



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE**  
**MATERIAS**

**JOELANE MARIA DE CARVALHO TEIXEIRA**

**UTILIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL COMO**  
**ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO**

**FORTALEZA**

**2013**

**JOELANE MARIA DE CARVALHO TEIXEIRA**

**UTILIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL COMO  
ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

**FORTALEZA**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- T266u Teixeira, Joelane Maria de Carvalho.  
Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento / Joelane Maria de Carvalho Teixeira. – 2013.  
97 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2013.  
Área de Concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.  
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira.
1. Ciência dos Materiais. 2. Argamassa. 3. Pozolanas. I. Título.



Universidade Federal do Ceará

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

**PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**JOELANE MARIA DE CARVALHO TEIXEIRA**

**Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na  
produção de argamassa para revestimento**

A Comissão de Dissertação de Mestrado composta pelos professores, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; Enio Pontes de Deus, da Universidade Federal do Ceará e Divanira Ferreira Maia, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, considera a candidata:

APROVADA

NÃO APROVADA

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 26 de julho de 2013.

Prof. Ricardo Emílio F. Q. Nogueira

Presidente e Orientador

Prof. Enio Pontes de Deus

Membro

Prof. Divanira Ferreira Maia

Membro



Ao meu Pai eterno e soberano **Deus**, ao meu rei e salvador **Jesus Cristo**, ao meu amigo **Espírito Santo**, por ter amado, levantado e sustentado.

À minha mãe por tudo o que representa em minha vida.

**Essa é uma conquista nossa!!!**

## AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente por sempre me dar força, coragem e sabedoria para enfrentar todos os obstáculos.

À minha mãe Socorro, pela imensa preocupação com minha educação e formação acadêmica, pelo incentivo e palavras de ânimo e por acreditar em mim. Agradeço por sempre estar do meu lado, apoiando minhas decisões, rezando e torcendo pelo meu sucesso.

À minha irmã Joelma, e aos meus sobrinhos Pedro Henrique e Lara pelo carinho e pela torcida.

À todos os meus familiares, em especial à minha tia Ceíça por sempre me apoiar e incentivar meus estudos.

Agradeço ao meu querido orientador Prof. Ricardo Emílio, por ter me aceitado como orientanda, pela liberdade e confiança a mim concedida referente ao presente trabalho, além da indiscutível amizade e compreensão em momentos difíceis.

Ao professor Aldo, por suas preciosas colaborações e por ter disponibilizado o Laboratório de Materiais de Construção Civil para a execução dos ensaios.

À minha grande amiga e companheira de laboratório Suely, pelo ombro amigo que tanto precisei nos momentos difíceis e nas alegrias compartilhadas. Sinto que nós percorremos este caminho juntas, nos complementando e nos fortalecendo. Obrigada pela rica troca e cumplicidade!

Aos amigos do LABMAT: Hálisson, Iguinho e Renan pelas manifestações de amizade, carinho e bom humor que permearam em todos os momentos de convívio.

Aos colegas do BIOMATERIAS, em especial Silvio, pelos conselhos e prestimosa ajuda nas correções finais.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Helano e Maurício, pela boa vontade na ajuda dos ensaios.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais pela oportunidade a que me foi concedida, especialmente ao coordenador Igor Frota e ao secretário Lucivaldo pela atenção e o atendimento sempre eficiente.

Aos companheiros de apartamento Edilan e Tereza. Obrigada pela boa convivência, pelas alegrias compartilhadas, por aguentarem meu mau humor, minhas reclamações diárias e minhas lamúrias.

Aos colegas que cultivei na pós-graduação pela excelente convivência.

À querida Aline Moura, por ter me abrigado em sua casa quando cheguei à Fortaleza, minha eterna gratidão.

Às amigas Aline Domingues, Janaína, Lara, Marta, Naianny, Tamiris, Rilma e Rossívia, que me fizeram crer nas relações de amizade, pois mesmo distantes sempre estiveram presentes.

Aos professores participantes da banca examinadora: Divanira Ferreira Maia e Enio Pontes de Deus.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por viabilizar esta pesquisa através da bolsa de estudo concedida.

E por fim, a todos que não foram oportunamente citados, mais que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho



*“...É preciso força pra sonhar e perceber  
que estrada vai além do que vê...”*

Los Hermanos

## RESUMO

A utilização de resíduos como materiais alternativos tem se mostrado uma solução satisfatória de acordo com várias pesquisas realizadas. Os produtos da combustão do carvão mineral (PCCs) são resíduos que causam impacto ambiental, mas apresentam grande potencial de utilização no setor da construção civil na produção de argamassas e concretos. Apresentam elevado teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), podendo ser utilizados como pozolanas. Esta pesquisa objetivou verificar a viabilidade da utilização dos produtos da combustão do carvão mineral em argamassas de assentamento e revestimento. As matérias-primas foram caracterizadas quanto aos aspectos físicos, químicos e para os PCCs também foi avaliada sua pozolanicidade. Foram confeccionadas argamassas de referência e com adição de PCCs nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50% como substituto parcial do cimento. Após tempos de cura de 7 e 28 dias, foram feitos teste de resistência à tração na flexão e resistência à compressão. Além disso, as argamassas foram sujeitas a análises de difração de Raios – X, Microscopia Eletrônica de Varredura, absorção de água, determinação de índice de vazios e massa específica aparente. Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis quando comparados com os dados da literatura, demonstrando ser viável a aplicação dos produtos da combustão do carvão mineral na indústria da construção civil.

