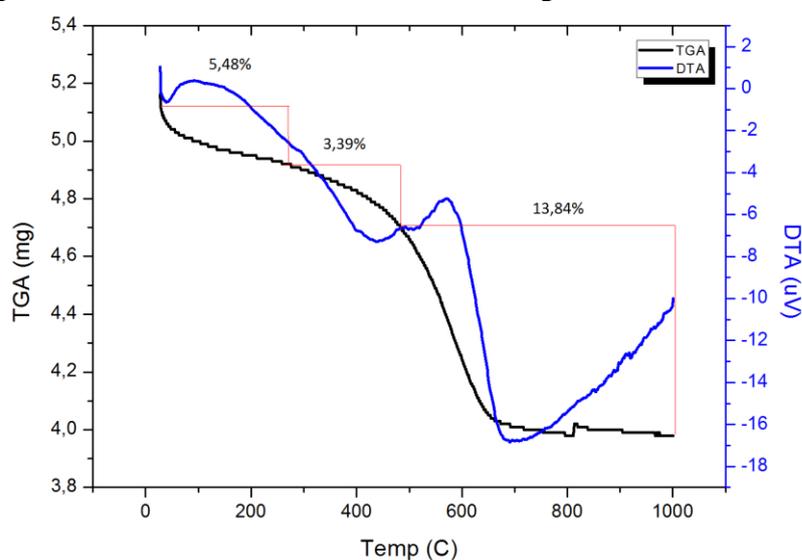
uma perda acentuada de massa de 14,68%, provavelmente decorrente da eliminação da água adsorvida superficialmente. Pouey (2006) também identificou este estágio inicial de perda de massa. Aproximadamente em torno de 70° C, aparece um pico endotérmico na curva de análise térmica diferencial (DTA), também devido à perda de água adsorvida, etapa que se completa por volta de 100° C.

Entre 250° C e 550° C, observa-se a maior perda de massa, de 30,93%, devido à eliminação de água de constituição, materiais voláteis e combustão de carbono. Em 480° C, evidencia-se um pico exotérmico na curva DTA característica da combustão do carbono. Weber (2001) também observou este pico, nessa temperatura. Em torno de 600° C, ocorre outra manifestação endotérmica.

### b) Cinza de Casca de Arroz Natural da Indústria (CCAn)

O comportamento térmico (estabilidade e decomposição), ou seja, as faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações endotérmicas e exotérmicas das CCAn, está ilustrado na Figura 42, e foi observado no Laboratório LAMUTA-DRM-UFMT.

Figura 42 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica das CCAn.



Fonte: Ao autor (2012).

Em relação à CCAn, observa-se uma perda total de massa de 22,71%, entre 50° C e 650° C, na curva da análise termogravimétrica (TGA). As perdas iniciais, correspondentes a 5,48%, acontecem entre 50° C e 100° C, o que também foi observado por Pouey (2006) e é decorrente da eliminação de água adsorvida superficialmente. Depois, verifica-se uma perda suave de 3,39% e outra mais acentuada de 13,84%, entre 400° C e 650° C, devido à eliminação de água de constituição, materiais voláteis e combustão de carbono.

Em torno de 70° C, aparece um pico endotérmico na curva de análise térmica diferencial (DTA), que acusa uma mudança de fase, também observada por Weber (2001) e Pouey (2006), devido à perda de água adsorvida superficial, etapa que se completa por volta de 100° C. Nesta cinza, o pico exotérmico, que caracteriza a combustão do carbono, só aparece em torno de 600° C. Este comportamento demonstra que o processo de queima na indústria ocorre inconstantemente, já que a CA, quando insuflada na fornalha, é incinerada imediatamente e chega a não atingir a temperatura em que ocorre a combustão do carbono.

#### 4.4 FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS

##### 4.4.1 Empacotamentos Experimental e Teórico

O resultado dos empacotamentos experimental e teórico está transcrito na Tabela 32.

**Tabela 32 – Valores dos empacotamentos experimental e teórico.**

Tipos de Composição (%)			Média da $M_{ar}^1$ (g)	Massa Unitária Compactada <sup>2</sup> MUC = $(M_{ar} - M_r)/V_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica <sup>3</sup> (g/c <sup>3</sup> ) ( $\delta$ )			Massa Específica da Mistura ( $\delta t$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios <sup>4</sup> (Iv) (%)
Pós	Areia	Pedrisco			Pós	Areia	Pedrisco		
10	25	65	7.287,5	1,29	2,3 5	2,32	2,42	2,38	45,86
15	30	55	7.347,5	1,32	2,3 5	2,32	2,42	2,37	44,37
20	30	50	7.382,5	1,33	2,3 5	2,32	2,42	2,37	43,58
25	35	40	7.392,5	1,34	2,3 5	2,32	2,42	2,36	43,13
15	25	60	7.307,5	1,30	2,3 5	2,32	2,42	2,38	45,37
10	20	70	7.221,25	1,25	2,3 5	2,32	2,42	2,39	47,49
15	65	20	7.231,25	1,26	2,3 5	2,32	2,42	2,33	45,81

<sup>1</sup> $M_{ar}$  (massas do agregado + recipiente). Para cada composição, foram feitas 4 pesagens e calculada a média; <sup>2</sup> $M_r$  = Massa do recipiente = 4.655 g;  $V_r$  = Volume do recipiente = 2.040 cm<sup>3</sup>; <sup>3</sup>Massa específica de cada faixa granulométrica; <sup>4</sup>Iv = Índice de vazios da mistura, em %.

#### 4.4.1.1 Definição do Empacotamento

O método do empacotamento teórico (O'REILLY DÍAZ, 2005), objetiva determinar a composição experimental que apresente a maior massa específica e o menor índice de vazio. Conforme se depreende pela tabela 32, a composição que apresentou a maior massa específica foi aquela que contém 10%: 20%: 70% (pós: areia: pedrisco) e a que apresentou o menor índice de vazios foi a 25%: 35%: 40% (pós, areia, pedrisco).

Utilizando a composição que apresentou a maior massa específica (10%: 20%: 70) o tijolo resultante apresentou uma textura mais áspera devido ao alto percentual da fração pedrisco na mistura., Figura 43.

Figura 43 – Tijolo moldado com a composição 10: 20: 70 (textura mais áspera).



Fonte: O autor (2012).

Utilizando a composição que apresentou o menor índice de vazios (25: 35: 40) o tijolo resultante apresentou uma textura mais fina, devido ao aumento de agregados finos na composição, Figura 44.

Figura 44 – Tijolo moldado com a composição 25: 35: 40 (Textura mais Fina).



Fonte: O autor (2012).

Há que se fazer uma observação em relação à fôrma para a moldagem dos tijolos. O tijolo moldado na Figura 43 apresenta o encaixe tipo “macho” na sua face superior, conforme a fôrma original do fabricante da prensa utilizada na moldagem dos tijolos. Observou-se que esse encaixe aumentava muito a espessura do capeamento, prejudicando os ensaios de rompimento. Por isso, na segunda fase da pesquisa, foi fabricada uma nova fôrma sem o encaixe tipo “macho”, a fim de facilitar o capeamento (Figura 44).

#### 4.4.2 Ensaios de Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo os métodos de ensaios e requisitos para blocos vazados de concreto simples para alvenaria, estabelecidos respectivamente pela NBR 12118/2010 (ABNT, 2010) e NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). Foram moldados 18 tijolos para cada tipo de amostra pesquisada: tijolo referência; tijolos com CCAn e CCAp substituindo, em 20%, 25% e 30%, o cimento Portland CP II- 32- F no traço 1;9. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias. Os resultados constam na tabela 33.

