



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

KEYLLA CASTRO FERREIRA

**ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA A PRODUÇÃO DE  
ARGAMASSAS UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

BELÉM  
2014

KEYLLA CASTRO FERREIRA

**ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA A PRODUÇÃO DE  
ARGAMASSAS UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

LINHA DE PESQUISA: Engenharia de Processos Inorgânicos

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Antônio Silva Souza

BELÉM  
2014

KEYLLA CASTRO FERREIRA

**ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA A PRODUÇÃO DE  
ARGAMASSAS UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

DATA DA AVALIAÇÃO: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
CONCEITO: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Antônio Silva Souza  
(FEQ/ITEC/UFPA – Orientador)

---

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza  
(FEQ/ITEC/UFPA – Membro)

---

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo  
(FEC/ITEC/UFPA – Membro Externo)

---

Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco  
(FAESA/ITEC/UFPA – Membro Externo)

*Dedico esse trabalho a todas as pessoas  
que contribuíram para sua realização.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, essência da minha vida, que mais esteve ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu marido Michel Ferreira, pelo amor, compreensão incentivo e incondicional apoio em todos os momentos.

À meus pais Walmir e Ana Ruth, irmãos Kelly, Rafael e Karina que de diversas maneiras, não só me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho mas também, muito contribuíram para meu crescimento e felicidade.

Ao Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza pela orientação, convivência, ensinamentos, aprendizado e amizade. Muito obrigado por tudo.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Augusta Felipe, a quem devo parte do meu aprendizado.

Aos meus grandes amigos Dilson e Silvane pela enorme força, convivência, amizade e alegria nos momentos mais difíceis.

Ao Coordenador do Programa de Pós-graduação de Engenharia Química Prof. Dr. Nélío Teixeira pela dedicação e assistência em todos os momentos.

Aos colegas da USIMAT que me acompanharam nesta longa jornada.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)*

## RESUMO

As argamassas podem ser consideradas como a mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. Como alternativa, é proposto produção de argamassas utilizando como agregado miúdo resíduos de construção civil (RCC), rico em silicoaluminatos, gerado nas obras de demolições e reformas, e cinza volante (CV) como material pozolânico, obtida a partir da combustão do carvão mineral em caldeiras de leitos fluidizados, em substituição parcial ao cimento Portland. Neste contexto, o resíduo de construção civil foi beneficiado e caracterizado pelas análises de espectrofotometria de raios-X e difração de raios-X, a cinza volante foi caracterizada pela análise granulométrica e espectrofotometria de raios-X. Para produção das argamassas formularam-se composições de RCC nas proporções de 95, 90, 85, 80, 75 e 70%; CV de 0, 5, 10, 15, 20 e 25% e 5% de cimento Portland CP II Z 32, sendo que em cada composição do traço de argamassa foi adicionado 0,8% em volume de água e para o ensaio reológico utilizou-se as mesmas proporções de resíduos (RCC e CV) com 35% em volume de água. Após a cura de 28 dias os corpos de prova foram submetidos a ensaios físicos de absorção, porosidade e massa específica aparente; ensaio mecânico de resistência à compressão e análise de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, cujos resultados obtidos mostraram-se ser viável a utilização da cinza volante e RCC na construção civil, na produção de argamassas.

**Palavras-Chave:** Resíduo da Construção Civil, Cinza Volante, Argamassa, Pozolana.

## ABSTRACT

The mortars can be considered as a mixture of the binders and aggregates with water, having capacity of the induration and adherence. Instead, it is suggested the production of mortars using civil construction waste, with plenty silicoaluminates, obtained in demolitions and reforms of build, and fly ash as material pozzolana, obtained of the combustion of mineral coal in fluidized bed boilers, in partial replacement of Portland cement. The civil construction wastes were benefited and characterized by X-ray spectrometry and X-ray diffraction. The fly ash was characterized by granulometric analyze and X-ray spectrometry. The mortars of the were prepared using the following compositions of RCC, 95, 90, 85, 80, 75 and 70%; CV of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% e 5% of Portland CP II Z 32 cement. In all the compositions were put 0,8% of water and the rheological testing was used the same proportions residue (RCC e CV) with 35% water. The specimens were cured for 28 days and after were submitted physical trials of absorption, porosity and bulk density; mechanical trials of resistance to compression and analysis of X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results obtained show that the recycling of civil construction waste and the use of fly ash and RCC is a promising technique in production of mortars.

**Keywords:** Construction Waste, Fly Ash, Mortar, Pozzolan.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fluxograma 1 – Estágios de carbonificação.....	14
Figura 1– Reservas mundiais de carvão mineral.....	15
Figura 2 – Processo de formação das cinzas.....	16
Figura 3 – Processo de produção do cimento.....	22
Figura 4 – Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.....	37
Figura 5 – Esquema ilustrativo do experimento de Newton.....	38
Fluxograma 2 – Fluxograma da parte experimental.....	40
Figura 6 – Resíduo de construção civil (RCC).....	41
Figura 7 – (a) Britador de mandíbulas; (b) Moinho de disco e (c) Moinho de bolas (USIMAT – LEQ/UFPA).....	42
Figura 8 – Peneiramento do RCC (USIMAT – LEQ/UFPA).....	42
Figura 9 – Resíduo passante da peneira de 100#.....	43
Figura 10– Preparação dos corpos de prova.....	45
Figura 11 – Etapas dos ensaios físicos.....	46
Figura 12 – Ensaio de resistência à compressão.....	48
Figura 13 – Equipamento utilizado para os ensaios.....	48
Figura 14 – MEV modelo TM-3000 by Hitachi (LEQ/UFPA).....	50
Figura 15 – Misturador mecânico marca.....	51
Figura 16 – Viscosímetro Modelo Haake VT 550 (LEQ/UFPA).....	51
Figura 17 – Difratoograma do resíduo de construção civil.....	53
Figura 18 – Histograma da análise granulométrica da cinza volante.....	55
Figura 19 – Resultados da absorção aparente (Aa).....	56
Figura 20 – Resultados da porosidade aparente (Pa).....	57
Figura 21 – Resultados da massa específica aparente (MEA).....	57
Figura 22 – Resultados da resistência à compressão.....	58
Figura 23 – Difratoogramas dos corpos de prova aos 28 dias de cura.....	60
Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 1.....	61
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 2.....	62
Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 3.....	62
Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 4.....	63
Figura 28 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 5.....	63
Figura 29 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 6.....	64

Figura 30 – Análise reológica de cada traço.....64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição química da cinza volante. ....	18
Tabela 2– Principais compostos do cimento Portland.....	21
Tabela 3– Tipos de cimentos segundo a NBR 5732.....	24
Tabela 4– Exemplos de comportamentos reológicos. ....	37
Tabela 5– Composição dos corpos de prova. ....	45
Tabela 6– Composição dos traços para o ensaio reológico. ....	50
Tabela 7 – Composição química do RCC. ....	52
Tabela 8– Composição mineral do RCC.....	53
Tabela 9– Composição química da CV. ....	53
Tabela 10– Análise granulométrica da cinza volante.....	55
Tabela 11 – Resultados dos ensaios físico-mecânicos. ....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1	CARVÃO MINERAL .....	14
<b>3.1.1</b>	<b>Processo de formação de cinzas a partir de carvão mineral.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Cinzas volantes.....</b>	<b>17</b>
3.1.2.1	Pesquisas realizadas com a cinza volante na UFPA.....	18
3.2	CIMENTO PORTLAND.....	19
<b>3.2.1</b>	<b>Processo de produção .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Tipos de cimento .....</b>	<b>24</b>
3.3	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL .....	25
<b>3.3.1</b>	<b>Classificação dos resíduos de construção civil.....</b>	<b>26</b>
3.3.1.1	Classificação segundo CONAMA 307.....	26
3.3.1.2	Classificação segundo a composição.....	26
<b>3.3.2</b>	<b>Medidas para redução da geração de resíduo de construção civil.....</b>	<b>27</b>
3.3.2.1	Fase de construção.....	27
3.3.2.2	Fase de manutenção.....	27
3.3.2.3	Etapa de demolição.....	28
3.4	ARGAMASSAS.....	29
<b>3.4.1</b>	<b>Definições, composição e usos.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Materiais constituintes da argamassa.....</b>	<b>30</b>
3.4.2.1	Agregados miúdos .....	30
3.4.2.2	Aglomerantes.....	31
3.4.2.3	Cal.....	31
<b>3.4.3</b>	<b>Propriedades das argamassas de revestimento.....</b>	<b>32</b>
3.4.3.1	Consistência.....	32
3.4.3.2	Trabalhabilidade .....	33
3.4.3.3	Plasticidade.....	33
3.4.3.4	Aderência.....	34
3.4.3.5	Retenção de água .....	34
3.4.3.6	Retração na secagem .....	34

3.4.3.7 Resistência à compressão .....	35
3.4.3.8 Permeabilidade .....	35
3.4.3.9 Módulo de elasticidade.....	35
<b>3.4.4 Classificação das argamassas .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4.5 Reologia das argamassas.....</b>	<b>36</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	40
<b>4.1.1 Beneficiamento do resíduo.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.2 Caracterização química do resíduo de construção civil.....</b>	<b>43</b>
4.1.2.1 Espectrometria de fluorescência de raios-X .....	43
4.1.2.2 Difração de raios-X (DRX) .....	44
4.2 CINZA VOLANTE .....	44
4.3 CIMENTO PORTLAND.....	44
4.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	44
4.5 ENSAIOS FÍSICOS-MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA .....	46
<b>4.5.1 Absorção aparente.....</b>	<b>47</b>
<b>4.5.2 Porosidade aparente.....</b>	<b>47</b>
<b>4.5.3 Massa específica.....</b>	<b>47</b>
<b>4.5.4 Resistência à compressão .....</b>	<b>48</b>
4.6 ANÁLISES QUÍMICAS DOS CORPOS DE PROVA.....	49
<b>4.6.1 Difração de raios –X.....</b>	<b>49</b>
<b>4.6.2 Microscopia eletrônica de varredura.....</b>	<b>49</b>
4.7 ENSAIO REOLÓGICO DAS ARGAMASSAS .....	50
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS .....	52
<b>5.1.1 Resíduo de construção civil (RCC) .....</b>	<b>52</b>
5.1.1.1 Caracterização físico química por Espectrometria de Fluorescência de raios –X.....	52
5.1.1.2 Caracterização química por Difração de raios –X.....	52
<b>5.1.2 Cinza volante.....</b>	<b>53</b>
5.2 ENSAIOS FÍSICOS-MECÂNICO.....	55
<b>5.2.1 Absorção aparente.....</b>	<b>56</b>
<b>5.2.2 Porosidade aparente.....</b>	<b>56</b>
<b>5.2.3 Massa específica aparente.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2.4 Resistência à compressão .....</b>	<b>58</b>

5.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X .....	59
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	61
5.5	ENSAIO REOLÓGICO .....	64
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes dificuldades enfrentadas pelas empresas e administrações governamentais, refere-se ao destino correto dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias, resíduos domésticos e resíduos gerados por obras de construção civil e demolições.

O uso do resíduo de construção civil é, hoje, um grande desafio, uma vez que este deve ser utilizado como agregado junto a materiais convencionais sem que cause prejuízo à qualidade do produto que se deseja obter, satisfazendo requisitos como: resistência mecânica, trabalhabilidade, aderência entre outros.

Os resíduos de construção civil juntamente com alguns resíduos da indústria de mineração e metalurgia podem ser de importante aplicação na construção civil, pela sua rica composição mineralógica: silicoaluminatos, óxidos de ferro e titânio e carbonatos, que em misturas com outros resíduos como cinza volante provenientes de caldeiras de leito fluidizado, que são descartadas em grande quantidade, podem formar uma importante matéria prima para a produção de argamassas destinadas a varias aplicações como: assentamentos de pisos, reboco e nivelamento de paredes, formação de contra pisos, etc.

Na tentativa de contribuir com o aumento no conhecimento sobre a produção de argamassas e de sugerir uma forma de destino aos resíduos de construção civil e resíduos oriundos da indústria de mineração e metalurgia, este trabalho foi desenvolvido com a idéia de maximizar a utilização dos resíduos (construção e cinza) e minimizar o uso de cimento Portland na produção de argamassas para a indústria da construção civil.

## 2 OBJETIVO

- Desenvolver um produto com características de argamassas utilizadas na construção civil, a partir de resíduo da construção civil (RCC) e de cinza volante (CV) de carvão mineral, provenientes de caldeiras de leito fluidizado como material pozolânico.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir uma mistura de resíduos da construção civil, com teores de silicoaluminatos necessários para a produção de argamassas.
- Desenvolver misturas com a cinza volante como material pozolânico, mantendo o máximo de pozolana na mistura preferencialmente com níveis de 5% em peso de cimento Portland.
- Desenvolver tipos de argamassa, para nivelamento de paredes, bem como para assentamento de pisos e revestimentos.
- Avaliar as principais propriedades das argamassas produzidas de acordo com as normas técnicas vigentes.

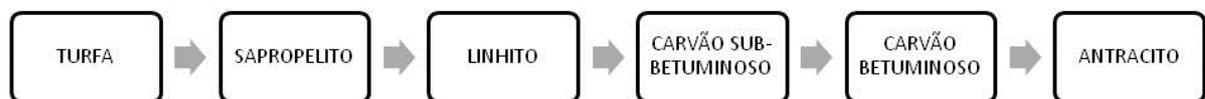
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação. Quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação atingido e maior a qualidade do carvão (DNPM, 2001).

Os diversos estágios de carbonificação são apresentados pelo Fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Estágios de carbonificação.



Aproximadamente 80% das reservas de carvão no mundo situam-se no Hemisfério Norte (Figura 1). Os maiores produtores são China, Estados Unidos, Rússia e Austrália, sendo este o maior exportador de carvão para o mundo e também para o Brasil. O Brasil não figura entre os importantes produtores de carvão, pois sua produção anual é cerca de 0,1% da produção mundial (BRASIL, 2008).

Figura 1– Reservas mundiais de carvão mineral.



O principal uso de carvão no mundo é para geração de eletricidade, com um consumo de 2,9 bilhões de toneladas. O carvão para uso siderúrgico é o segundo maior mercado deste produto no mundo, com um consumo anual de mais de 600 milhões de toneladas. O grande uso de carvão nessa área é na produção de coque para emprego em altos-fornos. Entretanto, somente cerca de 15% das reservas mundiais de carvão possuem as propriedades requeridas para a coqueificação, ocasionando um alto valor deste tipo de carvão no mercado internacional (BRASIL, 2008).