**Tabela 33 – Porcentagem de aglomerantes e resistência característica ( $f_{bk}$ ) à compressão dos tijolos nas idades de 7, 14 e 28 dias.**

Tipo de Tijolo	Cimento (%)	CCAn (%)	CCAp (%)	Resistência (MPa)		
				7 Dias	14 Dias	28 Dias
Tijolo Referência	100	–	–	2,56	1,96	1,77
Tijolo 1	80	20		1,67	2,15	1,54
Tijolo 2	80	–	20	1,39	1,28	1,26
Tijolo 3	75	25	–	1,40	0,91	1,06
Tijolo 4	75	–	25	1,09	1,18	1,30
Tijolo 5	70	30	–	1,02	1,00	0,85
Tijolo 6	70	–	30	1,07	0,93	0,97

##### 4.4.2.1 Metodologia de Cálculo das Resistências

Para demonstrar a metodologia utilizada para a obtenção, por exemplo, do valor representativo da resistência aos 14 dias do tijolo 1 (tabela 33), são transcritos, na Tabela 34, os valores individuais das resistências encontradas dos 6 corpos de prova representativos do tijolo 1.

**Tabela 34 – Resistências individuais dos 6 CP das amostras do tijolo 1 (20% CCA<sub>n</sub>).**

Idade do Ensaio	Resistência dos Corpos de Prova (MPa)					
	CP1	CP2	CP3	CP5	CP5	CP6
7 dias	2,00	1,95	1,70	2,06	1,73	1,70
14 dias	2,21	2,63	2,52	2,83	2,36	2,42
28 dias	1,74	2,14	1,80	2,08	2,22	2,31

A NBR 6136/2007 (ABNT, 2007) estabelece que os valores individuais das resistências devem ser ordenados, *de forma crescente*, segundo a Equação 4.1:

$$f_{bk\ est} = 2 \left[ \frac{fb(1)+fb(2)+\dots+fb(i-1)}{i-1} \right] - fbi \quad (4.1)$$

Onde:

$i = n/2$ , se  $n$  for par; neste caso, sendo  $n = 6$ , então  $i = 3$ ;

$i = (n-1)/2$ , se  $n$  for ímpar;

Se  $fb(1) = 2,21$  MPa;  $fb(2) = 2,36$  MPa; e  $fbi = 2,42$  MPa, então  $f_{bk\ est} = 2,15$  MPa.  $f_{bk\ est}$  é a resistência característica estimada da amostra e expressa em  $g/cm^2$ . A resistência característica da amostra ( $f_{bk}$ ) deve ser igual a  $f_{bk\ est}$ , não sendo admitido valor inferior a  $\psi \cdot fb(1)$ .

Em relação à resistência característica da amostra ( $f_{bk}$ ) do tijolo 1 para a idade de 28 dias (Tabela 34), na qual é verificado um declínio da resistência em relação à da idade de 14 dias, é prudente esclarecer que a fórmula para o cálculo da  $f_{bk\ est}$  estabelecida pela NBR 6136/2007 (ABNT, 2007) é destinada para lotes de amostras maiores que os utilizados nesta pesquisa.

Neste caso, em que foram utilizados apenas 6 CP (número mínimo, pela norma) para os ensaios de rompimento, os valores ficaram distorcidos nos casos em que se verificaram uma grande diferença no CP, que apresentou o menor desempenho com o conjunto restante da amostra. Para ilustrar, apresenta-se o caso do tijolo referência, cujas resistências individuais dos CP estão transcritas na Tabela 35.

**Tabela 35 – Resistências individuais dos 6 CP das amostras do tijolo referência.**

Idade do Ensaio	Resistência dos Corpos de Prova (MPa)					
	CP1	CP2	CP3	CP5	CP5	CP6
7 dias	3,26	2,70	3,03	2,89	3,15	3,39
14 dias	3,31	4,41	4,77	2,21	4,23	4,30
28 dias	3,15	3,37	3,21	3,34	1,99	3,14

Para a obtenção da  $f_{bk\ est}$  da amostra do tijolo referência na idade de 14 dias, utilizou-se a seguinte metodologia, conforme a Equação 4.2:

$$f_{bk\ est} = 2 \left[ \frac{fb(1)+fb(2)+\dots+fb(i-1)}{i-1} \right] - fbi, \quad (4.2)$$

Onde:

$i-1 = 2; fb(1) = 2,21$  MPa;

$fb(2) = 3,31$  MPa;

$fbi$  (3º CP) = 4,23 MPa.

Então,  $f_{bk\ est} = 1,29$  MPa, valor 300% menor que a média da amostra = 3,87 MPa.

Neste caso, a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007) estabelece que o valor da resistência característica da amostra ( $f_{bk}$ ) não pode ser menor que a resistência do corpo de prova, que apresentou o menor desempenho multiplicado por um fator de correção, conforme a Equação 4.3:

$$\text{Se } f_{bk\ est} < [fb(1) \times \psi], \text{ adota-se } f_{bk} = [fb(1) \times \psi] \quad (4.3)$$

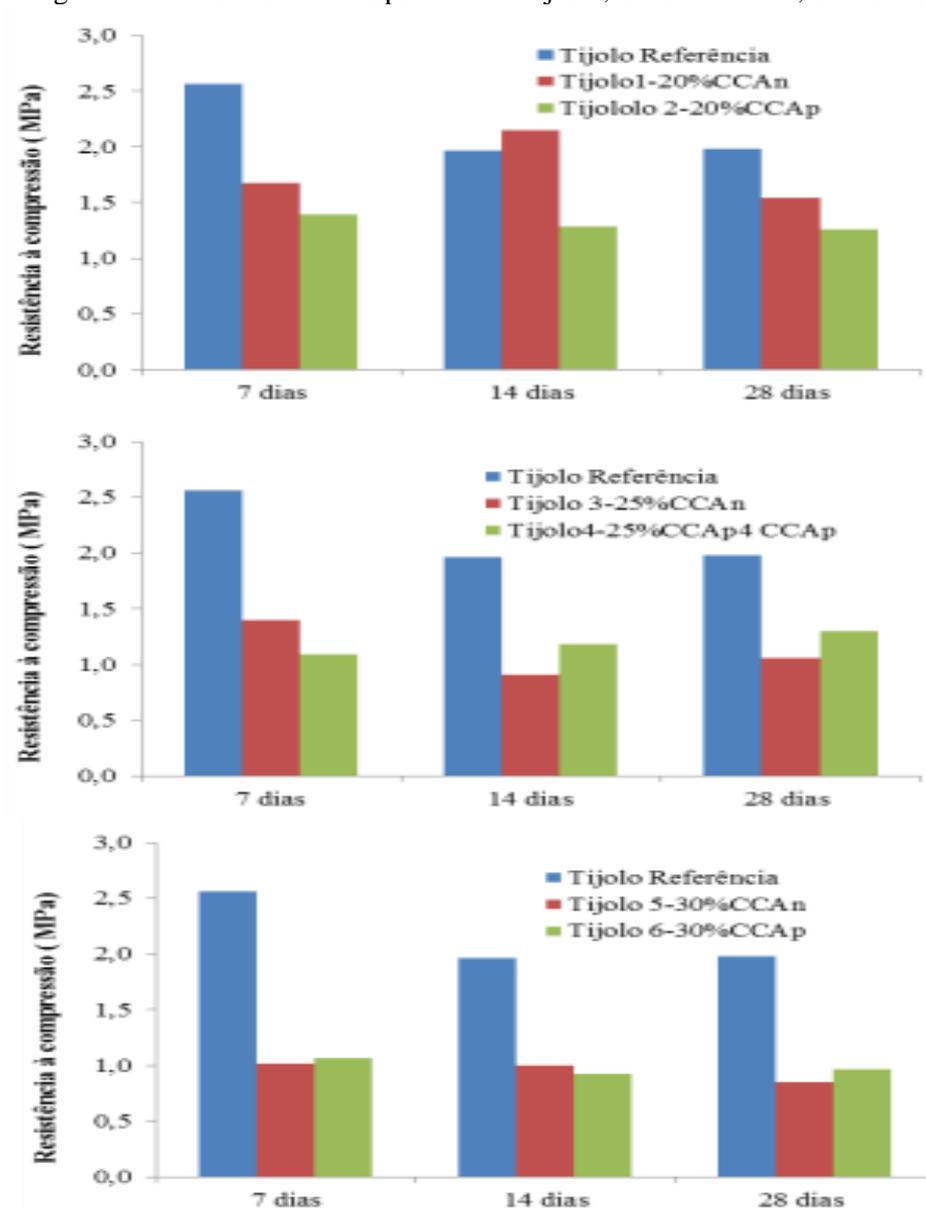
Segundo a norma, para 6 CP, o valor é de  $\psi = 0,89$ , portanto  $[fb(1) \times \psi] = 1,96$  MPa, adotado para a resistência característica da amostra aos 14 dias.