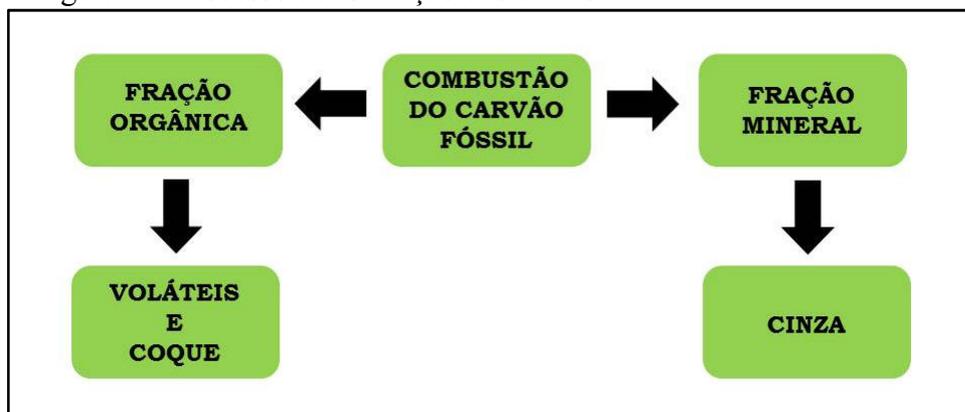
No Brasil, o maior consumo de carvão é justamente na produção de coque de alto-forno. Deve ser salientado que, atualmente, todo o carvão para uso siderúrgico é importado, com mais de 13 milhões de toneladas ao ano e a um custo de 1,7 bilhões de dólares. Os 6 milhões de toneladas de carvão produzidas no Brasil são predominantemente para geração de termoeletricidade (BRASIL, 2008).

### 3.1.1 Processo de formação de cinzas a partir de carvão mineral

Cinzas de carvão são resíduos sólidos inorgânicos gerados após a queima de carvão mineral nos processos de geração de energia em usinas termoeletricas do mundo todo, em países como a China, E.U.A, Índia, Austrália, África do Sul, Rússia, Indonésia, Polônia, Espanha, Brasil, entre outros.

A formação das cinzas dá-se pela combustão direta do carvão fóssil, que é uma matéria-prima sólida, construída por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (matéria volátil mais carbono fixo) e uma fração mineral (argila, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor, a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral se transforma em cinza com uma mineralogia modificada (Figura 2), tendo em vista, a perda das águas das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc. (ROHDE *et al.*, 2006).

Figura 2 – Processo de formação das cinzas.



Fonte: Autor, 2013.

No processo da queima, são gerados os seguintes tipos de cinzas:

- Escórias: são resultantes da queima de carvão granulado em equipamentos de pequeno porte, apresentam granulometria mais grosseira e blocos sinterizados com altos teores de carbono incombusto, variando de 5 a 20%;

- Cinzas de fundo (pesadas): material que fica segregado no fundo das fornalhas de combustão pulverizada ou fluidizada, portanto de granulometria maior. Apresenta teores de carbono incombusto variando de 1 a 5%;

- Cinzas volantes (leves): resultam da combustão de carvão pulverizado ou em leito fluidizado. É o material de menor granulometria, constituído, em grande parte, por partículas esféricas com dimensões que variam entre 0,5  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ .

As características físicas e químicas das cinzas de carvão variam de acordo com as características do mineral natural que as originou (carvão mineral), com o tipo de queima do

carvão, projeto e operação da caldeira, grau de beneficiamento e moagem do carvão, sistema de extração e manuseio (ADRIANO *et al.*, 1980). Portanto, é difícil ter uma previsão precisa de suas características.

As cinzas brasileiras não possuem legislação específica, sendo classificadas, em sua maioria como “resíduo Classe II – A – não inerte”, devendo ser encaminhadas para aterro sanitário quando a alternativa de reciclagem tenha sido descartada (ROHDE *et al.*, 2006).

De modo geral as cinzas de carvão são minerais alumino silicatos constituídos pelas fases amorfa e cristalina. Constituem-se de um pó de grãos finos com propriedades pozolânicas, composto principalmente por partículas vítreas e esféricas (QUEROL *et al.*, 2002).

Os elementos predominantes das cinzas são Al, Si, O, Fe, Ca, K e Na. Elementos traços como As, B, Ca, Mo, S, e Se podem ser encontrados nas partículas menores. O pH das cinzas varia de 4,5 a 12 dependendo das características geoquímicas do carvão precursor (FERRET, 2004).

### **3.1.2 Cinzas volantes**

Em função das características de queima a maior parte das cinzas produzidas acompanham os gases de combustão, e em função disso são chamadas de cinzas volantes ou leves em contraste das cinzas pesadas ou de fundo, que permanecem na caldeira, sendo recolhida periodicamente através de processos secos ou úmidos.

Cinzas volantes são resíduos obtidos por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentares de carvão.

A composição química da cinza é determinada pelo tipo de carvão utilizado e pela quantidade de material incombustível presente no mesmo (METHA e MONTEIRO, 2001).

Entretanto, a maioria apresenta como principais constituintes cristais de sílica, alumina  $Al_2O_3$ , óxido férrico,  $Fe_2O_3$ , e  $CaO$ , além de outros componentes em menores

quantidades como MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, MnO e TiO<sub>2</sub>, bem como, partículas de carbono não consumidas durante a combustão.

A composição química típica da cinza volante é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1– Composição química da cinza volante.

Elementos Químicos	Cinza Volante %
SiO <sub>2</sub>	58,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,66
MnO	0,03
MgO	0,88
CaO	1,68
Na <sub>2</sub> O	0,30
K <sub>2</sub> O	2,74
TiO <sub>2</sub>	1,41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28
P.F	1,15
CO <sub>2</sub> total	2,30
C orgânico	0,63
S total	0,10
Cl	0

Fonte: Cheira e Rocha, 1997.

### 3.1.2.1 Pesquisas realizadas com a cinza volante na UFPA

Nos anos que se antecederam, vários estudos e pesquisas foram realizados na Universidade Federal do Pará com finalidade de tornar o resíduo proveniente da refinaria de alumina Norsk Hydro SA: Cinza Volante, como matéria prima reciclável na indústria da construção civil. Dentre essas pesquisas destacam-se os trabalhos desenvolvidos por:

Tancredi (2010) pesquisou a viabilidade da adição de cinza volante nas propriedades do concreto em substituição ao cimento Portland, o que mostrou ser viável o aproveitamento da cinza volante.

Rocha Junior (2011), estudou as características, físicas, químicas e mineralógicas das cinzas volantes tendo como finalidade sua utilização na síntese de Zeólitas, com aplicação na adsorção de Cu<sup>+2</sup> e Cd<sup>+2</sup>, obtendo bons resultados.

Siqueira (2011) estudou a produção e o desempenho de argamassas, fabricadas a partir da incorporação de cinzas volantes, que forneceu valores de desempenho satisfatórios quando comparados com dados de literatura.

Cardoso (2014) estudou a influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento. Fabricado com reciclagem de resíduos, obtendo desempenhos satisfatório em termos de reologia.

### 3.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, que é utilizado no mundo inteiro, é a denominação dada ao cimento obtido pela mistura em proporções apropriadas de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais contendo sílica, alumina e óxido de ferro aquecida à temperatura de clínquerização, moendo-se em seguida o clínquer resultante (NEVILLE, 1997).

A ASTM C 150<sup>1</sup> define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

As matérias primas utilizadas na fabricação do cimento Portland consistem principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, que reagem no interior do forno de produção de cimento dando origem ao clínquer, onde os compostos principais são os seguintes:

Silicato Tricálcio –  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  abreviação  $\text{C}_3\text{S}$ ;

Silicato Dicálcico –  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  abreviação  $\text{C}_2\text{S}$ ;

Aluminato Tricálcico –  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  abreviação  $\text{C}_3\text{A}$ ;

Ferro Aluminato Tetracálcico –  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  abreviação  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Estes compostos se formam no interior do forno quando a temperatura se eleva a ponto de transformar a “mistura crua” num líquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas, como ocorrem com os três produtos acima citados, e a um material intersticial amorfo, o  $\text{C}_4\text{AF}$ , e a outros óxidos, compostos alcalinos e sulfatos.

Todos esses compostos têm a propriedade de reagir em presença de água, por hidrólise, dando origem então a compostos hidratados (AÏTCIN, 2000).

As características principais destes compostos são descritas a seguir:

$C_3S$  – Também denominado de alita é o principal composto do cimento Portland, sendo o responsável pela resistência inicial do cimento. Reage em poucas horas quando em contato com a água, liberando grande quantidade de calor na hidratação.

$C_2S$  – Também denominado de belita, desenvolve baixo calor de hidratação, tendo pega lenta com fraca resistência até os 28 dias, aumentando rapidamente chegando a equivaler com a do  $C_3S$  no primeiro ano.

$C_3A$  – Tem pega instantânea, desenvolvendo altíssimo calor de hidratação. Tem baixa resistência e não resiste à ação de águas sulfatadas. Estes inconvenientes fazem com que sua quantidade seja pequena. Entretanto, a presença da alumina é de fundamental importância por agir como fundente, facilitando a formação do clínquer a temperaturas mais baixas.

$C_4AF$  – Tem pega rápida, baixa resistência, mas possui a vantagem do  $Fe_2O_3$  funcionar como fundente e fixar parte da alumina melhorando o desempenho do cimento ao ataque de águas sulfatadas.

De maneira geral, pode-se dizer que as reações de hidratação dos aluminatos são responsáveis pelo enrijecimento (perda de fluidez) e pela pega (solidificação) da pasta de cimento, enquanto que os silicatos, que compõem aproximadamente 75% do cimento comum, são fundamentais no processo de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2001). A composição química do cimento é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2– Principais compostos do cimento Portland.

<b>Compostos</b>	<b>Abreviações</b>
CaO	C
SiO <sub>2</sub>	S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
MgO	M
SO <sub>3</sub>	S
H <sub>2</sub> O	H
3 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
2CaO.Si O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S
3 CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	CSH <sub>2</sub>

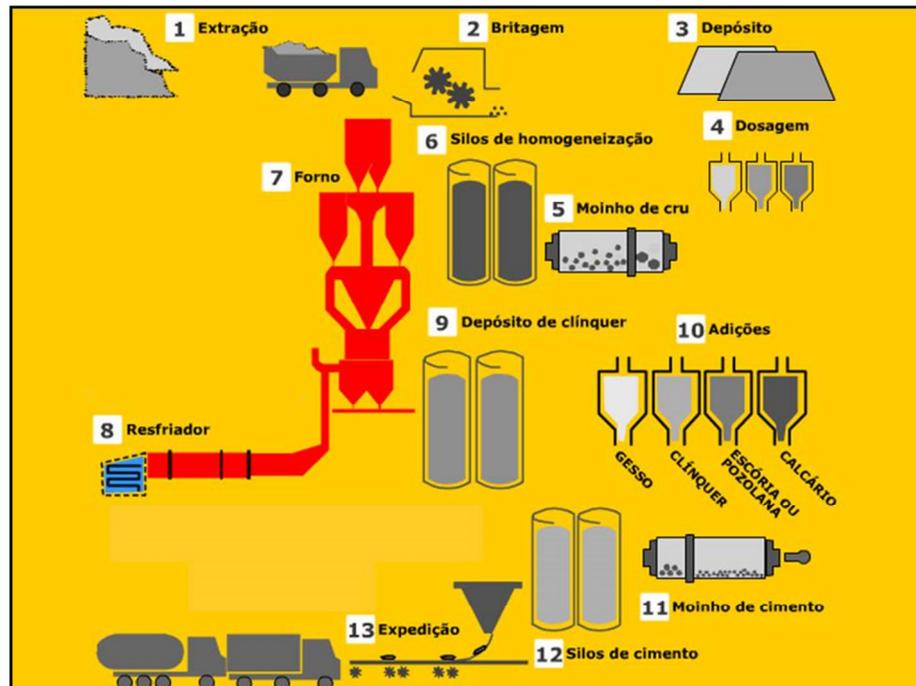
Fonte: METHA E MONTEIRO, 2001.

### 3.2.1 Processo de produção

Segundo BRAGOV *et al.*, 2002 existe quatro tipos de processos de produção de cimento: por via úmida, semi-úmida, via seca e semi-seca (Figura 3). Nos processos úmidos, a matéria-prima é moída juntamente com a água, sendo fornecida ao forno sob a forma de pasta. Nos processos secos, não utilizam água para moer a matéria-prima, apresentado umidade muito reduzida.

Atualmente 80% da produção mundial de cimento é obtida pelo processo via seca, embora, há ainda alguns processos via úmida em uso pelo mundo (MINTUS *et al.*, 2006).

Figura 3 – Processo de produção do cimento.



Fonte: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>

1 – O calcário é a principal matéria-prima para fabricação do cimento. Sua extração pode ocorrer de jazidas subterrâneas ou a céu aberto – situação mais comum no Brasil. Na etapa de extração, utilizam-se explosivos para o desmonte de rocha. Outro componente extraído nesta etapa é a argila. Em ambos os casos, um plano de gerenciamento de exploração mineral é necessário para preservar o meio ambiente (ABCP, 2009).

2 – O calcário extraído é transportado em caminhões até a instalação de britagem, onde é reduzido a dimensões adequadas ao processamento industrial. Esse tratamento permite eliminar uma grande parte de impurezas presentes no calcário. A argila, por ser friável, não passa pela britagem (ABCP, 2009).

3 – O calcário e a argila são estocados separadamente. No silo de cada material, um equipamento se encarrega de misturar as cargas, a fim de assegurar uma pré-homogeneização. Nesta fase as matérias primas são submetidas a diversos ensaios (ABCP, 2009).

4 – O composto de calcário (90%) e argila (10%) é dosado para ser cominuído no moinho de cru. Essa dosagem é efetuada com base em parâmetros químicos preestabelecidos – os

chamados módulos químicos, que dependem das características composicionais dos materiais estocados e são controlados por balanças dosadoras (ABCP, 2009).

5 – A farinha crua formada pela mistura de calcário e argila passa por moagem em moinho de bola, rolo ou barras, onde se processa o início da mistura das matérias-primas e ao mesmo tempo sua pulverização, de modo a reduzir o tamanho das partículas a 0,050 mm em média (ABCP, 2009).

6 – A mistura crua, devidamente dosada e com a finura adequada, conhecida como farinha, deve ter sua homogeneização assegurada para permitir uma perfeita combinação dos elementos formadores do clínquer. A homogeneização é executada em silos verticais de grande porte através de processos pneumáticos e por gravidade (ABCP, 2009).

7 – Pré-aquecimento (cliquerização) – Dos silos de homogeneização a farinha é introduzida no forno, passando antes por pré-aquecedores (ou pré-calcinadores), equipamentos que aproveitam calor dos gases provenientes dos fornos e promovem o aquecimento inicial do material. No forno rotativo, constituído de um cilindro de aço (revestido por tijolos refratários) com comprimentos de 50 m a 150 m e diâmetro de 6 m, a mistura é calcinada até 1450 °C, resultando no clínquer, produto com aspecto de bolotas escuras (ABCP, 2009).

8 – Um resfriador promove a redução da temperatura a 80 °C, aproximadamente. A clinquerização se completa nesta etapa, quando ocorre uma série de reações químicas que influenciarão a resistência mecânica do concreto nas primeiras idades, o calor de hidratação, o início de pega e a estabilidade química dos compostos (ABCP, 2009).

9 – A principal matéria-prima do cimento fica armazenada em silos, aguardando a próxima etapa (ABCP, 2009).

10 – Junto com o clínquer, adições de gesso, escória de alto forno, pozolanas e o próprio calcário compõem os diversos tipos do cimento Portland. Essas substâncias são estocadas separadamente, antes de entrarem no moinho de cimento (ABCP, 2009).

11 – Moagem final do clínquer, adicionado ao gesso, escória, pozolana e calcário (ABCP, 2009).

12 – O cimento resultante da moagem do clínquer e outras adições é transportado mecânica e pneumáticamente para os silos de cimento, onde é estocado. Após os ensaios finais de qualidade, o produto é enviado para expedição (ABCP, 2009).

13 – A remessa do cimento ao mercado consumidor pode ser feita de duas maneiras: a granel ou em sacos de 50 Kg. O ensacamento é feito em máquinas especiais, que automaticamente enchem os sacos e os liberam assim que atingem o peso especificado. A embalagem é feita em papel kraft, que garante o perfeito manuseio pelo consumidor (ABCP, 2009).

### 3.2.2 Tipos de cimento

Segundo a NBR 5732, o cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação de fabricação, a quantidade necessária de uma ou de mais formas de sulfatos de cálcio. Durante a moagem permite-se a adição de misturas de alguns materiais como: pozolanas, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, listados na Tabela 3.

Tabela 3– Tipos de cimentos segundo a NBR 5732.

COMPONENTES % EM MASSA						
Sigla	Nome	Classe	Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonáticos
CPI	Comum	25, 32, 40	100		0	
CPI-S			99-95		1-5	
CPII-E	Composto	25, 32, 40	94-56	6-34	-	0-10
CPII-Z			94-76	-	6-14	0-10
CPII-F			94-90	-	-	6-10
CPIII	Alto Forno	25, 32, 40	65-25	35-70	-	0-5
CPIV	Pozolânico	25, 32	85-45	15-50	-	0-5
CPV ARI	Alta resistência inicial	-	100-95	-	-	0-5
CPB	Branco estrutural	25, 32, 40	100-75	-	-	0-5
CPB	Branco não estrutural	-	74-50	-	-	26-50

Fonte: Normas Brasileiras nº 5732 (1991).

Segundo Metha e Monteiro, 2001 os tipos de cimento Portland podem ser resumidos abaixo:

- **Tipo I:** Utilizado quando não são requeridas as propriedades especiais especificadas para qualquer um dos outros tipos. Não há limites impostos para nenhum dos quatros compostos principais
- **Tipo IA:** Cimento Tipo I com incorporador de ar, onde o ar incorporado é necessário, por exemplo, na produção de concreto resistente ao congelamento.
- **Tipo II:** Para uso geral, especialmente quando se deseja moderada resistência ao sulfato ou moderado calor de hidratação.
- **Tipo IIA:** Cimento Tipo II com incorporador de ar, onde se deseja ar incorporado.
- **Tipo III:** Para uso quando se deseja alta resistência inicial. Para assegurar que a alta resistência não é devida principalmente aos produtos de hidratação do  $C_3A$ , a norma limita o teor de  $C_3A$  no cimento a um máximo de 15%.
- **Tipo IIIA:** Cimento Tipo III com incorporador de ar, quando se deseja ar incorporado.
- **Tipo IV:** para uso quando se deseja um baixo calor de hidratação.
- **Tipo V:** Para uso quando se deseja uma alta resistência ao sulfato.

### 3.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Alguns contestam o termo “resíduo de construção”, pois estes materiais geram produto final com a reciclagem e a designação dada é sinônimo de um material que não se pode mais utilizar. A melhor definição talvez seja “subprodutos”, estes são gerados por processos que incluem atividades extrativas, produção industrial e de serviços, com emprego na construção civil (LEITE, 2001).

Os aspectos ambientais referentes aos resíduos de construção civil – RCC têm gerado bastante interesse nos últimos anos, tanto no Brasil como no exterior. Diversos estudos demonstram que a massa de resíduos de construção civil gerada nas cidades é igual, ou superior, à massa de resíduos domiciliares. O surgimento de leis, normas, resoluções, decretos e planos tem como objetivo valorizar os RCC e incentivar o seu reaproveitamento (JOHN e AGOPYAN, 2001).

O reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos da construção têm como objetivo reduzir os impactos ambientais causados por este tipo de resíduo. Da mesma forma, ações que tenham a finalidade de reduzir o volume de geração dos RCC no canteiro da obra, também devem contribuir para diminuir os riscos ao meio ambiente (SCHNEIDER e PHILIPPI JUNIOR, 2004; SOUZA *et al.*, 2004).

### **3.3.1 Classificação dos resíduos de construção civil**

#### *3.3.1.1 Classificação segundo CONAMA 307*

Os resíduos devem ser classificados, do ponto de vista do risco ambiental, para que possam sofrer o correto destino e manuseio. No Brasil existe uma resolução que classifica vários tipos de resíduos da construção civil além de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, os entulhos. Segundo CONAMA 307 de 5 de julho de 2002 os resíduos de construção civil são classificados como Classe A.

#### *3.3.1.2 Classificação segundo a composição*

Segundo JOHN e AGOPYAN (2001), os resíduos de construção são constituídos de uma ampla variedade de produtos, que podem ser classificados em:

- Solos;
- Materiais cerâmicos: rochas naturais; concreto; argamassas a base de cimento e cal; resíduos de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas; cerâmica branca, especialmente a de revestimento; cimento-amianto; gesso (pasta) e placa; vidro;
- Material metálico, como aço para concreto armado, latão, chapa de aço galvanizado, etc.;
- Materiais orgânicos: como madeira natural ou industrializada; plásticos diversos; materiais betuminosos; tintas e adesivos; papel de embalagem; restos de vegetais e outros produtos de limpeza de terrenos.

A proporção entre estas fases é muito variável e depende da origem. Resíduos produzidos por manutenção de obras de pavimentação, naturalmente, vão apresentar composição compatível com os materiais empregados, especialmente na produção de asfaltos.

### **3.3.2 Medidas para redução da geração de resíduo de construção civil**

Segundo JOHN e AGOPYAN (2001), resíduo da construção são gerados em vários momentos do ciclo de vida das construções:

- Fase de construção (canteiro);
- Fase de manutenção e reformas;
- Demolição de edifícios.

Não existem estudos sistemáticos sobre a origem dos resíduos no Brasil. PINTO (1999) estimou que o resíduo de construção gerado em atividades de manutenção e reformas e, provavelmente demolição, varia 42 a 80% do total gerado. Naturalmente esta proporção vai depender das características de cada cidade.

#### *3.3.2.1 Fase de construção*

A geração do resíduo durante a fase de construção é decorrência das perdas dos processos construtivos. Parte das perdas do processo permanece incorporada nas construções, na forma componentes cujas dimensões finais são superiores àquelas projetadas. Este é o caso de argamassas de revestimento, concretos, etc. Outra parcela vai se converter em resíduo de construção. A proporção entre as duas não é conhecida em detalhes, mas PINTO (1999) estipulou que 50% das perdas são convertidas em resíduos de construção civil.

#### *3.3.2.2 Fase de manutenção*

A geração de resíduo na fase de manutenção está associada a vários fatores (JOHN e AGOPYAN, 2001):

- Correção de defeitos (patologias);
- Reformas ou modernização do edifício ou de partes do mesmo, que normalmente exigem demolições parciais;
- Descarte de componentes que tenham degradado e atingido o final da vida útil e por isso necessitam ser substituídos.

De acordo com JOHN e AGOPYAN (2001) a redução da geração de resíduos nesta fase vai exigir:

- Melhoria da qualidade da construção, de forma a reduzir manutenção causada pela correção de defeitos;
- Projetos flexíveis, que permitam modificações substanciais nos edifícios através da desmontagem que permita a reutilização dos componentes não mais necessários;
- Aumento da vida útil física dos diferentes componentes e da estrutura dos edifícios.

No Brasil, de maneira geral, os projetos não consideram nem mesmo a existência de atividades de manutenção e seus custos. Atualmente o setor concentra muito esforço em programas de gestão da qualidade. As demais medidas para a redução dos resíduos nesta fase dependem de conscientização de integrantes da cadeia produtiva da construção, que somente serão obtidas a longo prazo. Projetos flexíveis dependem de novas tecnologias, que apenas agora chegam ao país. No entanto, mesmo estas novas tecnologias não permitem a desmontagem com reaproveitamento dos componentes (JOHN e AGOPYAN, 2001).

### *3.3.2.3 Etapa de demolição*

A redução dos resíduos causados pela demolição de edifícios depende (JOHN e AGOPYAN, 2001):

- Do prolongamento da vida útil dos edifícios e seus componentes, que depende tanto de tecnologia de projeto quanto de materiais;

- Da existência de incentivos para que os proprietários realizem modernização e não demolições;
- De tecnologia de projeto e demolição ou desmontagem que permita a reutilização dos componentes.

De acordo com JOHN e AGOPYAN (2001), os profissionais brasileiros da área de construção, mesmo os acadêmicos, não possuem formação que os capacite a avaliar a durabilidade das soluções construtivas, com exceção de alguns profissionais da área de concreto armado. Portanto, a redução da geração de resíduos nesta fase depende de medidas de prazo muito longo.

## 3.4 ARGAMASSAS

### 3.4.1 Definições, composição e usos

ANBR-7200 define argamassas como a mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência.

Segundo SABBATINI (1986), argamassa pode ser conceituada como um material complexo, constituídos essencialmente de matérias inertes de baixa granulometria (agregados miúdos) e de uma pasta com propriedades aglomerantes, compostas por minerais e água.

As argamassas utilizadas em obras são comumente composta de areia natural lavada, e os aglomerantes são em geral o cimento Portland e a cal hidratada. Sua denominação é função do aglomerante utilizado. Assim, temos argamassa de cal, de cimento ou mista de cal e cimento. Os aglomerantes podem ser utilizados isolados ou adicionados a materiais inertes. No caso do emprego de um aglomerante e água, exclusivamente, estamos em presença de uma pasta.

As argamassas são muito empregadas em construção: no assentamento de pedras, tijolos e blocos nas alvenarias, onde favorecem a distribuição dos esforços; nos trabalhos de acabamentos de tetos e pisos; nos reparos de obras de concretos; nas injeções, etc.

### 3.4.2 Materiais constituintes da argamassa

A argamassa é constituída essencialmente de agregados miúdos e de aglomerantes, que em geral podem ser cimento Portland e cal (que pode ser substituídas por aditivos) e gesso.

#### 3.4.2.1 Agregados miúdos

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados miúdos são grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, e esses agregados podem ser de origem natural, já encontrados fragmentados ou resultante de britagem de rochas.

A NBR 9935 (ABNT, 1987) define agregado como o material granular pétreo, sem forma ou volume definido, a maioria das vezes quimicamente inerte, obtido por fragmentação natural ou artificial, com dimensões e propriedades adequadas a serem empregados em obras de engenharia.

Os agregados naturais são aqueles encontrados na natureza já sob forma granular, como as areias de mina, de cursos d'água e os pedregulhos ou seixos rolados.

Os agregados artificiais são aqueles que necessitam de beneficiamento, isto é trabalho de aperfeiçoamento pela ação do homem para chegar à situação de uso, como por exemplo, areias artificiais. Os agregados artificiais podem ainda ser obtidos por piro-expansão de várias composições de minerais, origem a agregados leves expandidos.

Os agregados são produzidos a partir de britagem de maciços rochosos (pedra britada, pó de pedra) ou da exploração de ocorrências de material particulado natural (areia, seixo rolado ou pedregulho).

A principal aplicação dos agregados é na fabricação de concretos e argamassas onde, em conjunto com um aglomerante (pasta de cimento Portland/água), constituem uma

rocha artificial, com diversas utilidades em engenharia de construção, cuja principal aplicação é compor os diversos elementos estruturais de concreto armado (lajes, vigas, pilares, sapatas, etc).

Além do uso em concreto e argamassas, os agregados apresentam outras aplicações no campo da engenharia, tais como: base de estradas de rodagem, lastro de vias férreas, elemento filtrante, jateamento para pintura, paisagismo, etc.

A principal aplicação dos agregados seja a areia ou a pedra, na fabricação do concreto e argamassas é de natureza econômica, tendo em vista tratar-se de materiais de baixo custo unitário, inferior ao do cimento. No entanto, os agregados possibilitam que algumas outras propriedades da rocha artificial a ser formada apresentem melhor desempenho, tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo (SCANADORALA, 2010).

#### 3.4.2.2 *Aglomerantes*

Cimento na acepção da palavra pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Já no campo da construção, o significado do termo “cimento” se restringe aos materiais ligantes usados com pedra, areia, tijolos, blocos etc. Os constituintes principais deste tipo de cimento são os calcários, de modo que na engenharia civil e na construção se pensa em cimento calcário. Os cimentos que interessam no preparo do concreto têm a propriedade de endurecer mesmo dentro da água, devido às reações químicas com esse elemento, e, portanto, são denominados cimentos hidráulicos (NEVILLE, 1997).

#### 3.4.2.3 *Cal*

A cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação adequada da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésios, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio (NBR 7175, ABNT 2003). Segundo CARASEK *et al.*, 2001 as cales podem ser classificadas, segundo a sua composição química em:

- Cálctica: teor de CaO $\geq$ 90% em relação aos óxidos totais;
- Magnesianas: 65% <CaO< 90%;
- Dolomítica: teor de CaO $\leq$ 65%.

### 3.4.3 Propriedades das argamassas de revestimento

A argamassa precisa de propriedades específicas para cumprir adequadamente suas funções tanto no estado fresco como no estado endurecido (LEGGERINI, 2001).

#### 3.4.3.1 Consistência

É a propriedade que corresponde à resistência das argamassas no estado fresco as deformações que lhe são impostas, adequando-se a quantidade de água utilizada influenciando-se pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante.

Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em *secas*, onde a pasta preenche os vazios entre os grãos, *plásticas*, onde a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados, e em *fluidas*, onde os grãos ficam imersos na pasta (SILVA,2006).

Para a avaliação da consistência da argamassa é utilizada no Brasil à mesa de consistência (*flowtable*) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e são realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 1995).

### 3.4.3.2 *Trabalhabilidade*

É a propriedade das argamassas que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea. Também pode ser considerada como a conjunção de outras propriedades, como: consistência, plasticidade, exsudação de água, coesão interna, tixotropia, adesão, densidade de massa e retenção de água (RILEM, 1982 apud ROCHA, 2005). Uma argamassa é trabalhável quando:

- Não segrega ao ser transportada;
- Não gruda na ferramenta;
- Distribui-se facilmente ao ser aplicada.

A consistência pode ser medida pelos ensaios da mesa de fluidez e penetração da bola. Para uma argamassa de boa qualidade é preciso que todos os grãos do material sejam completamente envolvidos pela pasta. Nas argamassas que apresentam consistência plástica e fluida, pode ocorrer a exsudação da água, interferindo na capacidade de adesão da argamassa (LEGGERINI, 2001).

### 3.4.3.3 *Plasticidade*

É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada de tensões de deformação. Esta propriedade é influenciada pelo teor de ar, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas (RILEM, 1982 apud ROCHA, 2005).

Segundo CASCUDO *et al.*, (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionalmente e natureza dos materiais.

#### *3.4.3.4 Aderência*

Propriedade relacionada ao fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pela ancoragem da argamassa na base. Dá-se pela entrada da pasta nos poros, reentrâncias e saliências seguida pelo endurecimento progressivo (LEGGERINI, 2001).

A base de aplicação também tem participação através de sua porosidade, rugosidade e condições de limpeza da superfície de aplicação.

A argamassa deve ser comprimida após a sua aplicação em base limpa, rugosidade adequada e umedecida.