#### 4.4.2.2 *Análise dos resultados em relação ao percentual de cca utilizada*

Os gráficos a, b e c da Figura 47 ilustram o comportamento dos tijolos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 nos ensaios de resistência à compressão, tendo sempre como comparação o tijolo referência, moldado sem adição de CCA.

Os resultados das resistências à compressão (Tabela 33) foram organizados em gráficos, a fim de se comparar o desempenho do tijolo referência com os tijolos de ARTC moldados com os dois tipos de CCA e nas proporções de 20%, 25% e 30% (Figura 45).

Figura 45 – Resistência à compressão nos tijolos, nas idades de 7, 14 e 28 dias.



Fonte: O autor (2012).

Analisando os resultados (tabela 33) e os gráficos ilustrativos da figura 45 constata-se que há um declínio da resistência do tijolo referência na idade de 14 dias. Apesar disso o tijolo referência, com exceção da situação da figura 45 (a) aos 14 dias, apresentou desempenho mecânico melhor que os demais tijolos moldados com a presença de CCA. Nas ilustrações (b) e (c) da figura 45 percebe-se o declínio das resistências dos tijolos 3,4, 5 e 6 moldados com 25% e 30% de CCA quando comparados com os tijolos referência e tijolos 1 e 2 (20% de CCA). Ficou evidente nesta análise que a adição de CCA (de qualquer tipo) nos percentuais de estabelecidos para a pesquisa prejudicou o desempenho mecânico desses tijolos.

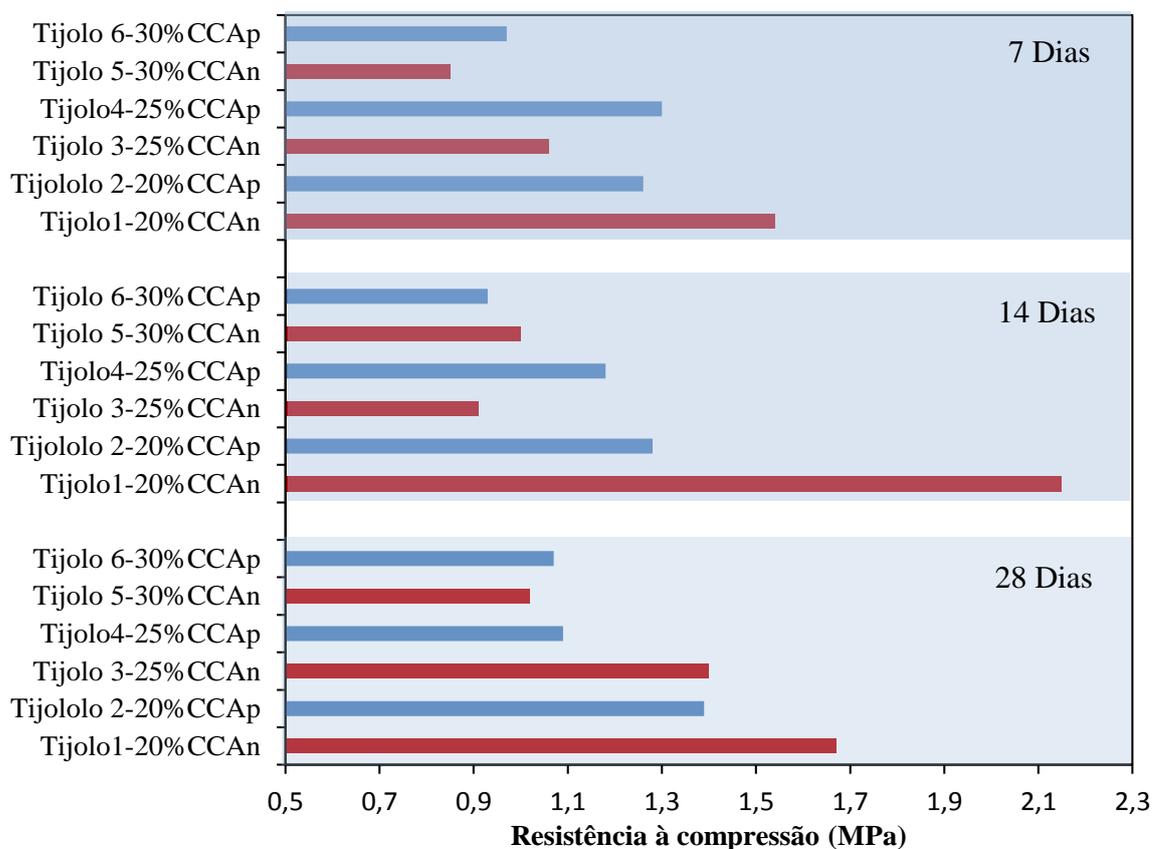
#### 4.4.2.3 Análise dos resultados em relação ao tipo de CCA utilizada

Na literatura, é consenso que variáveis como temperatura de queima, tempo de residência, atmosfera de calcinação e taxa de aquecimento influenciem diretamente tanto nas propriedades físico-químicas quanto na estrutura morfológica da CCA (TASHIMA, 2012).

A queima da CA realizada no laboratório do DACC/IFMT – Campus Cuiabá, para a produção de CCAp, foi executada dentro do método de queima em dois tempos, sugerida por Sugita (1992), portanto com temperatura controlada e teoricamente de melhor qualidade que a CCAn fornecida pela indústria, sem controle na temperatura de queima.

A fim de investigar se o tipo de CCA influenciou nos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos, os desempenhos dos tijolos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram ordenados pela idades e percentuais dos dois tipos de CCA utilizadas no experimento (Figura 46).

Figura 46 – Comparação das resistências dos tijolos com as CCAn e CCAp, nos percentuais e idades dos ensaios.



Fonte: O autor (2012).

Na análise dos resultados apresentados na Figura 46, fica evidenciado que o tijolo 1, com adição de 20% de CCAn, teve desempenho melhor que o tijolo 2, que teve adição

de 20% de CCAp, nas três idades dos ensaios, portanto contrariando a expectativa estabelecida na literatura. Aos 14 dias, o tijolo 1 teve um desempenho 60% maior que o tijolo 2.

Na composição com 25% de CCA, o tijolo 4, com adição de CCAp, apresentou, nas idades de 7 e 14 dias, desempenho mecânico melhor que o tijolo 3, com adição de CCA<sub>n</sub> na mesma idade. Entretanto, aos 28 dias, o tijolo 3 apontou uma resistência maior que o tijolo 4. Quando a composição possui 30% de adição de CCA, o comportamento mecânico dos tijolos 5 (CCA<sub>n</sub>) e 6 (CCA<sub>p</sub>) tem pouca variação, observando-se um declínio de ambos. A conclusão em relação a este quesito é que o tipo de CCA utilizado não influenciou na qualidade dos tijolos. Fica evidente, porém, que a substituição do cimento pela CCA, na confecção de tijolos de ARTC, deve se limitar a 20%.