Muitas vezes se faz necessário o uso de chapisco para aumentar a aderência. Sobre a base é lançada uma mistura de cimento, água e areia que deve secar antes da aplicação da argamassa (LEGGERINI, 2001).

#### *3.4.3.5 Retenção de água*

É a propriedade que esta associada à capacidade da argamassa fresca manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação ou pela absorção de água da base. Esta propriedade interfere não só no trabalho de acabamento do revestimento, mas também em suas propriedades no estado endurecido (ROCHA, 2005).

#### *3.4.3.6 Retração na secagem*

Esta propriedade está associada com a variação do volume da pasta aglomerante e tem grande importância no desempenho das argamassas aplicadas especialmente quanto à estanqueidade e durabilidade. A retração se inicia no estado fresco e se prolonga após o endurecimento do material. Quando a secagem é lenta, a argamassa tem tempo suficiente para adquirir resistência à tração necessária para suportar as tensões internas que ocorrem. Mas, quando o clima é quente, seco e com ventos, ocorre o aceleração da perda de água e surgimento de fissuras (BEZERRA, 2010).

A influência da quantidade de água para esta propriedade e de suma importância, pois quando se possui alta relação água/aglomerante, a pasta, retrai ao perder a água em excesso de sua composição. Pode-se dizer que parte desta retração e consequência das reações químicas da hidratação do cimento, o fator predominante é devido provavelmente à secagem.

#### *3.4.3.7 Resistência à compressão*

Esta propriedade é definida como a capacidade das argamassas resistirem às tensões de compressão, tração ou cisalhamento. Esta propriedade das argamassas está diretamente ligada à natureza e dosagem dos materiais e também da relação água/aglomerante (ROCHA, 2005).

A resistência mecânica diz respeito à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2007 apud SANTOS, 2008).

#### *3.4.3.8 Permeabilidade*

Segundo ROCHA (2005), permeabilidade da argamassa corresponde a propriedade que identifica a possibilidade da passagem de água através do material, componente ou elemento de construção. É influenciada principalmente pelos seguintes fatores: proporção e natureza dos materiais constituintes, pela técnica de execução, pela espessura da camada, pela natureza da base e por fissuras existentes.

#### *3.4.3.9 Módulo de elasticidade*

Elasticidade é a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta em se deformar sem apresentar ruptura quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar a dimensão original inicial quando cessam estas solicitações (SABBATINI, 1984).

A elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, dessa forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa a base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade (SILVA, 2006).

#### **3.4.4 Classificação das argamassas**

Segundo a NBR 13530 (ABNT, 1995) as argamassas são classificadas segundo vários critérios:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semi-pronta para argamassa;
- Quanto a propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termo isolante.

Habitualmente nas obras utilizam-se as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas.

#### **3.4.5 Reologia das argamassas**

A reologia é um dos parâmetros que vêm largamente sendo estudado, ela está relacionada com a deformação dos materiais, podendo correlacionar-se as propriedades do material com seu comportamento em situações práticas (CINCOTTO e RAGO, 1995).

BAUER (2005) conceitua reologia como sendo a ciência que estuda a deformação e escoamento da matéria. Esta propriedade estuda os materiais compreendidos entre sólidos elásticos, que obedecem à lei de Hooke e os fluidos Newtonianos. Os sólidos elásticos sofrem deformações proporcionais às forças aplicadas, já um fluido Newtoniano, em condições semelhantes, deforma-se com uma velocidade que aumenta com a intensidade da força (CICOTTO e RAGO, 1995).

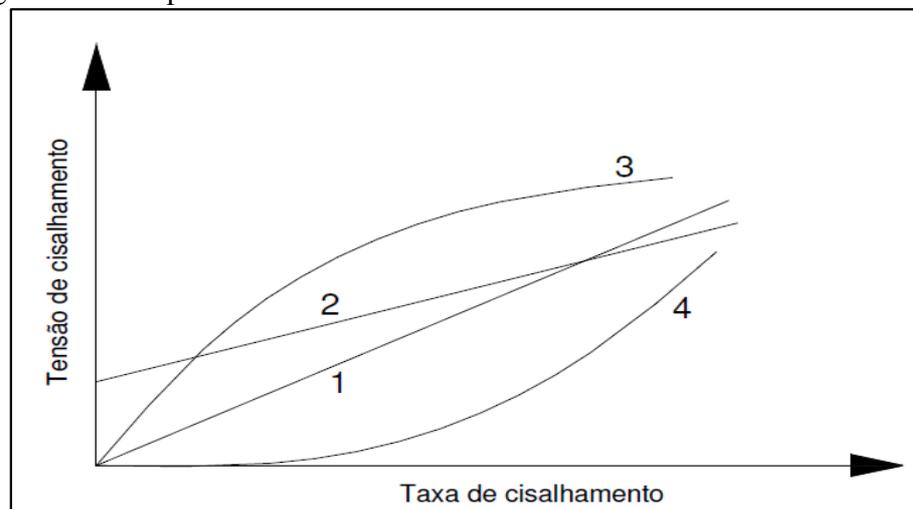
Alguns dos principais modelos reológicos utilizados para interpretar o comportamento de argamassas no estado fresco estão apresentados na Tabela 4, bem como as suas representações gráficas estão apresentadas na Figura 4. Todas as curvas podem ser descritas por uma das equações da Tabela 4.

Tabela 4– Exemplos de comportamentos reológicos.

COMPORTEMENTO	NEWTONIANO	NÃO NEWTONIANO		
<b>Definição</b>	Materiais que exibem uma relação linear entre a tensão e taxa de cisalhamento (Modelo 1 –Figura 4). Tais materiais apresentam viscosidade constante a uma dada temperatura e pressão.	Materiais onde a viscosidade não é constante e depende da taxa de cisalhamento aplicada, a uma dada temperatura e pressão. Por exemplo:		
		Pseudoplástico (Modelo 3 – Figura 4)	Dilatante (Modelo 4–Figura 4)	viscoplasticidade ou fluido de Bingham (Modelo 2 –Figura 4)
<b>Modelo matemático</b>	$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu\gamma$	$\tau = K\gamma^n$		$\tau = \tau_0 + \eta_p\gamma$

Fonte: Bauer, 2005

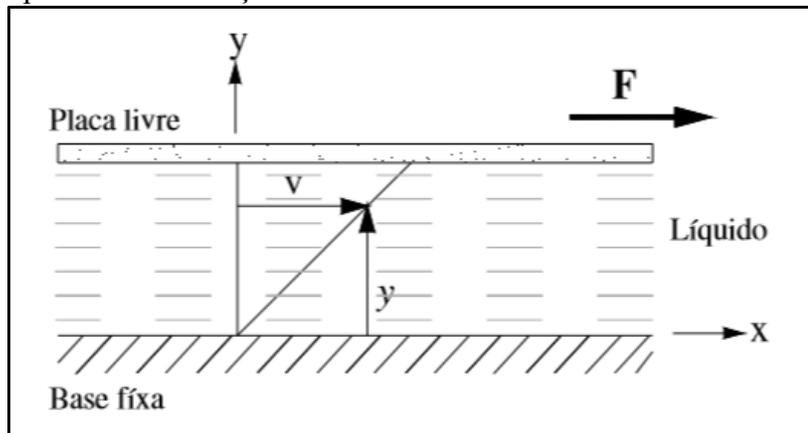
Figura 4 – Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.



1 – Fluido Newtoniano, 2 – Fluido de Bingham, 3 – Fluido Pseudoplástico e 4 – Fluido Dilatante.

As argamassas são formadas potencialmente pela composição, em proporções adequadas, de materiais como agregados, aglomerantes (cimento e cal) e água. Na maioria dos casos, assume-se que estas composições são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (no caso a pasta). Neste contexto, é comum considerar que tais concentrações escoam como um fluido, sendo aplicada a teoria clássica que envolve o escoamento de fluidos (Figura 5). Quando uma força de cisalhamento é aplicada em um fluido um gradiente de velocidade é induzido neste fluido. Nesta configuração, o fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente é chamado de viscosidade.

Figura 5 – Esquema ilustrativo do experimento de Newton para a determinação da viscosidade de fluidos.



Além da viscosidade, algumas equações incorporam um segundo fator, a *tensão de escoamento* ( $\tau_0$ ). A interpretação física deste fator indica que este representa a tensão necessária a ser aplicada a um determinado material para iniciar o escoamento (conforme ilustra a Figura 4 – Modelo 2). Um fluido que apresenta este comportamento é denominado de Fluido Bingham (Tabela 4). Em geral, este é o modelo mais utilizado para caracterizar o comportamento reológico de argamassas.

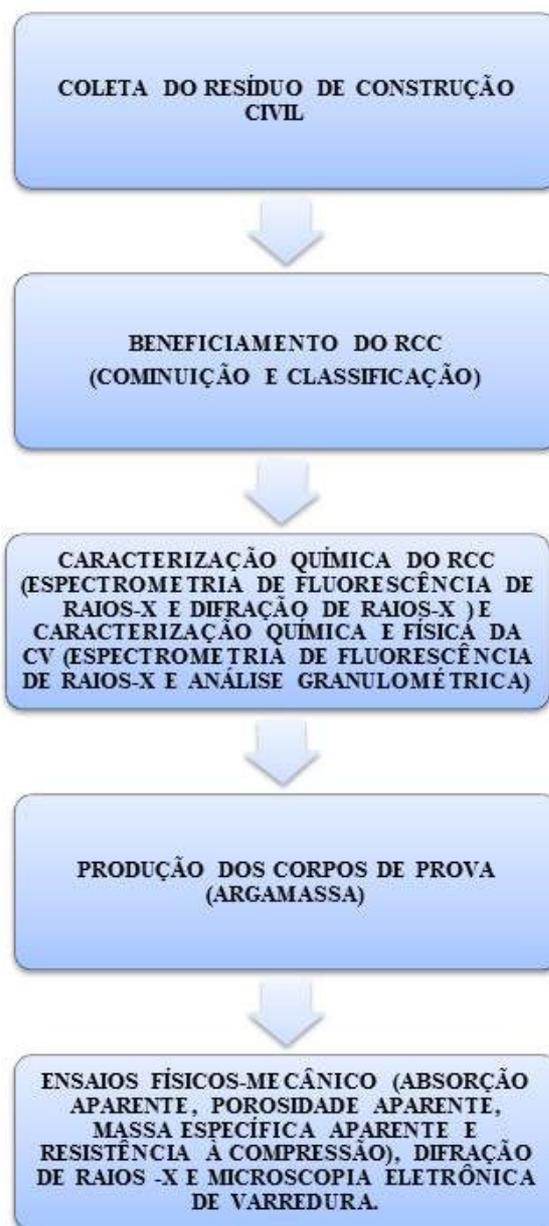
#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho experimental, os materiais utilizados foram: Resíduo de Construção Civil (RCC) bruto, coletado na Universidade Federal do Pará; Cinzas Volantes (CV) produzidas a partir da queima do carvão mineral e Cimento Portland composto (CPII Z 32). A pesquisa foi dividida em duas fases.

I) A primeira fase constitui da coleta, do beneficiamento do RCC (cominuição, classificação) sob a forma de agregado miúdo reciclado, da caracterização química (fluorescência de raios-X e difração de raios-X) do resíduo da construção civil e da caracterização química (fluorescência de raios-X) e física (análise granulométrica) da cinza volante.

II) A segunda fase constitui da produção dos corpos de prova, dos ensaios físico-mecânico (absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente e resistência à compressão), da difração de raios -X, da microscopia eletrônica de varredura dos mesmos e do ensaio reológico, conforme o Fluxograma 2 da parte experimental do trabalho a seguir.

Fluxograma 2 – Fluxograma da parte experimental.



#### 4.1 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O resíduo utilizado na produção dos corpos de prova de argamassa foi coletado nas diversas construções civis localizadas na Universidade Federal do Pará (Figura 6), esse resíduo basicamente era composto por concreto, argamassas, rebocos e materiais cerâmicos. Após a coleta os resíduos foram submetidos às operações unitárias de cominuição e classificação e caracterizados pelas análises de Espectrometria de Fluorescência de raios-X e Difração de raios-X.

Figura 6 – Resíduo de construção civil (RCC).

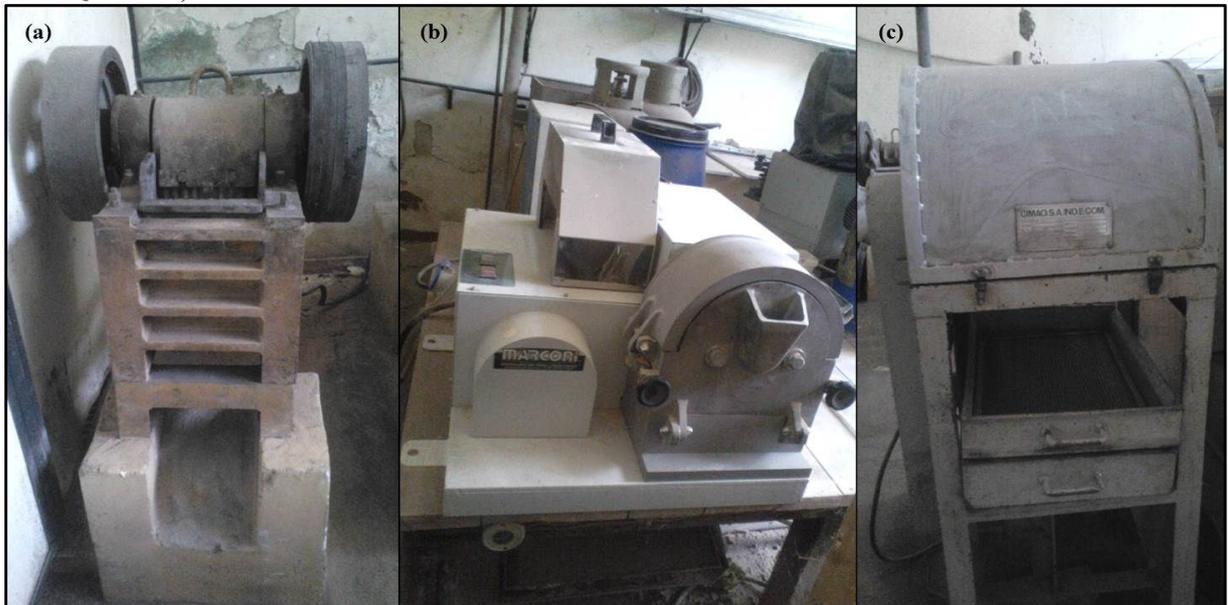


#### 4.1.1 Beneficiamento do resíduo

Na etapa de beneficiamento o resíduo foi submetido às operações de cominuição e classificação, com a finalidade de diminuir o tamanho das partículas coletadas para a produção dos corpos de prova de argamassa. A operação de cominuição abrangeu a britagem e moagem.

O resíduo, inicialmente, foi submetido à britagem no britador de mandíbulas Briterpa (Modelo 1020 – Série 08). Após essa operação o produto britado foi moído no moinho de disco Marconi (Modelo MA700 – Série 10 0690037) e finalmente no moinho de bolas (Modelo CIMAQ S.A. IND. COM.) (Figura 7). Todas as análises de beneficiamento (cominuição e classificação) foram executadas na Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Figura 7 – (a) Britador de mandíbulas; (b) Moinho de disco e (c) Moinho de bolas (USIMAT – LEQ/UFPA).