#### ***4.4.2.4 Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 6136:2007 (ABNT, 2007)- Resistência à compressão***

O objetivo desta pesquisa foi produzir um tijolo prensado a partir da utilização de Agregados Reciclados de Telhas Cerâmicas (ARTC), cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz (CCA) que fosse técnica, econômica e ambientalmente viável. Os métodos de ensaios adotados no processo de sua produção foram baseados na NBR 12118/2010 (ABNT, 2010) e os requisitos estabelecidos pela NBR 6136/2007 (ABNT, 2007) para blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

Apesar de guardar – pela conformidade da forma, dimensões e texturas – certa similaridade com tijolos de solo-cimento, a opção adotada para balizar esta pesquisa foi a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007). A justificativa se deve em razão do uso, no tijolo, de agregados (embora reciclados) tais quais os blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

Segundo essa norma, a classificação dos blocos se dá por Classes, como mostra a Tabela 36.

**Tabela 36 – Classes dos blocos vazados de concreto simples (NBR 6136/2007 (ABNT, 2007)).**

<b>Classificação</b>	<b>Destinação de Uso</b>
Classe A	Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo.
Classe B	Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.
Classe C	Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo (no máximo, um pavimento).
Classe D	Sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Os requisitos mecânicos estabelecidos nessa norma encontram-se na Tabela 37.

**Tabela 37 – Requisitos para resistência característica à compressão (NBR 6136/2007 (ABNT, 2007)).**

Classe	Resistência Característica (MPa)
A	$\geq 6,0$
B	$\geq 4,0$
C	$\geq 3,0$
D	$\geq 2,0$

À luz da NBR 6136:2007 (ABNT, 2007), com exceção do tijolo referência, nenhum dos tijolos de ARTC com adição de CCA atingiu os requisitos mínimos de resistência para serem classificadas nas Classes estabelecidas pela norma.

4.4.2.5 Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 10.834/2012 (ABNT, 2012) quanto à resistência à compressão

Se, entretanto, em lugar da NBR 6136:2007 (ABNT, 2007), fosse utilizada a NBR 10.834/2012 (ABNT, 2012), que estabelece as condições exigíveis para o recebimento de blocos vazados de solo-cimento comuns, destinados à execução de alvenaria sem função estrutural os procedimentos seriam os seguintes:

**a) Método de ensaio – NBR 10.836/2013 (ABNT,2013)**

Esta norma estabelece como são feitos os ensaios para a análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Em relação aos ensaios de resistência à compressão seguem-se os mesmos procedimentos de rompimento, inclusive no capeamento dos corpos de prova.

**b) Resultados do ensaio de resistência**

A norma estabelece que a resistência média dos corpos-de-prova (CP) deve ser obtida pela média das tensões de ruptura, observada no lote ensaiado. À luz desta norma, apenas o tijolo referência e o tijolo 1 atingiram as resistência igual ou maior que 2 MPa, aos 28 dias, para o uso em alvenaria de vedação conforme Tabela 38.

Tabela 38 – Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 10.834/2012 (ABNT, 2012).

	Resistência dos Corpos-de-Prova- 28 dias (MPa)						Média (MPa)	NBR 10.834/2012
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6		
<b>Tijolo ref.</b>	3,15	3,37	3,21	3,34	1,99	3,14	3,03	≥ 2 MPa
<b>Tijolo 1</b>	1,74	2,14	1,80	2,08	2,22	2,31	2,04	
<b>Tijolo 2</b>	2,06	1,42	1,87	2,12	1,48	2,25	1,86	
<b>Tijolo 3</b>	1,38	1,42	1,09	1,20	1,37	1,23	1,28	
<b>Tijolo 4</b>	1,58	1,55	1,31	1,56	1,57	1,69	1,54	
<b>Tijolo 5</b>	0,90	1,01	1,01	0,96	1,05	1,01	0,99	
<b>Tijolo 6</b>	1,14	1,31	1,03	1,01	1,07	1,26	1,13	

#### 4.4.2.5 Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 7170/1983 (ABNT, 1983) e a NBR 6460/1983 (ABNT, 1983)- quanto à resistência à compressão

Outra simulação que se faz é se, em lugar da NBR 6136:2007 (ABNT, 2007), fosse utilizado as NBR 7170/1983 (ABNT, 1983) e a NBR 6460/1983 (ABNT, 1983)- que tratam, respectivamente, das exigências para recebimento de tijolos maciços cozidos para alvenaria e métodos de ensaios à compressão desses tijolos.

Apesar do tijolo de ARTC, da pesquisa em foco, não passar pelo processo de queima, a simulação utilizando as normas, acima referidas, se faz necessária devido à semelhança na conformidade das medidas e do próprio agregado reciclado constituinte do tijolo de ARTC, proveniente de telhas cerâmicas, que também passou por processo de queima. As NBR 7170/1983 (ABNT, 1983) e a NBR 6460/1983 (ABNT, 1983) estabelecem o seguinte:

##### a) Método de ensaio – NBR 6460/1983 (ABNT,1983)

Os tijolos maciços para serem ensaiados devem ser cortados, na sua maior dimensão, ao meio e suas metades coladas, com argamassa, de modo a formar um bloco. Devem passar pelo capeamento e após, submersos em água por 24 horas e, antes do ensaio de compressão, suas superfícies devem ser secas. Deve-se medir suas superfícies e a média da força aplicada, em N, dividida pela média das áreas das superfícies e o resultado expresso em MPa.

##### b) Método de ensaio – NBR 7170/1983 (ABNT, 1983)

Esta norma classifica o tijolo ensaiado, conforme a resistência apresentada nos ensaios, em três categorias: A (1,5 MPa); B (2,5 MPa) e C (4 MPa).

À luz desta norma, e conforme dados extraídos das médias das resistências dos tijolos de ARTC (Tabela 39), o tijolo referência pode ser classificado como categoria B e os tijolos 1, 2 e 4 podem ser classificados como categoria A, de acordo com a Tabela 39.

**Tabela 39 – Classificação dos tijolos de ARTC segundo a NBR 7170/ 1983 (ABNT, 1983).**

	<b>Média das resistências em (MPa)</b>	<b>NBR 7170/1983</b>
<b>Tijolo ref.</b>	3,03	Categoria B >2,5 MPa
<b>Tijolo 1</b>	2,04	Categoria A >1,5 MPa
<b>Tijolo 2</b>	1,86	Categoria A >1,5 MPa
<b>Tijolo 3</b>	1,28	
<b>Tijolo 4</b>	1,54	Categoria A >1,5 MPa
<b>Tijolo 5</b>	0,99	
<b>Tijolo 6</b>	1,13	

#### **4.4.3 Ensaio de Absorção de Água por Imersão**

Um dos objetivos da realização deste experimento foi o de investigar se a presença, a quantidade e o tipo de CCA influenciam na absorção de água pelos tijolos quando comparados com o tijolo referência.

Outro objetivo foi o de estabelecer uma correlação da capacidade de absorção com os resultados das resistências à compressão. Segundo Bezerra (2010), a taxa de absorção é inversamente proporcional à resistência à compressão simples, ou seja, quanto maior a resistência menor a absorção.

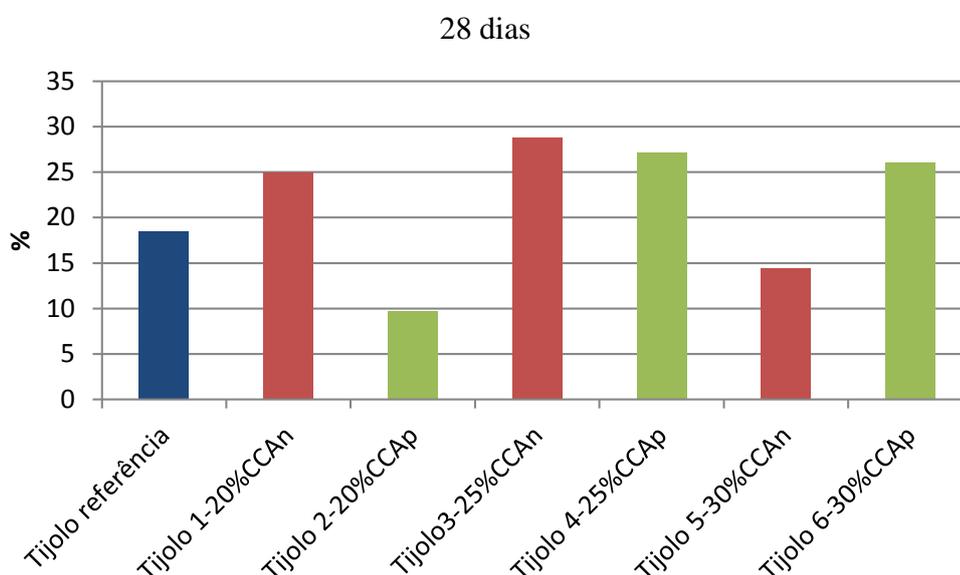
Bezerra (2010) investigou esse fenômeno ao de longo de três idades: 28, 63 e 91 dias. Segundo a autora, a observação por um período mais dilatado possibilita verificar o comportamento nesse período e se a presença de CCA nas misturas contribui para reduzir a taxa de absorção, já que muitos autores afirmam que há um aumento da atividade pozolânica da CCA com o passar do tempo.

O ensaio de absorção de água por imersão para esta pesquisa foi realizado com os tijolos moldados com a idade de 28 dias. Os resultados do ensaio estão transcritos na tabela 40 e ilustrados na Figura 47.

**Tabela 40 – Percentual de absorção de água por imersão.**

Tipo de Tijolo	Absorção aos 28 Dias (%)
Tijolo referência	18,55
Tijolo 1 – 20% CCAn	24,95
Tijolo 2 – 20% CCAp	9,76
Tijolo 3 – 25% CCAn	28,8
Tijolo 4 – 25% CCAp	27,21
Tijolo 5 – 30% CCAn	14,42
Tijolo 6 – 30% CCAp	26,09

Figura 47 – Percentual de absorção de água por imersão.



Fonte: O autor (2012).

Analisando os resultados, percebe-se que o tijolo 2, composto com 20% de CCAp, apresentou uma taxa de absorção menor (9,76%) que o tijolo 1 CCAn (24,95%), composto com o mesmo percentual de cinza. Quando a mistura contém 25% de cinza, os percentuais de absorção se aproximam: CCAn (28,8%) e CCAp (27,21%). Com 30% de cinza na mistura, a CCAn apresenta uma absorção menor (14,42%) que a CCAp (26,09%). Neste parâmetro, não foi possível detectar se o tipo de CCA influenciou na taxa de absorção pelo material.

Infere-se, pela Figura 47, que o tijolo referência, excetuando os tijolos 2 e 5, apresentou uma absorção menor que os demais, demonstrando que a substituição do cimento Portland pelas CCA provocou o aumento de absorção à medida que se aumentou o percentual das cinzas nos tijolos.

Na análise da correlação da absorção com a resistência, conclui-se que o tijolo referência apresentou uma absorção relativamente menor que os demais tijolos e, ao comparar sua resistência aos 28 dias (Figura 47), percebe-se que foi o tipo que apresentou a melhor resistência à compressão nessa idade, demonstrando que quanto menor a absorção maior a resistência, corroborando o que afirmou Bezerra (2010).

No entanto, a constatação da autora não se confirmou ao se comparar os resultados das absorções e resistências à compressão aos 28 dias, dos tijolos 2 e 5, com os dos seus pares, conforme mostra a Tabela 41.

**Tabela 41 – Relação de resistência à compressão e absorção de água por imersão em tijolos.**

<b>Tipo de Tijolo</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Absorção de Água por Imersão (%)</b>
Tijolo 1 – 20% CCA <sub>n</sub>	1,54	24,95
Tijolo 2 – 20% CCA <sub>p</sub>	1,26	9,76
Tijolo 5 – 30% CCA <sub>n</sub>	0,85	14,42
Tijolo 6 – 30% CCA <sub>p</sub>	0,97	26,09

#### **4.4.4 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade**

O concreto feito com material pozolânico é mais impermeável e por isso mais durável (ABCP, 2012). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, a sílica ativa e outros materiais com propriedades pozolânicas contribuem com a impermeabilização, inibindo patologias como, por exemplo, a reação álcali-agregado.

O Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC) usado nesta pesquisa absorve grande quantidade de água. Por isso, o objetivo da realização deste ensaio foi no sentido de investigar se a CCA aumenta a impermeabilidade dos tijolos, inibindo o fenômeno da absorção de água por capilaridade. Os tijolos submetidos a este ensaio tinham a idade de 28 dias e foi realizado com amostras contendo 20, 25 e 30% de CCA.

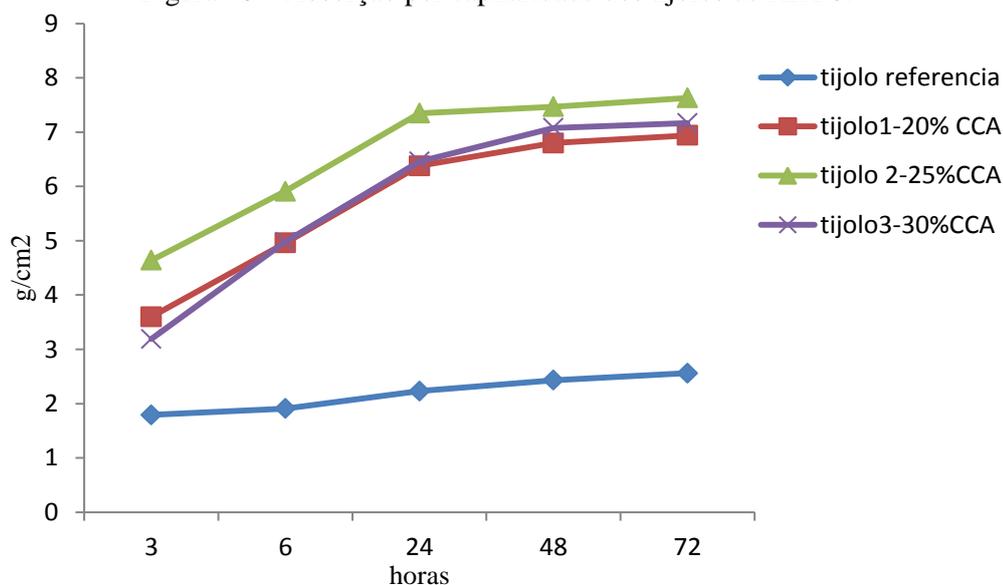
Cabe observar que o foco deste experimento foi apenas na quantidade de CCA e não no tipo de cinza, por isso foram usadas apenas amostras provenientes de CCA<sub>n</sub>. Os resultados encontram-se na Tabela 42 e são ilustrados na Figura 48.

Tabela 42 – Absorção por capilaridade dos tijolos de ARTC.

Tipo de Tijolo	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Tijolo referência	1,79	1,91	2,23	2,43	2,56
Tijolo 1, com 20% de CCA	3,6	4,96	6,38	6,8	6,94
Tijolo 2, com 25% de CCA	4,64	5,91	7,35	7,47	7,63
Tijolo 3, com 30% de CCA	3,19	4,98	6,46	7,08	7,17

Observando-se a Figura 48, percebe-se que o melhor desempenho neste quesito foi o do tijolo referência que, na idade de 72 horas, apresentou 2,56 g/cm<sup>2</sup> de absorção, enquanto que o tijolo 2, contendo 25% de CCA, apresentou, nessa idade, uma maior absorção de 7,63 g/cm<sup>2</sup>.

Figura 48 – Absorção por capilaridade dos tijolos de ARTC.



Fonte: O autor (2012).

Este resultado é coerente com o ensaio de absorção (item 4.4.3- Tabela 40), em que os tijolos 3 e 4, com 25% das CCA, apresentaram as maiores taxas de absorção, da ordem de 28,8% e 27,21%, respectivamente. Sabe-se, por pesquisadores, da alta taxa de absorção dos artefatos confeccionados com agregados reciclados de RCD, principalmente quando presente em sua composição material proveniente de cerâmica vermelha. Nos ensaios com argamassas feitas com agregados reciclados de cerâmica vermelha, Costa (2006) encontrou taxas na ordem de 28% de absorção.