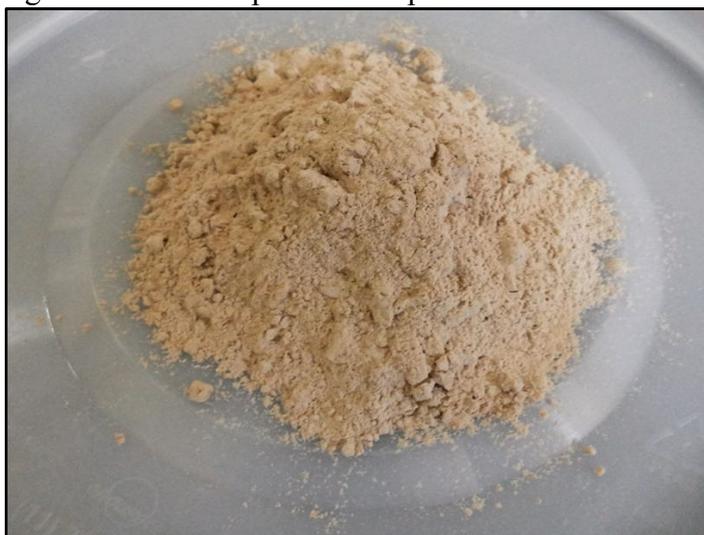


Após as etapas de cominuição o resíduo foi classificado pela operação de peneiramento (Figura 8) nas peneiras ABNT  $\frac{3}{4}$  (19,1 mm). O resíduo passante da peneira de 100# com abertura de 150  $\mu\text{m}$  (Figura 9), foi separado para posteriormente ser usado na produção dos corpos de prova de argamassa.

Figura 8 – Peneiramento do RCC (USIMAT – LEQ/UFPA).



Figura 9 – Resíduo passante da peneira de 100#



#### 4.1.2 Caracterização química do resíduo de construção civil

A caracterização química do resíduo foi feita através de duas análises químicas as quais são: espectrometria de fluorescência de raios-X e difração de raios-X realizadas no laboratório de caracterização mineral raios-X (LCM) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará.

##### 4.1.2.1 Espectrometria de fluorescência de raios-X

A análise de espectrometria de fluorescência de raios-X foi realizada no espectrômetro WDS sequencial, modelo *Axios Minerals* da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio(Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW.

A amostra foi analisada em dois modos de preparação:

- a) Disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (Tetraborato de lítio –  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), mistura fundida a 1000 °C por 10 min.
- b) Pastilha prensada: 3 g de amostra + 0,9 g de aglomerante (cera de parafina), mistura prensada com uma carga de 20 toneladas.

As aquisições e tratamento de dados foram realizados através do software *Super Q Manager* da PANalytical.

#### 4.1.2.2 Difração de raios-X (DRX)

A análise de DRX foi realizada no difratômetro de raios-X do modelo *X'Pert Pro* MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60( $\theta$ - $\theta$ ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Celerator RTMS (*Real Time Multiple Scanning*) no modo *scanning* e com *activelength* 2,122°. Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura 4° a 75° 2 $\theta$ , 40 kV, 30 mA, passo 0,02° em 2 $\theta$  e tempo/passo de 20 s, fenda fixa 1/4° e anti-espalhamento 1/2°, máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps.

#### 4.2 CINZA VOLANTE

A cinza volante (CV) utilizada neste trabalho foi proveniente da refinaria de alumina Norsk Hydro SA, localizada no município de Barcarena-PA.

Para a caracterização da cinza volante utilizou-se a metodologia descrita no trabalho de Tancredi (2006). Onde a cinza volante foi submetida à caracterização química através da espectrofotometria de raios -X realizada no Laboratório de Caracterização Mineral raios-X (LCM) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará e a caracterização física pela análise granulométrica realizada na Usina de Materiais da Engenharia Química/UFPA.

#### 4.3 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland utilizado foi classificado como tipo CP II – E 32, conforme a norma NBR11578/1991. A principal escolha desse material foi por ser um cimento com poucas adições de pozolanas, de modo que fosse elaborado um traço de referência constituído somente de cimento e rejeito para as futuras comparações com os demais traços que tivessem uma variação da porcentagem de CV.

#### 4.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova (Figura 10) utilizou-se fôrmas cilíndricas de policloreto de vinila (PVC) com dimensões de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

As proporções utilizadas e descritas na Tabela 5 para a composição dos corpos de prova foram baseadas de acordo com Carvalho *et al.* (2013) para a confecção dos corpos de prova. Foram produzidas seis amostras (sextuplicata) de cada traço, sendo produzida uma argamassa de referência (sem adição de cinza) para comparação com argamassas adicionadas de cinzas de carvão mineral em substituição ao cimento.

Os traços foram submetidos ao tempo de cura que foi de 28 dias para posteriormente as amostras serem ensaiadas.

Tabela 5– Composição dos corpos de prova.

TRAÇOS	REJEITO (%)	CIMENTO (%)	CINZA (%)
Tr1	95	5	0
Tr2	90	5	5
Tr3	85	5	10
Tr4	80	5	15
Tr5	75	5	20
Tr6	70	5	25

Nota: Na preparação dos corpos de prova foram utilizados 0,8% de água em cada traço.

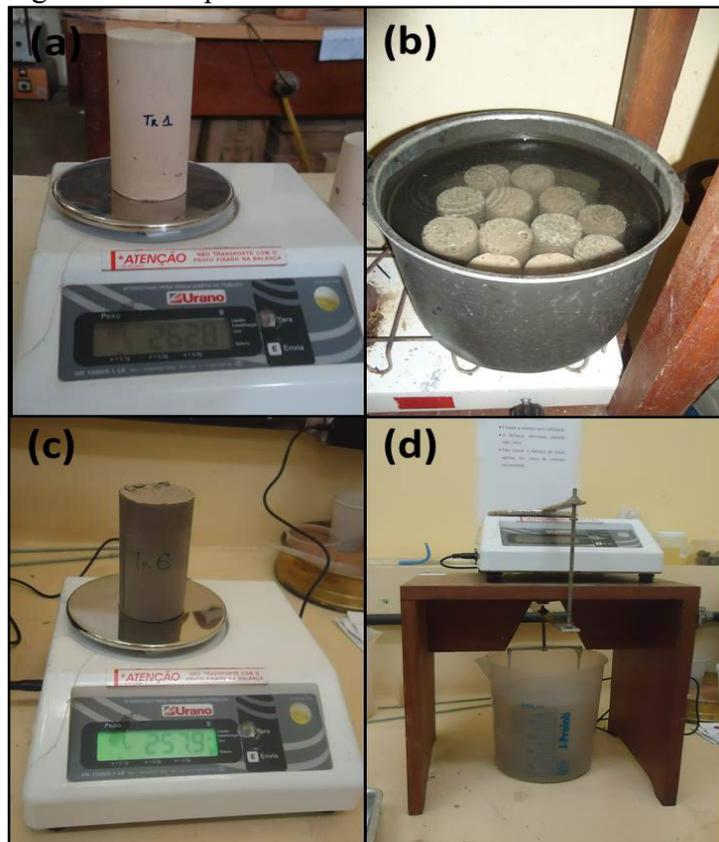
Figura 10– Preparação dos corpos de prova.



#### 4.5 ENSAIOS FÍSICOS-MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA

Após o tempo de cura dos corpos de prova de argamassa, foram executados os ensaios físicos-mecânico de absorção aparente, porosidade aparente, massa específica e resistência à compressão, para avaliar as propriedades cerâmicas e verificar como se comportavam com diferentes teores de cinza volante. Estes ensaios foram realizados na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química de acordo com a ABNT NBR 9778 e 13280. Na Figura 11 são apresentadas as etapas dos ensaios físicos de absorção, porosidade e massa específica dos corpos de prova, sendo (a) a pesagem dos corpos de prova secos; (b) absorção de água; (c) pesagem dos corpos de prova úmidos e (d) pesagem dos corpos de prova imersos.

Figura 11 – Etapas dos ensaios físicos.



#### 4.5.1 Absorção aparente

É representada pelo quociente da massa absorvida de água pelo corpo de prova saturado de água pela massa seca do corpo de prova. Calcula-se em %, de acordo com a Equação 1.

$$A_a(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Mu = Massa úmida (g)

Ms = Massa seca (g)

#### 4.5.2 Porosidade aparente

É representada pelo quociente do volume de poros abertos, de cada corpo de prova, pelo volume aparente do mesmo. Calcula-se em %, de acordo com a Equação 2.

$$P_a(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Mi = Massa imersa (g)

#### 4.5.3 Massa específica

É representada pelo quociente da massa, de cada corpo de prova seco, pela diferença da massa úmida com a massa imersa de cada corpo de prova. A massa específica foi calculada através da Equação 3.

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (3)$$

#### 4.5.4 Resistência à compressão

Os ensaios de resistências à compressão dos corpos de provas de argamassas foram realizados após 28 dias de cura em uma máquina universal AMSLER de 200 toneladas de capacidade, de acordo com a norma ABNT NBR 7215, no Laboratório de Resistência dos Materiais do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará. Na Figura 12 são mostrados os ensaios de resistência à compressão de cada traço e na Figura 13 o equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.

Figura 12 – Ensaio de resistência à compressão.



Figura 13 – Equipamento utilizado para os ensaios de resistência a compressão (LEC/UFGA).



## 4.6 ANÁLISES QUÍMICAS DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram submetidos a análises químicas de difração de raios -X e microscopia eletrônica de varredura após 28 dias de cura.

### 4.6.1 Difração de raios -X

A análise de DRX foi realizada no difratômetro de raios-X do modelo *X'Pert Pro* MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60( $\theta$ - $\theta$ ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Celerator RTMS (*Real Time Multiple Scanning*) no modo *scanning* e com *activelength*  $2,122^\circ$ . Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura  $4^\circ$  a  $75^\circ$   $2\theta$ , 40 kV, 30  $\mu\text{A}$ , passo  $0,02^\circ$  em  $2\theta$  e tempo/passos de 20 s, fenda fixa  $1/4^\circ$  e anti-espalhamento  $1/2^\circ$ , máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps.

As análises de difração de raios-X dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral raios-X (LCM) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará.

### 4.6.2 Microscopia eletrônica de varredura

As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Engenharia Química/Universidade Federal do Pará. O equipamento utilizado foi o MEV modelo TM-3000 by Hitachi (Figura 14).

Figura 14 – MEV modelo TM-3000 by Hitachi (LEQ/UFPA).



#### 4.7 ENSAIO REOLÓGICO DAS ARGAMASSAS

Para o ensaio reológico os traços foram estabelecidos obedecendo aos seguintes critérios, segundo a proporção de dosagem de materiais de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6– Composição dos traços para o ensaio reológico.

TRAÇOS	RCC (%)	CIMENTO (%)	CV (%)
Tr 1	95	5	0
Tr 2	90	5	5
Tr 3	85	5	10
Tr4	80	5	15
Tr 5	75	5	20
Tr 6	70	5	25

Nota: Para os ensaios reológicos foram utilizados 35% de água em cada traço.

As seis amostras analisadas, foram dosadas em um misturador mecânico marca SOLDTEST (Figura 15) durante cinco minutos para a completa homogeneização do material em seguida, foram separadas as alíquotas de 40 ml, para a realização das análises reológicas.

Para a obtenção das curvas de Torque versus Tempo, programou-se a uma taxa de cisalhamento constante de  $53,4 \text{ s}^{-1}$  em intervalos de 15min entre cada análise. As medidas de reologia foram determinadas em Viscosímetro Modelo Haake VT 550 (Figura 16), acoplado

ao sistema de configuração com geometria de cilindros concêntricos copo SV e cilindros SV<sub>1</sub> a temperatura de 28 °C, após 1min da preparação das amostras.

Os ensaios reológicos foram realizados no Laboratório de Reologia/LEQ da Universidade Federal do Pará.

Figura 15 – Misturador mecânico marca SOLDTEST (USIMAT/LEQ/UFPA).



Fonte: Cardoso (2014).

Figura 16 – Viscosímetro Modelo Haake VT 550 (LEQ/UFPA).



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

A caracterização dos resíduos de construção civil e das cinzas volantes está apresentada nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

#### 5.1.1 Resíduo de construção civil (RCC)

##### 5.1.1.1 Caracterização físico química por Espectrometria de Fluorescência de raios $-X$

A Tabela 7 apresenta os teores de óxidos encontrados no RCC. Observou-se que o RCC é composto em sua maioria (93,41%) por óxidos de silício, e em sua minoria por óxidos de alumínio (0,59%), ferro (0,32%) e potássio (0,19%) o que o caracteriza como um bom agregado miúdo para produção de argamassas. O alto teor de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) encontrado deve está associado, principalmente, aos agregados naturais do concreto e da argamassa de paredes presentes no RCC.

A perda ao fogo (PF) foi de 5,49%, estando, isto está relacionado à liberação da água de constituição e gás carbônico dos silicatos de cálcio hidratado, cal hidratada e carbonatos.

Tabela 7 – Composição química do RCC.

ELEMENTOS	TEOR** (%)
$\text{SiO}_2$	93,41
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,59
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,32
$\text{K}_2\text{O}$	0,19
PF*	5,49

\*Perda ao fogo

\*\*Análise do resíduo realizada no Instituto de Geociências da UFPA.

##### 5.1.1.2 Caracterização química por Difração de raios $-X$

A Figura 17 corresponde ao difratograma obtido do RCC e representa a caracterização da amostra por difração de raios  $-X$ .

Esta análise foi utilizada para identificar as principais fases químicas dos compostos do resíduo de construção civil. As composições dos principais minerais são apresentados na Tabela 8.

De acordo com as intensidades das raias de difração, verifica-se que, dos compostos cristalinos, o quartzo é mais frequente, o que caracteriza o rejeito de construção civil como um dos materiais constituintes da argamassa.

Figura 17 – Difratoograma do resíduo de construção civil.

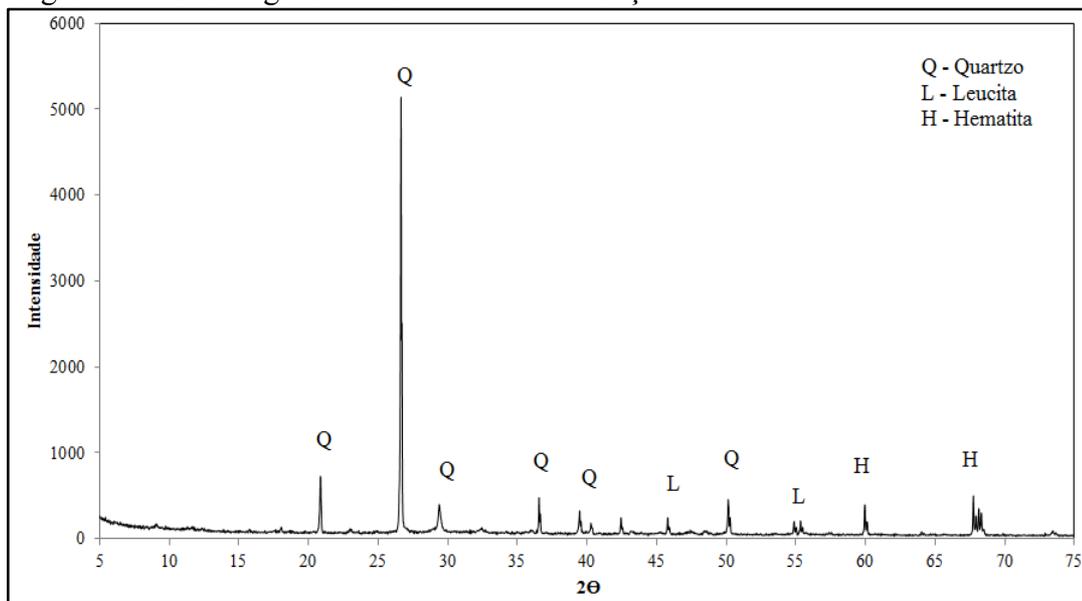


Tabela 8– Composição mineral do RCC.