O fato de os tijolos contendo CCA apresentarem absorções superiores aos tijolos referência, que não contêm cinza, pode, talvez, ser explicado pela quantidade de carbono

presente nas CCA incineradas com temperaturas abaixo de 600° C. A quantidade de carbono gera um aumento na absorção de água, já que suas moléculas são extremamente finas (TASHIMA et al., 2012).

A sílica ativa age em concretos, argamassas e artefatos de duas formas: uma delas é quimicamente através da reação pozolânica, ou seja, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar os resistentes silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), favorecendo a resistência da pasta do cimento; a outra forma é fisicamente através do chamado efeito “filler”, ou seja, de acordo com as dimensões de suas partículas, preenchendo os vazios da estrutura, contribuindo para a melhoria da coesão e a compacidade do concreto fresco, e também refinando a estrutura de poros do material, agindo como ponto de nucleação dos compostos de hidratação do cimento (BEZERRA, 2010).

Neste experimento, a observação do efeito “filler” ficou prejudicado, tendo em vista que os agregados provenientes de telha cerâmica absorvem muita água, portanto mascarando o “efeito filler” esperado das CCA.

Comparando o desempenho dos tijolos de ARTC, nos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, em relação aos requisitos físicos da NBR 6136/2007 (ABNT, 2007), constata-se que apenas os tijolos 2 e 5 atenderam às exigências da norma, por se tratar de um componente constituído de agregado leve, como se observa na Tabela 43.

**Tabela 43 – Comparação da absorção de água dos tijolos de ARTC com a NBR 6136/2007 (ABNT, 2007).**

Tipo de Tijolo	Absorção aos 28 Dias(%)	NBR 6136/2007	
		Absorção Média (%)	
		Agregado Normal	Agregado Leve
Tijolo referência	18,55	≤ 10% (Classes A, B, C e D)	≤ 13% (Média) ≤ 16% (Individual)
Tijolo 1 – 20% CCA <sub>n</sub>	24,95		
Tijolo 2 – 20% CCA <sub>p</sub>	9,76		
Tijolo 3 – 25% CCA <sub>n</sub>	28,8		
Tijolo 4 – 25% CCA <sub>p</sub>	27,21		
Tijolo 5 – 30% CCA <sub>n</sub>	14,42		
Tijolo 6 – 30% CCA <sub>p</sub>	26,09		

## CAPÍTULO 5

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, além das conclusões gerais do trabalho, são apresentadas sugestões para futuras pesquisas que venham a complementar o estudo sobre a utilização de resíduos de material cerâmico associados com CCA no processo de fabricação de artefatos para a construção civil.

#### 5.1 CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões ora apresentadas são fundamentadas nos resultados do programa experimental adotado e nas condições experimentais realizadas.

Na busca para atingir os objetivos geral e específicos desta pesquisa, pode-se concluir:

##### **a) Em relação aos Materiais Escolhidos para a Pesquisa**

– Que a escolha do agregado reciclado a partir da telha cerâmica para a fabricação dos tijolos foi acertada, tendo em vista a redução das variáveis físico-químicas presentes nos resíduos cerâmicos constituintes dos RCD. Dessa forma, escolheu-se um material livre de “contaminação” por argamassas de revestimento ou assentamento, por tintas e outras patologias, como ocorrem, por exemplo, com tijolos oriundos da demolição de alvenaria de vedação;

– Que a opção pelo uso de dois tipos de Cinza de Casca de Arroz (CCA) se mostrou satisfatória, permitindo comparar desempenhos mecânicos dos tijolos produzidos com adições de cinzas naturais, coletadas nas indústrias, com os de tijolos moldados com adições de cinzas produzidas em laboratórios. Com isso, foi possível concluir que as cinzas residuais, que hoje são descartadas pelas beneficiadoras de arroz, podem ter outra utilidade como, por exemplo, produção de artefatos construtivos.

##### **b) Em relação aos Ensaios para a Caracterização Física, Química e Mineralógica dos Materiais Usados na Pesquisa**

– Que, apesar dos dois tipos de CCA utilizadas na pesquisa não apresentarem o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) dentro das exigências da NBR 12653/1992 (ABNT, 1992),

essa propriedade ficou comprovada nas análises química e mineralógica das CCA e nos ensaios de resistência à compressão dos tijolos com adição de 20% de CCAn;

– Que, para investigar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das CCA, constatou-se que o ensaio depende de variáveis como: tipo de cimento e relação água/cimento. A água necessária para conferir a consistência das argamassas para a realização deste ensaio foi maior que os limites estabelecidos pela NBR 5752/92 (ABNT, 1992), fator que pode ter influenciado negativamente nos resultados;

– Que, em relação ao ensaio de absorção realizado segundo a NBR NM 30/2001 (ABNT, 2001), na condição Saturado Superfície Seca (SSS) do Agregado Reciclado de Telha Cerâmica (ARTC), ficou evidenciada a dificuldade que muitos pesquisadores encontraram para realizar este ensaio, tendo em vista o elevado nível de absorção da cerâmica. Os resultados se mostraram compatíveis com os de outros pesquisadores;

– Que, para determinar as massas específicas das faixas granulométricas dos ARTC, segundo a NBR NM 52/2009 (ABNT, 2009), foi necessário o emprego de dois métodos de ensaios: o do Frasco Chapmam e o do Frasco de Le Chatelier, devido à grande capacidade de absorção dos materiais cerâmicos;

– Que as CCA utilizadas no presente trabalho, através da caracterização química, apresentaram uma grande quantidade de sílica em sua composição, atendendo às exigências da NBR 12653/1992 (ABNT, 1992);

– Que, através do ensaio de granulometria realizado segundo a NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003), ficou evidenciado que a CCAn (coletada na indústria) contém um percentual expressivo de material fino na sua composição, podendo ser utilizada sem o beneficiamento da moagem.

### **c) Em relação aos Procedimentos das Moldagens dos Tijolos**

– Que o processo “artesanal” de moldagem da mistura homogênea dos ARTC com o cimento e/ou CCA pode incorrer em falhas, do tipo:

**c1)** Os moldes metálicos da prensa hidráulica devem estar devidamente aquecidos para evitar a aderência ou a perda precoce de umidade pela mistura a ser moldada;

**c2)** Apesar da capacidade de prensagem hidráulica de 6 toneladas (segundo manual do fabricante), o comando incorreto (pelo operador) do dispositivo de movimentação do pistão hidráulico pode produzir tijolos com espessuras diferentes, mais ou menos prensados, resultando em artefatos menos resistentes, mais porosos, etc.;

**c3)** A forma inadequada da retirada do tijolo após a moldagem também pode provocar fissuras internas no tijolo, afetando os resultados nos ensaios de resistência à compressão, como mostra a Figura 49.

Figura 49 – Retirada do tijolo após prensagem



Fonte: O autor (2012).

**d) Em relação ao Produto Final da Pesquisa**

– Que os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstraram que o limite de adição de CCA nas misturas, em substituição ao cimento Portland, devem se limitar a um percentual abaixo de 20%;

– Que os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstraram que, dos tipos de CCA usados na pesquisa, a que apresentou melhor desempenho foi a CCA coletada na indústria em substituição de 20% ao cimento Portland. Portanto, as CCA residuais descartadas pelas beneficiadoras de arroz têm potencial de uso na fabricação de artefatos do tipo tijolo;

– Que as diferenças nos resultados de ensaios de resistências à compressão apresentadas num mesmo lote de amostras analisadas podem ser justificadas por falhas do tipo:

**d1)** Fissuras internas ocorridas na retirada dos tijolos após a moldagem. Dependendo da pressão exercida pelas mãos do operador no momento da retirada do tijolo, podem ocorrer fissuras internas não detectáveis externamente;

**d2)** Falhas no capeamento dos tijolos para a realização dos ensaios de resistência. A falta de paralelismo entre as faces capeadas, segundo a NBR 12118/2010 (ABNT, 2010), pode influenciar o resultado do ensaio;

– Que as idades de 7, 14 e 28 não foram suficientes para demonstrar os desempenhos mecânicos dos tijolos pesquisados, pois sabe-se, nas literaturas, que a reatividade de materiais pozolânicos são desenvolvidas por um período de tempo mais prolongado.

### **e) Em relação à Questão da Pesquisa Suscitada no Primeiro Capítulo**

Com respeito à pergunta se seria viável a associação de agregados reciclados de resíduos cerâmicos e das CCA na confecção de um tijolo, como forma de mitigar o descarte inadequado na natureza dos resíduos cerâmicos provenientes de canteiro de obras ou descartados pelas indústrias cerâmicas e das cinzas geradas pelas indústrias beneficiadoras de arroz, pode-se dizer que, na construção de uma casa de 45 m<sup>2</sup> no padrão do programa Minha Casa, Minha Vida, exige-se aproximadamente 7.600 tijolos maciços (assentados em alvenaria de ½ vez) para levantar 150 m<sup>2</sup> de paredes.

Nesta pesquisa, para a confecção de 9 tijolos usando 25% de CCA, segundo a metodologia utilizada (item 3.2.4.2b), são necessários 20 kg de material (ARTC, cimento e CCA), sendo 18 kg de ARTC, 1,5 kg de cimento e 0,5 kg de CCA.

Portanto, fazendo uso da metodologia de cálculo deste estudo, infere-se que, se fosse utilizado o tijolo desenvolvido nesta pesquisa na construção das paredes de uma casa do Programa Minha Casa, Minha Vida, seriam usados 15.120 kg de ARTC, ou outro resíduo cerâmico, e 420 kg de CCA.

A partir do volume estimado de resíduos cerâmicos gerados (430 toneladas) nos processos de fabricação, em cinco indústrias cerâmicas da grande Cuiabá (item 1.1), conclui-se que esse volume de resíduos seria suficiente para a construção de 28 casas/mês, consumindo ainda 11 toneladas/mês de CCA descartada somente pela indústria fornecedora da casca e da cinza para esta pesquisa.

Diante dessa constatação, conclui-se que é viável técnica, econômica e ambientalmente a associação desses resíduos na produção de tijolos que poderiam ser incorporados nos processos construtivos da cadeia produtiva da construção civil e uma forma de mitigar o déficit habitacional do país e também os descartes inadequados desses resíduos na natureza.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Ao final do trabalho, verificou-se que alguns procedimentos e estudos poderiam completar esta pesquisa, e contribuir para o aperfeiçoamento e melhor compreensão da adição da CCA na confecção de artefatos construtivos. Dessa forma, sugere-se:

- a)** Nos processos da queima da casca de arroz para produção de CCA de alta reatividade, atentar para o método de combustão não controlado sugerido por Tashima (2012);
- b)** Pesquisar o desempenho mecânico, a absorção de água por imersão e capilaridade dos corpos de prova por um período de tempo mais dilatado que o adotado para esta pesquisa;
- c)** Para se minimizar as distorções (comentadas no item 4.4.2.1) dos resultados dos ensaios de resistência à compressão baseados na aplicação da fórmula estabelecida pela NBR 6136/2007 (ABNT, 2007), sugere-se a moldagem de, pelo menos, 10 CP por ensaio;
- d)** Nos procedimentos de moldagem dos tijolos (se for o caso), estabelecer a forma de operar a prensa hidráulica, na pressão adotada, nas retiradas dos tijolos após a prensagem. Se possível, definir apenas um operador para a realização dessas tarefas.

## CAPÍTULO 6

### 6 REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K. Tecnologias apropriadas em construção civil. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Orgs.). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 2003. p. 55-64.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E DOMICILIARES, 2000, São Paulo. **Anais...** Resíduos Sólidos e Domiciliares. São Paulo: Cetesb, 2000.

\_\_\_\_\_.; SAVASTANO JR., H. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Orgs.). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 2003. p. 121-144.

ALCANTARA, M. A. M.; SEGANTINI, A. A. S. **Solo-cimento e solo-cal**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G. C. Isaia/Ibracon, v. 2, p. 834-861, 2007.

AMICK, James A. Purification of rice hulls as a source of solar grade silicon for solar cells. **J. Electrochem Soc.**, v. 129, n. 4, p. 864-866.

AMORIM, E. F.; QUEIROZ, H. S. de; RIBEIRO, L. F. M. Avaliação de resíduos de construção e demolição de obras associado a um solo laterítico para aplicação em camadas de pavimentação asfáltica. In: CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DO ASFALTO – TRABALHOS TÉCNICOS, 16., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2011. v. 1. p. 102-112.

AMORIM, L. V.; FERREIRA, H. C.; PEREIRA, G. A. **Reciclagem de rejeitos de cerâmica vermelha e da construção civil para obtenção de aglomerantes alternativos**. 2000.

ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D.; MIRANDA, L. F. R. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Revista Ambiente Construído** (2009).

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MATO GROSSO. **Lei 9.696/2012**, sancionada em 14 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www.al.mt.gov.br/TNX/conteudo.php?sid=44&cid=32798&parent=44>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **A versatilidade do cimento brasileiro**. ABCP, 2012. Disponível em: <<http://www.abcp.com.br/conteudo/?p=166>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170/1983**: tijolo maciço para alvenaria. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136/2007**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 12118/2010**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004/1987**: resíduos sólidos, classificação. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653/1992**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5751/1992**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752/1992**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214/2012**: areia normal para ensaio de cimento: especificação. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211/2009**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23/2001**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248/2003**: agregados : determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52/2009**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-4/2008**: agregados: reatividade álcali-agregado, Parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30/2001**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45/2006**: agregados:determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779/1995**: argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção da água por capilaridade: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 10834/1994**: bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: especificação. Rio de Janeiro, 1994.

BALDO, J. B. et al. Concretos não estruturais utilizando agregados obtidos na indústria de cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., Curitiba, 2004. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABC, 2004. 1 CD-ROM. Ref.19-06.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Terra crua para edificações**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G. C. Isaia. IBRACON,2007.v.2. p.1505 a 1538.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. 2010. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande.

BARBOSA, N. P; GHAVAMI, K. **Bambu**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON,2007.v.2.p.1559 a 1589.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)>. Acesso em: 22 nov. 2011.

BRAVO, M.; BRITO, J. de; MÁLIA, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Revista Ambiente Construído**, Antac, 2011.

CALMON, J. L. Resíduos **industriais e agrícolas**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON, 2007. v. 2, p. 1591 a 1626.

CHANDRASEKHAR, S. et al. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk – na overview. **Jornal of Materials Science**, v. 38, 2003.

CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. **Tecnologia de Edificações**, São Paulo: Pini, p. 23-26, 1988.

CONCIANI, W.; FONSECA, João Batista B. da; COSTA, Juzélia S. Tijolo de solo cimento com material da região cuiabana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** COOPERJA. Cooperativa Agropecuária de Jacinto Machado. Disponível em: <http://www.cooperja.com.br/>

CORDEIRO, L.N.P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Dissertação (Mestrado) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

COSTA, J.S., **Agregados alternativos para argamassa e concreto produzidos a partir de reciclagem de rejeitos virgens da indústria de cerâmica tradicional**. Tese (Doutorado) pela Universidade Federal de São Carlos, SP, 2006.

COSTA, J.S.; Santana, C. S. Rejeito da indústria de cerâmica vermelha como agregado artificial para utilização na indústria da construção civil. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 2008, Santos. **Anais...** 63Congresso Anual da ABM, 2008.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios: a importância da etapa de projeto arquitetônico. In: NUTAU 2002: Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano, São Paulo. **Anais...** 2002, p. 1347-1358.

DAFICO, D. A., **Método de produção de cinza de casca de arroz para utilização em concreto de alto desempenho**. 2001.