MINERAIS	COMPOSIÇÃO
Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Leucita	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### 5.1.2 Cinza volante

Na Tabela 9 abaixo são apresentados à composição química da cinza do carvão mineral, obtidas a partir da análise de espectrofotometria de raios –X.

Tabela 9– Composição química da CV.

(Continua)

ELEMENTOS	TEOR*(%)
Na <sub>2</sub> O	0,941
MgO	1,836
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,399
SiO <sub>2</sub>	42,53

ELEMENTOS	(Conclusão)
	TEOR*(%)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,194
S	-
K <sub>2</sub> O	1,61
CaO	19,005
TiO <sub>2</sub>	0,897
MnO	0,073
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,081
PF**	-
C. Orgânico	-
CO <sub>2</sub> total	-
Cl (ppm)	0,056
SO <sub>3</sub>	9,208
ZnO	0,014
Rb <sub>2</sub> O	0,011
SrO	0,046
BaO	0,095

\*Análises da cinza realizada no Instituto de Geociências da UFPA.

\*\*Perda ao fogo.

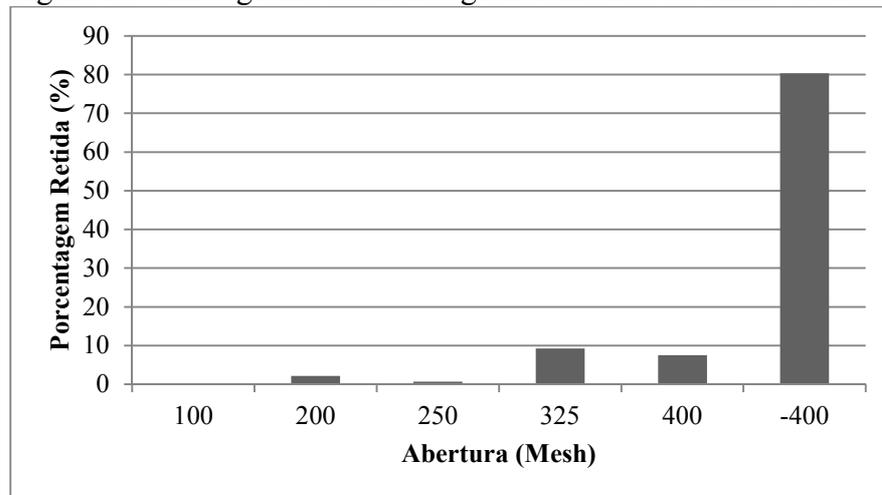
A análise química de fluorescência de raios -X mostrou que a cinza volante contém em sua composição química vários óxidos, sendo em maiores proporções os óxidos de alumínio, sílica e cálcio, o que caracteriza a cinza volante como pozolana. Segundo ASTM C593 pozolanas são definidas como materiais sílicos ou sílico-aluminosos os quais possui pouco ou nenhum valor cimentante, mais que na forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio para formar componentes que possuem propriedades cimentantes.

A Tabela 10 apresenta a análise granulométrica da cinza volante utilizada no trabalho e a Figura 18 o histograma da análise granulométrica da cinza volante. Nesta análise pode-se perceber que a cinza volante apresenta granulometria abaixo da malha 400# (abertura 38µm). Portanto, a cinza volante pode ser usada como pozolana na mistura para a produção da argamassa. Segundo a NBR 12653 este resultado caracteriza a cinza volante como um material pozolânico, visto que o material retido na peneira de 45µm está abaixo da porcentagem máxima exigida de 34%.

Tabela 10– Análise granulométrica da cinza volante.

MALHA #(Tyler)	ABERTURA ( $\mu\text{m}$ )	M. RETIDA (g)	M. RETIDA (%)	M. ACUMULADA (%)	M. PASSANTE ACUMULADO (%)
100	149	0,01	0,01	0,01	99,99
200	74	2,13	2,13	2,14	97,86
250	63	0,7	0,7	2,84	97,16
325	45	9,25	9,25	12,09	87,91
400	38	7,55	7,55	19,64	80,36
-400	-38	80,36	80,36	100	0

Figura 18 – Histograma da análise granulométrica da cinza volante.



## 5.2 ENSAIOS FÍSICOS-MECÂNICO

Na Tabela 11 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios físicos-mecânico das argamassas em diferentes traços.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios físico-mecânicos.

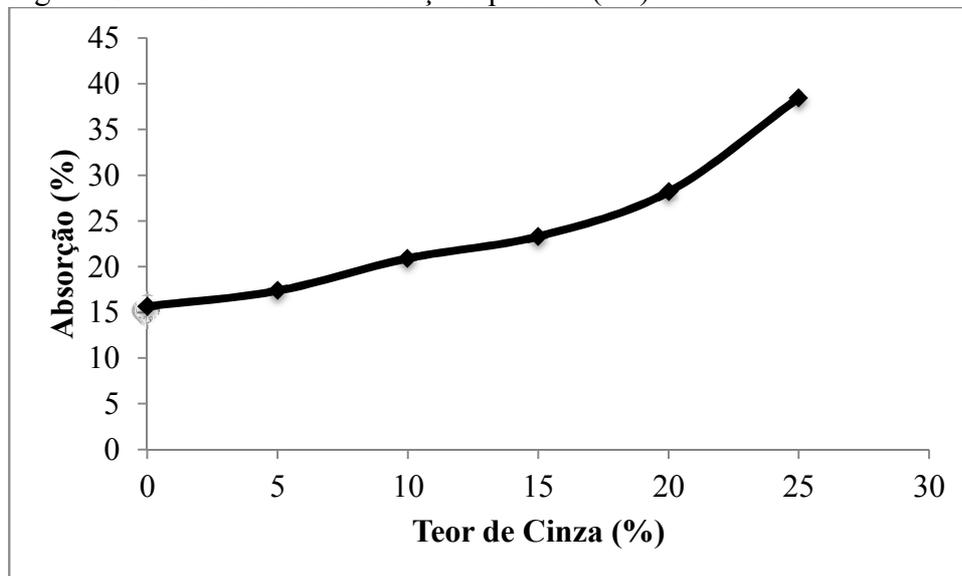
TEOR REJEITO (%)	TEOR CINZAS (%)	TEOR CIMENTO (%)	ABSORÇÃO (%)	POROSIDADE (%)	MASSA ESPECÍFICA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
95	0	5	15,65	23,48	1,50	10,49
90	5	5	17,35	24,50	1,41	7,49
85	10	5	20,90	29,00	1,39	6,49
80	15	5	23,30	31,34	1,35	5,74
75	20	5	28,18	36,18	1,28	3,75
70	25	5	38,45	43,06	1,12	3,25

A partir dos resultados da Tabela 11 produziram-se os gráficos de absorção, porosidade, massa específica aparente e resistência à compressão versus teor de cinzas.

### 5.2.1 Absorção aparente

Na Figura 19 são apresentados os resultados obtidos das argamassas para absorção aparente.

Figura 19 – Resultados da absorção aparente (Aa).

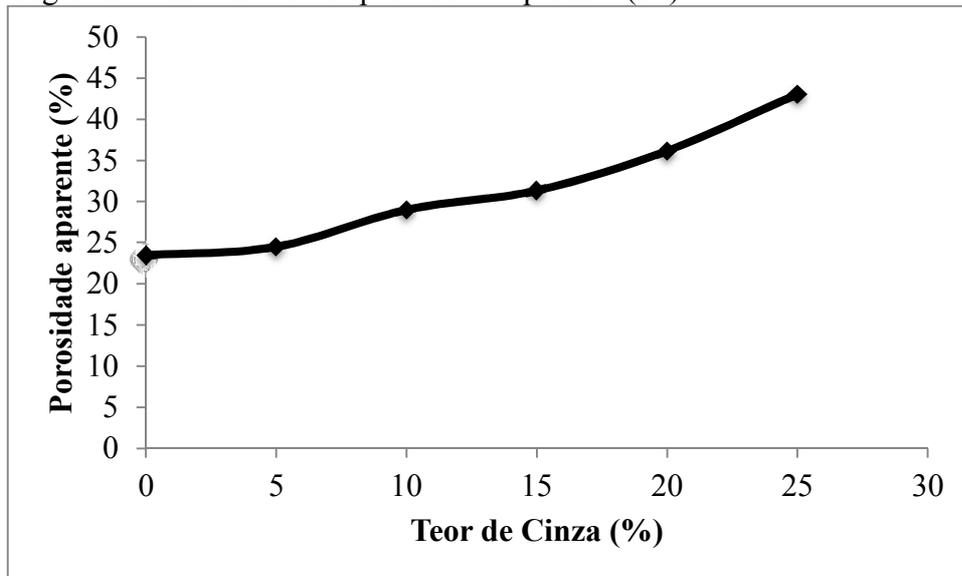


Os resultados mostraram que ocorreu um aumento na absorção de água em todos os traços de argamassas formulados para 28 dias de cura. Esse aumento de absorção de água pode estar relacionado à quantidade de finos incorporados a partir da adição gradativa da cinza volante aumentando o número de vazios no material, justificando o aumento da absorção de água.

### 5.2.2 Porosidade aparente

Na Figura 20 são apresentados os resultados obtidos das argamassas para porosidade aparente.

Figura 20 – Resultados da porosidade aparente (Pa).

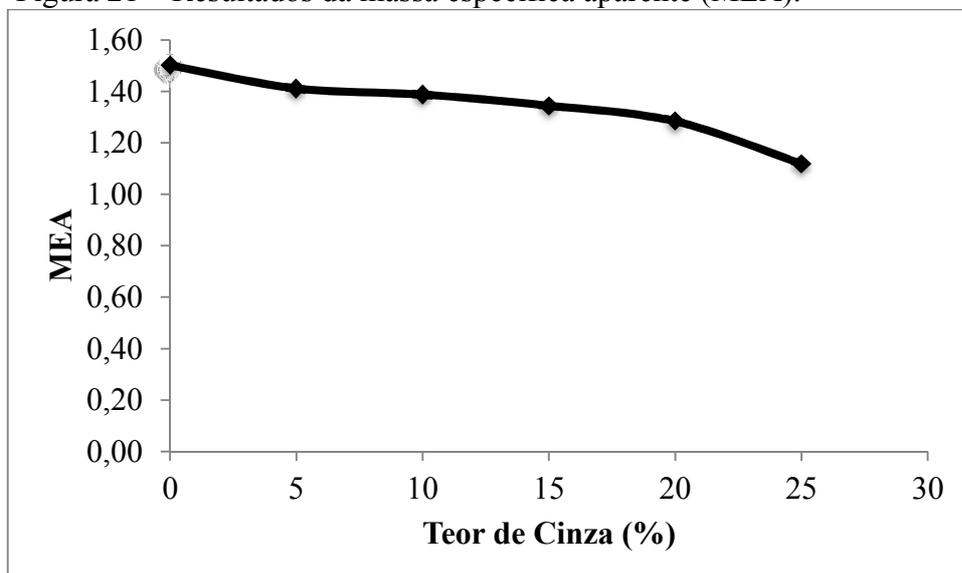


Observa-se um aumento da porosidade em cada traço de argamassa com a adição de cinza volante, isso é devido à quantidade de maiores espaços livres entre as partículas formados durante o processo de cura, resultando em uma maior porosidade aparente.

### 5.2.3 Massa específica aparente

Na Figura 21 são apresentados os resultados obtidos das argamassas para massa específica aparente.

Figura 21 – Resultados da massa específica aparente (MEA).

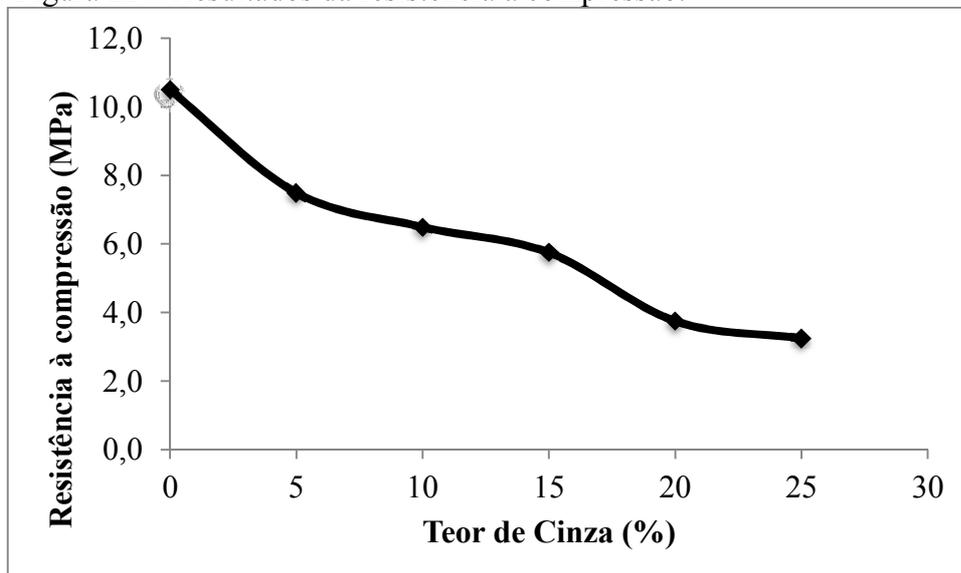


À medida que se aumenta o teor de cinza volante nos traços as massas específicas aparente das argamassas diminuem isto pode estar associado à perda de água durante o processo de cura dos corpos de prova ao ar aumentando o volume de vazios.

#### 5.2.4 Resistência à compressão

Na Figura 22 são apresentados os resultados obtidos das argamassas para resistência a compressão.

Figura 22 – Resultados da resistência à compressão.



Observa-se que o aumento do teor do resíduo cinza volante gerou uma redução na resistência das argamassas. Este comportamento indica que a substituição parcial do cimento por cinzas volantes influencia na resistência à compressão. Segundo Farias Filho et al. (2000) e Coimbra et al. (2002) estudos mostraram melhoras na resistência à compressão simples de argamassas quando da utilização de pozolanas em substituição parcial do cimento, sendo possível substituir o cimento em teores de até 40%. Outro fator que pode estar associado à redução da resistência mecânica é formação de vazios durante o processo de cura dos corpos de prova.

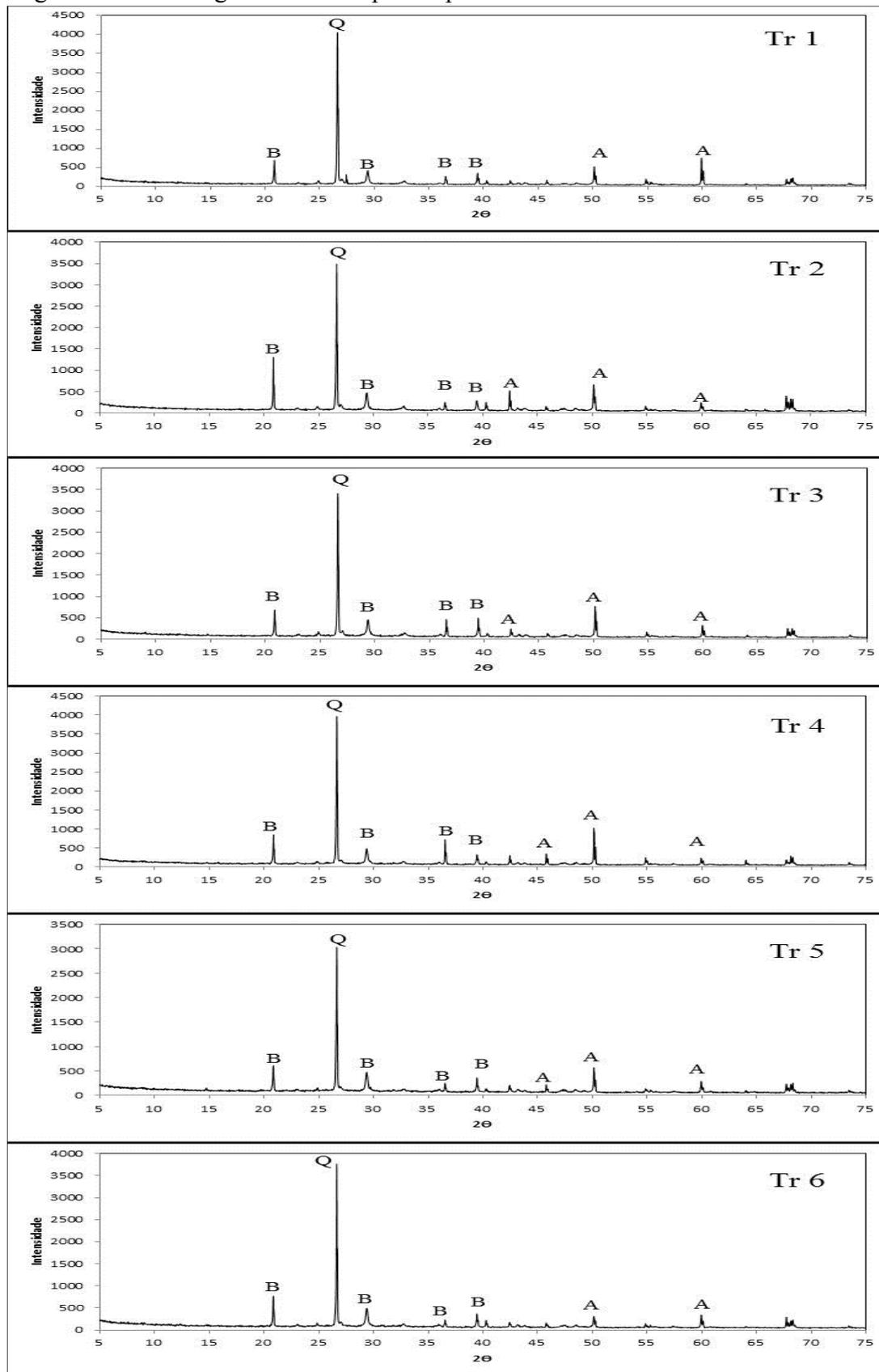
### 5.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Na difratometria de raios  $x$  o objetivo foi identificar os compostos presentes nas matrizes das argamassas, para visualizar como os elementos presentes na cinza volante *in natura* reagiriam com o cimento na presença de água. A combinação de elementos, formando outros compostos, pode mostrar se as reações químicas aconteceram entre o resíduo e o cimento, caracterizando a ação pozolânica da cinza volante.

A Figura 23 mostra os difratogramas dos seis corpos de provas. Com a obtenção dos picos de intensidade de cada fase pôde-se analisar as fases químicas presentes nos diferentes traços de argamassa. Observa-se que nas seis amostras há formação de cristais de belita (B) e alita (A) comprovando que a cinza volante apresenta atividade pozolânica.

Nos difratogramas dos traços 1 e 2 com 0 e 5% de cinza volante é possível observar o início da formação dos picos dos cristais das alitas e belitas, sendo o pico máximo nas composições de 10 e 15% em peso de cinza volante. Nas composições 20% e 25% de cinza volante a formação desses cristais é reduzida (diminuição dos picos), isso pode ser devido a pouca quantidade de cimento na composição das argamassas provocando a formação de poucos cristais de belita e alita.

Figura 23 – Difratomogramas dos corpos de prova aos 28 dias de cura<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Q – Quartzo: Padrão de difração; 2θ: Ângulo de espalhamento (ângulo entre a onda incidente e a onda espalhada).

#### 5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Na análise de microscopia eletrônica de varredura o objetivo foi identificar os cristais de belita ( $C_2S$ ) e alita ( $C_3S$ ) formados nos seis traços de argamassa. A formação desses cristais nas estruturas das argamassas influencia no desempenho de sua resistência mecânica.

As micrografias obtidas abrangeram ampliações de 1.5k a 2.5k vezes e foram realizadas nos corpos de prova fraturados. Nota-se que a formação desses cristais é crescente nas composições de 0%, 5%, 10% e 15% com o aumentam da adição de cinza volante, comprovando a atividade pozolânica desse resíduo (CV) e confirmando o resultado obtido na análise de difração de raios-X, conforme pode ser observado nas Figuras 24 a 29.

Observa-se ainda que a formação dos cristais de alita e belita é mais visível nas composições dos traços 3 e 4 com 10 e 15% de cinza volante, respectivamente confirmando a atividade pozolânica da cinza volante com os resultados dos difratogramas dessas composições.

Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 1.

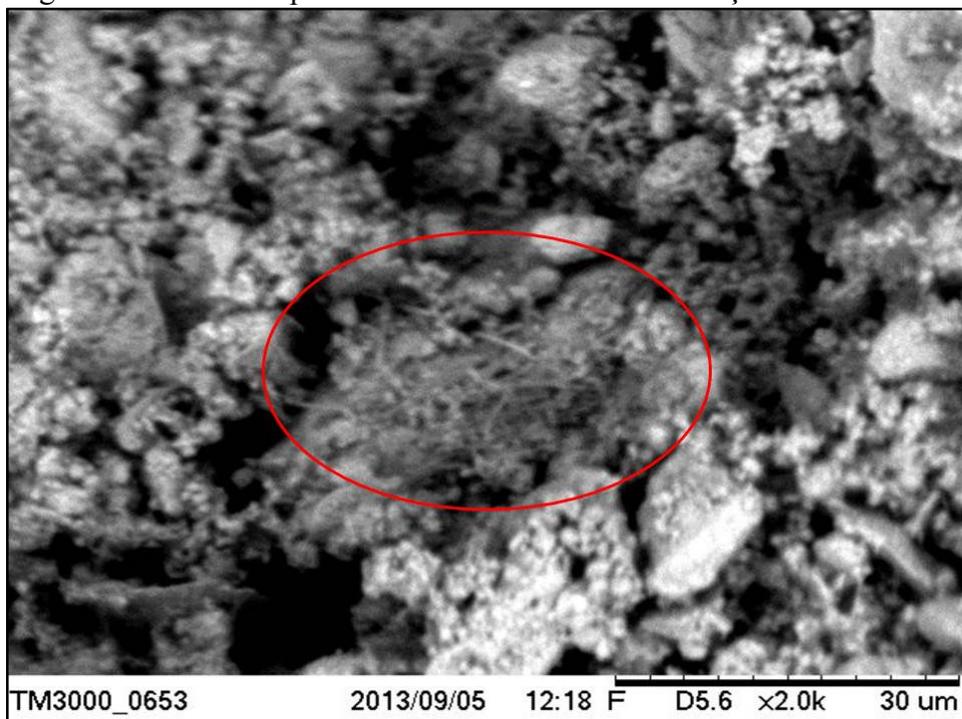


Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 2.

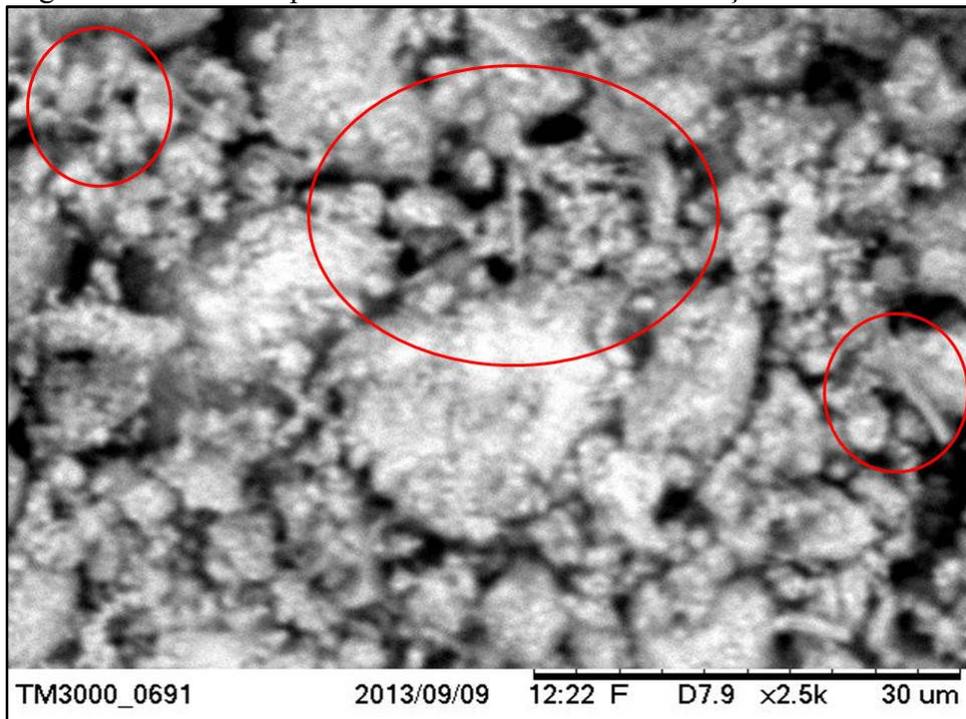


Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 3.

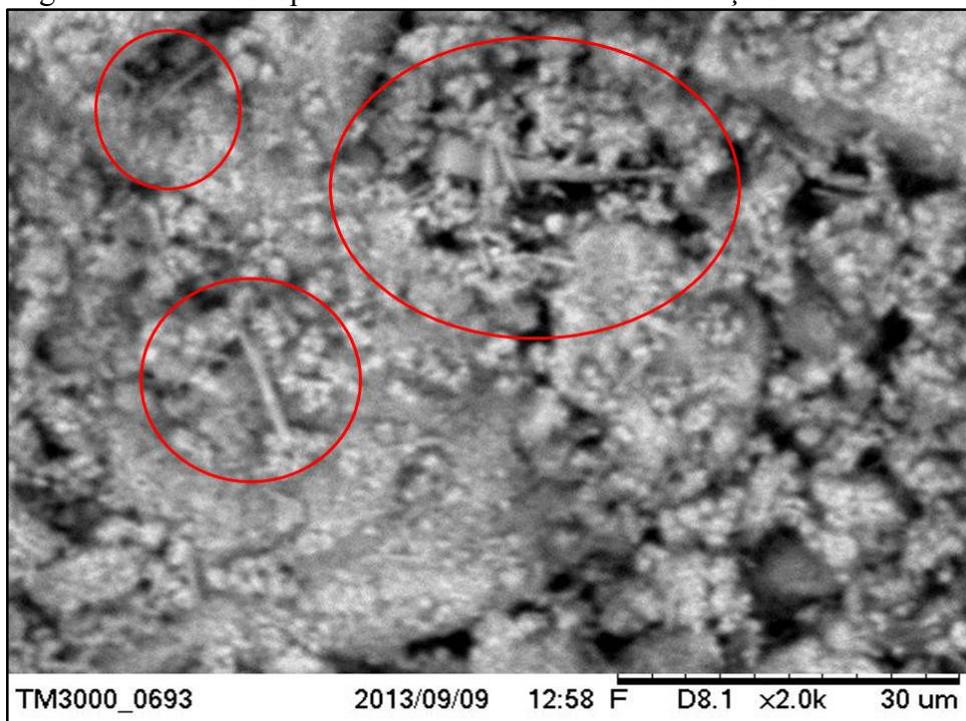


Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 4.

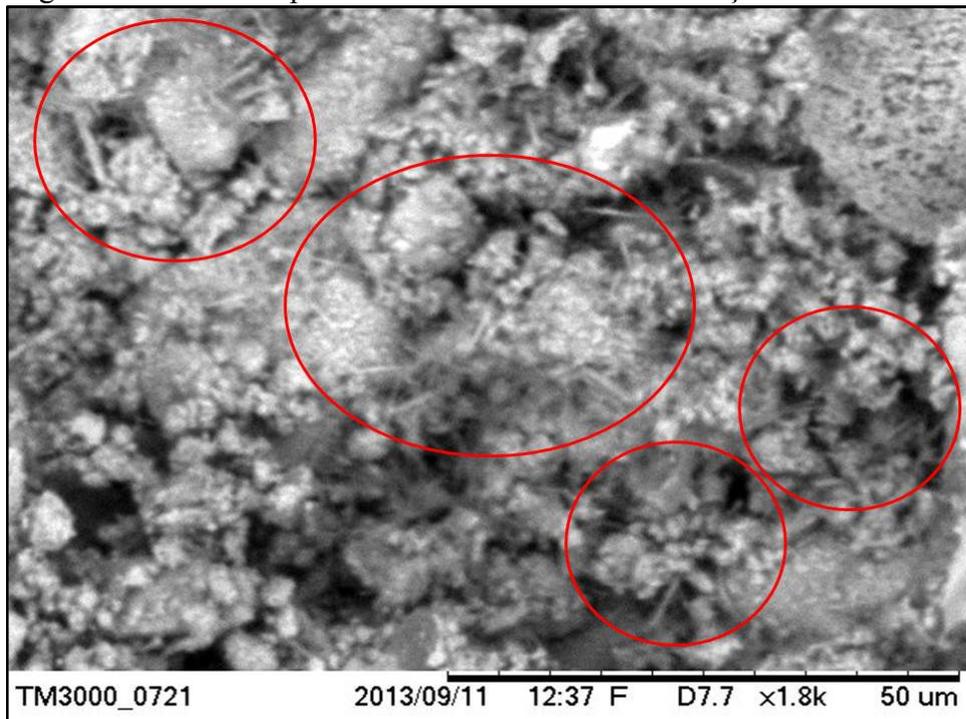


Figura 28 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 5.