\_\_\_\_\_.;PRUDÊNCIO JR.L.R.; SANTOS, S. **Cinza da casca de arroz**. Coletânea Habitare. v. 4- Utilização de resíduos na construção habitacional. Porto Alegre: J.C. ROCHA e V.M.JOHN. ANTAC,2003- Coletânea Habitare.

DELLA, V.P.; KUHN, I; HOTZA, D.; Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de reflatários de sílica. **Quim. Nova**, v. 24, n. 6, p. 778-782, 200.

DIAS, J.F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimentos de baixo custo**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica- Universidade de São Paulo, 2004.

ERNST, W.G. **Minerais e rochas**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1971. 162p.

FARIAS, J. S. A.; RECENA, F. A. P. **Study for brazilian rice husk ash cement**. In: Proceedings of the second international RILEM symposium. Salvador. **Anais...** 1990.

FAVINI, A.C; COSTA, J.S. Avaliação do concreto produzido com rejeito de telha cerâmica vermelha. In: 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2009, Guarujá. **Anais...** 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2009.

FERREIRA, C. S. **Desenvolvimento do processo de obtenção de filme polimérico a partir da cinza da casca de arroz**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

FOLETTTO, E.L., HOFFMANN, R., HOFFMANN, R.S., PORTUGAL Jr. U.L., JAHN,S.L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Quim. Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055-1066, 2005.

FREIRE,W.J. Materiais alternativos de construções. In: FREIRE,W.J.; BERALDO, A. L.(coord). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora UNICAMP, 2003. p. 27 a 54.

FREITAS, A.M.S. **Sistema Light Steel Framing**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON,2007. v.1. Anexo 1,

GAVA, G.P., **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1999. 118 p.

GLEIZE,P.J.P; JOHN, V. M. **Materiais de construção civil: Perspectivas e desafios futuros**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON, 2007. v. 2, p. 1687 a 1697.

GOINVINDARAO, V. M. H.; Utilization of rice husk- a preliminary analysis. **Journal Sci. Ind. Res.** v.39, p. 495-515, 1980.

GUNTHER, W.M.R. Minimização de resíduos e educação ambiental. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7. Curitiba: **Anais...** Curitiba, 2000.

HANAFI, S.et al. Surface properties of silicas produced by thermal treatment of rice husk ash. **Thermochimica Acta.** V. 37, p. 137-143, 1980.

HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T.C. **Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte.** 2002. Disponível em: <http://www.ufsm.br/cenergia/artefinal.pdf>

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

I&T, SEMINFE. **Diagnóstico geral sobre resíduos sólidos da construção civil elaborado em outubro/2006 pela consultoria Informações e Técnicas (I&T)/Secretaria Municipal de Infra-Estrutura.** Cuiabá/MT, 2006. Disponível em <http://Cuiaba.mt.gov.br/secretarias>, acesso em 29 de novembro de 2011.

ISAIA, G.C. **A ciência e a engenharia de materiais de construção civil.** Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON,2007.v.1.p.01 a 36.

ISMAIL, HANAFI, et al. The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds. **European Polyme Journal.** vol. 35, 1999.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 290 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEMOS,C. A. C. **Casa paulista.** São Paulo: Edusp, 1999.

LEVY, S. M.; HELENE, P.R.L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil constuction industry in: CIB Symposium on Construction & Environment Theory into practice, novembro, In: Symposium on Construction & Environment Theory into practice, 2000, São Paulo- SP. **Anais...** Symposium on Construction & Environment Theory into practice, 2000. p.64-76.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem de entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas.** 146p. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_. **Materiais reciclados na construção civil.** Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON, 2007. v.2, p.1628 a 1657.

LIMA,P.R.L.;TOLÊDO FILHO, R.D. Determinação da tensão de aderência fibra-matriz em compósitos à base de cimento com fibras de sisal. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO- CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL- BRASIL NOCMAT 2006, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro : Abmtenc,2006, 13 p.

KAZMIERCZAC, C.S. **Produtos de cerâmica vermelha.** Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo: G.C. Isaia. IBRACON, 2007. v.1, p. 563 a 585).

MAIAA, E. C. **Apostila tópicos gerais sobre cerâmica vermelha.** SENAI/FIEMTEC.Centro de Educação e Tecnologia. 2005.

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. 2005, Cuiabá. **Anais...** 509-524p.

MATOS, T.A. **Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais.** Fundação Estadual do Meio Ambiente. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental/ UFV, maio de 2005.

MEHTA, P.K. **Rice husk ash: a unique Supplementary cementing material. Advances in Concrete Technology.** Ottawa: Canmet, 1992, p. 407-431.

\_\_\_\_\_.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estruturas, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994, 573p.

\_\_\_\_\_.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

\_\_\_\_\_.; PITT, N. **A new process of rice utilization. In: International conference on the utilization of rice by- products.** Proceedings. Valencia: IATA, published in 1977, p. 445-58.

MIRANDA, L.F.R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil.** São Paulo, 2005. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana.

MORALES, G. ; ÂNGULO, S. C. ; CECILIATO, A. C. M. Produção de concreto de Cimento Portland utilizando entulho de obra reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL EM TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8. Salvador. **Anais...** Modernidade e Sustentabilidade. Salvador: UFBA, UEFS, ENEB, UPE, UNIFOR, 2000. 2v. v.2, p. 1131-1138.

O'REILLY DÍAZ, V.A. **Método para dosificar hormigón de elevado desempenho. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.** Notas de aula. 2005.

PINI. **Alternativas tecnológicas para edificações.** São Paulo: PINI, Vol. 1, 2008.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

\_\_\_\_\_.; GONZALES, J. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil:** manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: Caixa, v. 1, 196p, 2005.

PRUDÊNCIO JR.L.R, DAFICO, D.A., SANTOS, S. Cinza da casca de arroz. In: Coletânea Habitare. Vol.4- **Utilização de resíduos na construção habitacional.** Porto Alegre: J.C. ROCHA e V.M.JOHN. ANTAC,2003- Coletânea Habitare.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ ou pozolânico.** Tese (Doutorado) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

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 (Doutorado) pela Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

Sindicato Nacional da indústria do Cimento, **Relatório Anual** ( SNIC, 2010). Disponível em: <http://www.snic.org.br/> acesso em 11 de janeiro de 2012.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **A indústria do cimento no cenário das mudanças climáticas**. 2009. Disponível em: <http://www.snic.org.br/>- acessado em 22/11/2011.

SANTANA, C.S.; COSTA, J. Reaproveitamento de rejeitos da indústria de cerâmica vermelha e da indústria da construção civil, aplicando em argamassas de revestimento e assentamento. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 2008, Santos. **Anais...** 63º Congresso Anual da ABM, 2008.

SILVA, C. A. R. (2004). **Aplicação do conceito de maturidade em concretos com adição da cinza de casca de arroz. Ilha Solteira**. 2004. 115p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. (1992). Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. In: PROCEEDINGS FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE, ISTANBUL-TURKEY, 1992. p.495-512.

TASHIMA, M. M., **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2006.

\_\_\_\_\_.; SILVA, E.J; RICCI, E.C; AKASAKI, J. L; BARBOSA, M.B. Análise da variação da retração por secagem em argamassas com a adição de cinza de casca de arroz. In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006, São Paulo. **Anais...** VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. p.183-185.

\_\_\_\_\_.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUZA, L. C.; MELGES, J. L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambient. Constr.** v. 12, n. 2, 2012.

TÉCHNE, 2011- **Detecção preventiva de patologias em edificações**- edição 167/ fev/2011.Pini. São Paulo, 2011.

TUTSEK, A. & BARTHA, P. **Method of producing low- carbono white husk ash**. United States Patent. n. 4.049. 464. EUA, 1997.

WEBER, Silvana Leonita. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

YAMAMOTO, Y. e LAKHO. M. S. Productinon and utilization of active rice husk ash as a substitute for cement. **Journal of Japan Society of Corrosion Engineering**. n. 322, p.157-166, 1982.