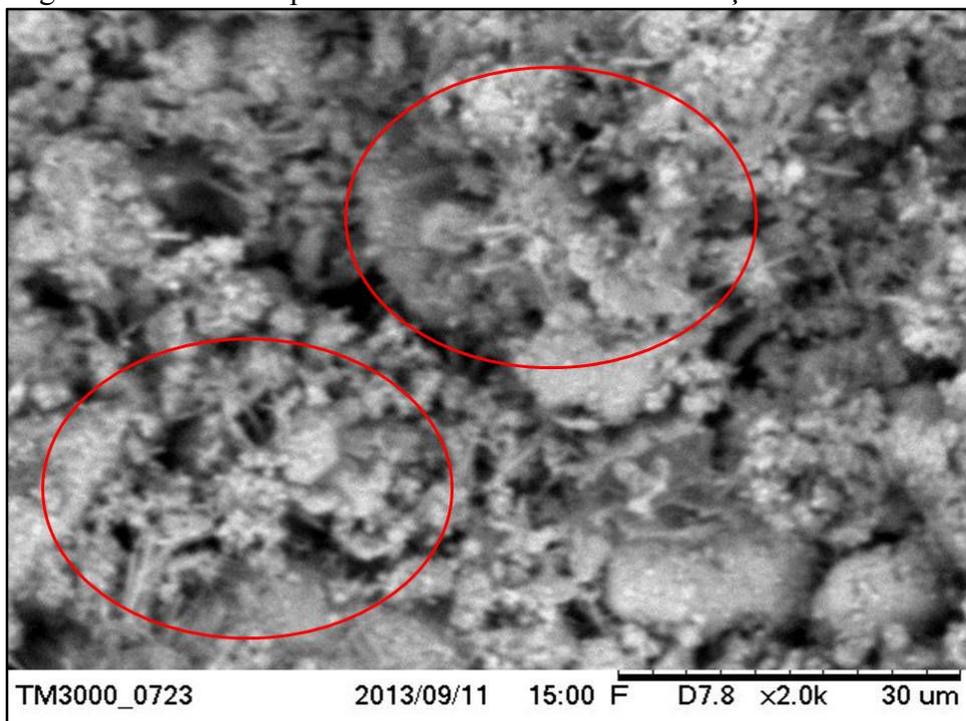
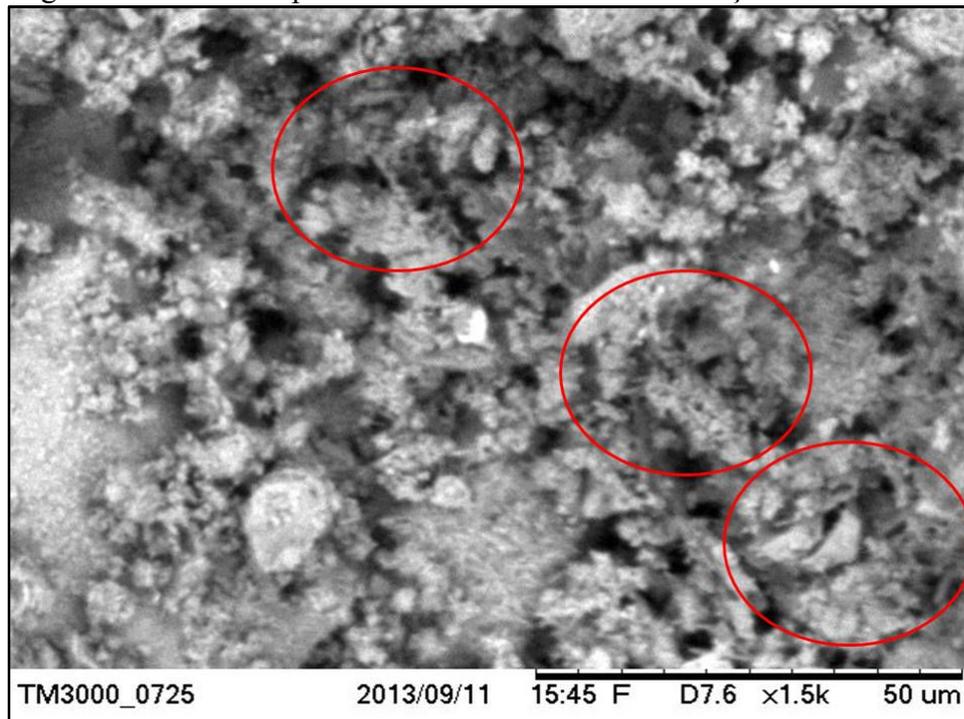


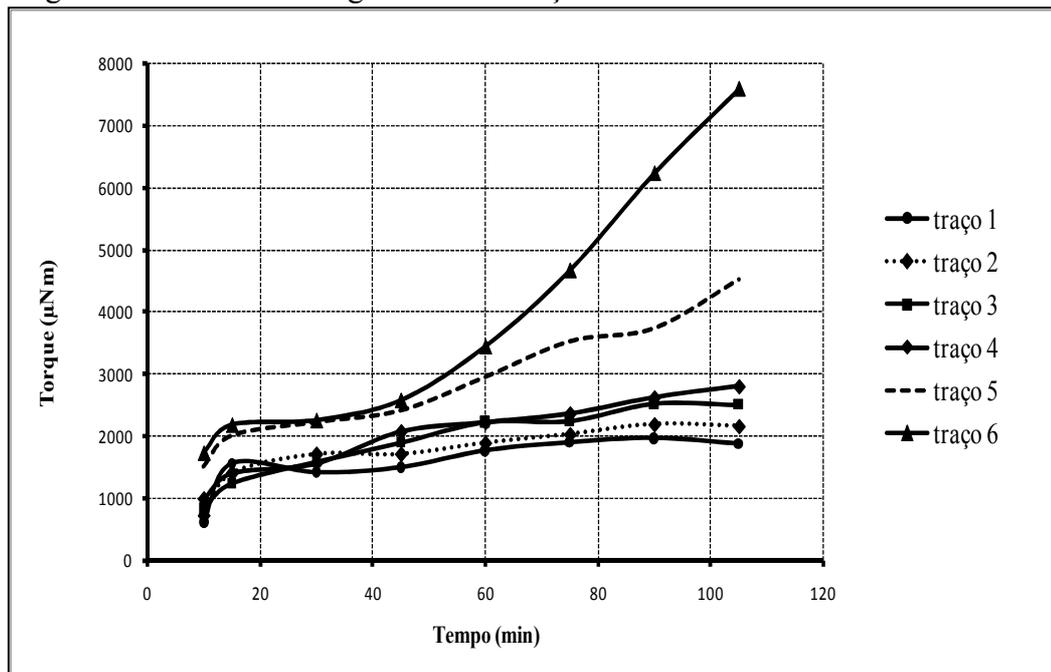
Figura 29 – Microscopia eletrônica de varredura do Traço 6.



## 5.5 ENSAIO REOLÓGICO

A Figura 30 mostra os resultados do ensaio reológico para os seis traços de argamassas.

Figura 30 – Análise reológica de cada traço.



De acordo com a Figura 30 as composições das argamassas apresentaram um crescente aumento do torque de acordo com o tempo de execução de ensaio, sendo este aumento pouco evidenciado no traço 1 (0% de CV). Este comportamento é mais pronunciado à medida que se adiciona de forma crescente CV aos traços posteriores, sendo observado um torque máximo no traço 6 (25% de CV).

Observou-se que uma das causas do aumento do torque em relação ao tempo de ensaio é devido ao aumento da absorção de água no sistema. Esse aumento de absorção de água é explicado pela associação da mistura de cinza volante e resíduo da construção civil, pois os mesmos apresentam granulometrias finas (<325#) e quando misturados à água formam estruturas tridimensionais sendo confirmadas no estado endurecido (alitas e belitas). Segundo CRIADO (2009), a elevada absorção de água em misturas de granulometrias finas levará a formação de uma cadeia cristalina de produtos hidratados.

## 6 CONCLUSÃO

O uso da cinza volante em conjunto ao resíduo de construção civil mostrou que ocorreu uma considerável mudança nas características físico-mecânica e químicas das propriedades das argamassas estudadas em relação ao tempo de cura.

Os resultados dos ensaios físicos mostraram que as argamassas em todas as seis composições apresentaram aumento de valores para absorção e porosidade aparente, na medida em que se aumentou o teor de cinza volante. Enquanto que, no resultado de resistência à compressão foi observado uma diminuição nos valores, um dos motivos é devido a formação de espaços vazios durante o processo de cura dos corpos de prova.

O ensaio de difração de raios  $X$  possibilitou observar os traços formados com arranjo de cristais de alitas ( $C_3S$ ) e belitas ( $C_2S$ ) com a adição gradativa da cinza volante, comprovando que houve reações pozolânicas nas composições das argamassas, sendo a formação desses cristais máxima nos traços 3 e 4 (10 e 15% de cinza volante).

A microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova fraturados confirmou a formação dos cristais de alita e belita nas seis formulações de argamassas. Porém, as formulações de 10 e 15% de cinza volante esses cristais foram mais visíveis.

No ensaio reológico possibilitou avaliar com o aumento do teor da cinza volante nos traços o aumento do torque em relação ao tempo de ensaio, portanto a absorção de água no sistema e a formação de estruturas tridimensionais resultando assim na aceleração do tempo de cura das argamassas.

Os resultados apontaram que a utilização do resíduo da construção civil e de cinza volante se configura como uma boa alternativa de reaproveitamento de matéria reciclada para a produção de argamassas de baixo custo. É evidente que para os traços 3 e 4 com 10, 15% em peso de cinza volante, a microestrutura da argamassa se comporta como aglomerante, quando comparada aos outros traços (20 e 25% de cinza volante) e pode ser perfeitamente utilizada para argamassa de assentamento e reboco em diversas aplicações de construção civil.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência de outros teores de resíduo da construção civil e de cinza volante na produção de argamassas de assentamento e revestimento;
- Estudar a influência de aditivos aceleradores e retardadores de reação no desempenho mecânico;
- Avaliar a resistência de aderência à tração das argamassas em estudo;
- Estudar a viabilidade econômica do emprego das formulações estudadas neste trabalho, especialmente as formulações Tr 3 e Tr 4 que apresentaram melhor resultado;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Fabricação do cimento Portland*. São Paulo, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação de consistência. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13530**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ADRIANO, D. C.; PAGE, A. L.; ELSEEWI, A. A.; CHANG, A. C.; STRAUGHAN, I. *Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review*. J. Environm. Qual., v. 9, n. 3, p. 333-334, 1980.

AİTCIN, P. *Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow*. Cement and Concrete research, v. 30, n. 9, p. 1349-59, sep. 2000.

ASTM Standard C 150, *Specification for Portland Cement*.

ASTM Standard C593, *Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*.

BAUER, E., *Revestimentos de argamassas – características e peculiaridades*. Brasília: LEM-UnB, Sinduscon, 2005. 92p.

BEZERRA, I. M. T., *Cinza da casca do arroz utilizadas em argamassas de assentamento e revestimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2010.

BRAGOV, A., LOMUNOV, A., KRUSZKAB, L., *Study of Dry and Wet Cement Mortar Dynamic Properties, Strength of Materials*, v 34, n 3, 2002.

BRASIL, *Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008*, Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008

CARASEK, H. CASCUDO, O. SCARTEZINI, L. M., *Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa*. 2001. IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Brasília.

CARDOSO, D. N. P. *Influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento. Fabricado com reciclagem de resíduos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Engenharia Química). Universidade Federal do Pará. Belém/Pará, 2014.

CARVALHO, R. N. F. M.; CASTRO, K. F.; GONÇALVES, S. G; BESSA, B. T.; SOUZA, J. A. S. QUARESMA, D. S. *Sustentabilidade na construção civil: Reaproveitamento de rejeitos argilo-minerais da construção civil para produção de argamassas*. 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 5º Congresso Íbero-Americano de Cerâmica, 2013, Natal/RN.

CASCUDO, O., CARASEK, H.; CARVALHO, A. *Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone*. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS VI, 2005, Florianópolis. Anais Florianópolis: ANTAC, p. 83-94, 2005.

CINCOTTO, M., RAGO, F., *A reologia da pasta de cimento e a influência da cal*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, 1., 1995. Goiânia: SBTA, 1995.  
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, *Estudo Prospectivo do setor Siderúrgico*, ABM, 2006.

CHERIA, M.; ROCHA, J. C., *Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil*. In: Encontro Nacional sobre Edificações e comunidades sustentáveis, 1ª Anais, Canela, 1997 p. 81-92.

COIMBRA, M. A.; SANTOS, W. N. dos; MORELLI, M. R.. *Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil*. Cerâmica. vol. 48 no.306 São Paulo, 2002.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 307 de 05/07/02 – *Gestão dos Resíduos da Construção Civil*, 2002.

CRIADO, M., PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., BANFILL, P. F. G. *Alkali Activated Fly Ash: Effect of Admixture on Paste Rheology*. Rheologica Acta, V. 48, No. 4, 2009, pp. 447-455.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, *Balanco Mineral Brasileiro – 2001 – Brasília*.

FARIAS J. F.; ROLIM, J. S.; TOLEDO, R. D. F.; *Reciclagem de resíduos da construção civil para produção de argamassas*. Rev. Bras. Eng. Agr. Amb. 4, 3 (2000) 437.

FERRET, L. S., *Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

JOHN, V. M., AGOPYAN, V., *Reciclagem de resíduos da construção*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da USP (PCC USP), 2001.

LEGGERINI, M. R. C. *Materiais técnicos e estruturas I*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2001.

LEITE, M. B. *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Porto Alegre, 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 2001.

MINTUS, F., HAMEL, E. S., KRUMM, E. W., *Wet Process Rotary Cement Kilns: Modeling and Simulation, Clean Techn Environ Policy*, v 8, p. 112-122, 2006.

NEVILLE, Adam Matthew. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 1997.

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

QUEROL, X.; MORENO, N.; UMANÁ, J. C.; ALASTUEY, A.; HERNANDÉZ, E.; LÓPEZ-SOLER, A.; PLANA, F. *Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview*. Int. Journal Coal Geol, v. 50, p. 413-423, 2002.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. 2011. *Caracterização Física, Química e Mineralógica de Cinza Leve de Caldeira e sua Utilização na Síntese de Zeólitas e Aplicação do Material Zeolítico na Adsorção de Cu+2 e Cd+2*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, 2011.

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O., CHIES, F.; SILVA, N. I. W. *Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais*. Porto Alegre: CIENTEC. V. 1 (202 p), 2006.

ROCHA, A. K. A. *Incorporação de Resíduo de Caulim em Argamassas de Alvenaria*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2005.

SABBATINI, F. H., *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária*. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SABBATINI, F. H., *Patologia das argamassas de revestimento – aspectos físicos*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 3., 1986, São Paulo. *Anais...* São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986, p. 69-76.

SANTOS, H. B. *Ensaio de Aderência das Argamassas de Revestimento*. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2008.

SCANDOLARA, J. P., *Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolo*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Joinville.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI JUNIOR, A. *Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo*. Revista Ambiente Construído, v.4, n.4, p21-32, 2004.

SILVA, R. P. *Argamassas com adição de fibras de polipropileno – Estudo do comportamento reológico e mecânico*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2006.

SIQUEIRA, J.S. *Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas*. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

SOUZA, U. E. L; PALIARI, J. C; AGOPYAN, V; ANDRADE, A. C. *Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva*. Revista Ambiente Construído, v.4, n.4, p33-46, 2004.

TANCREDI, G. A. H., *Estudo das propriedades do concreto com adição de cinza de carvão mineral de caldeiras de leito fluidizado*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará. Belém.