**Palavras-chave:** Argamassa. Produtos da combustão do carvão mineral. Pozolanas.

## ABSTRACT

The use of residues as alternative materials has proven successful according to several investigations. Coal combustion products (CCPs) is a residue that causes environmental impact, but it has a great potential for use in civil engineering construction in the production of mortars and concrete. It possesses a high content of silica ( $\text{SiO}_2$ ) and so it can be used as pozzolan. This research aimed to verify the viability of adding coal combustion products to mortars for bricklaying and covering. The raw materials were submitted to physical, and chemical characterization. CCPs were also rated according to their pozzolanicity. Reference mortars were prepared, as well as mortars containing 10, 20, 30, 40 and 50% amounts of CCPs as a partial replacement for cement. After curing time of 7 and 28 days, prismatic samples were tested to determine their tensile strength in bending and their compression strength. Moreover, the mortars were subjected to X-ray diffraction, scanning electron microscopy and determination of water absorption, voids and apparent density. The results obtained were consistent with literature data, showing that application of coal combustion products in the construction industry is a viable alternative.

**Keywords:** Mortars. Coal combustion products. Pozzolans.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Carvão mineral .....	18
Figura 2.2 –	Utilização de argamassa de assentamento na confecção de parede de alvenaria .....	32
Figura 2.3 –	Utilização de argamassa de revestimento na confecção de parede de alvenaria .....	32
Figura 2.4 –	Produtos da hidratação do cimento .....	35
Figura 2.5 –	Cristais de C-S-H .....	36
Figura 2.6 –	Cristais de hidróxido de cálcio .....	37
Figura 2.7 –	Ilustração da reação da cal hidratada quando utilizada em argamassa .....	39
Figura 3.1 –	Produtos da combustão do carvão mineral (a) in natura e (b) peneirada .....	52
Figura 3.2 –	Fluxograma das etapas dos ensaios realizados na pesquisa .....	54
Figura 3.3 –	Aparelho utilizado para determinação da composição química .....	57
Figura 3.4 –	Difratômetro de Raios-X .....	58
Figura 3.5 –	Capecamento dos corpos-de-prova .....	59
Figura 3.6 –	Misturador mecânico .....	63
Figura 3.7 –	Moldagem das argamassas de revestimento .....	63
Figura 3.8 –	Esquema do ensaio de determinação do índice de consistência, para determinação do espalhamento (“D”) mesa de consistência flow table .....	64
Figura 3.9 –	Ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão .....	65
Figura 4.1 –	Difratograma de raios – X do PCC’s .....	71
Figura 4.2 –	Difratograma de raios - X do cimento Portland CPIIF- 32 .....	73
Figura 4.3 –	Difratograma de raios X da cal .....	74

Figura 4.4 – Resistência à tração na flexão para argamassas 7 e 28 dias de cura .....	76
Figura 4.5 – Resistência à compressão para argamassa 7 e 28 dias de cura ...	77
Figura 4.6 – Absorção de água aos 28 dias .....	79
Figura 4.7 – Índice de vazios aos 28 dias .....	80
Figura 4.8 – Massa específica aos 28 dias .....	80
Figura 4.9 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa de Referência ..	81
Figura 4.10 – Análise espectroscópica da argamassa de referência .....	82
Figura 4.11 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com 10% de PCCs .....	82
Figura 4.12 – Análise espectroscópica da argamassa com 10% de PCCs .....	83
Figura 4.13 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com 40% de PCCs .....	83
Figura 4.14 – Análise espectroscópica da argamassa com 40% de PCCs .....	84
Figura 4.15 – Comparação dos difratogramas de raios-X para os teores de 0,10 e 20% .....	85
Figura 4.16 – Comparação dos difratogramas de raios-X para os teores de 0, 30, 40 e 50% .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Exigências químicas para materiais pozolânicos.....	23
Tabela 2.2 –	Exigências físicas para materiais pozolânicos .....	24
Tabela 2.3 –	Tipos de cimento Portland .....	34
Tabela 2.4 –	Produtos da hidratação do cimento .....	37
Tabela 2.5 –	Classificação do agregado miúdo quanto a dimensão .....	41
Tabela 2.6 –	Exigências mecânicas e reológicas para argamassas de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 1995) .....	47
Tabela 3.1 –	Propriedades do cimento utilizado .....	53
Tabela 3.3 –	Valores dos traços em volume e em massa .....	62
Tabela 4.1 –	Massa específica e massa unitária dos materiais .....	69
Tabela 4.2 –	Composição química dos PCCs .....	70
Tabela 4.3 –	Composição química do cimento Portland CP II F – 32 .....	72
Tabela 4.4 –	Composição química da cal .....	72
Tabela 4.5 –	Relação água/cimento e índice de consistência das argamassas .....	75
Tabela 4.6 –	Resistência à compressão (MPa) de acordo com a norma NBR 13281 .....	78

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Geral</i></b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Específicos</i></b> .....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Carvão mineral</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Produtos da Combustão do Carvão Mineral (PCCs)</i></b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Importância da reciclagem dos produtos da combustão do carvão mineral</i></b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.3</b>	<b><i>Estudos sobre utilização dos produtos da combustão do carvão mineral</i></b> .....	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Argamassa</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Definição e histórico</i></b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Tipos de argamassa</i></b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.3</b>	<b><i>Materiais constituintes da argamassa</i></b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.3.1</b>	<b><i>Cimento</i></b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.3.2</b>	<b><i>Cal hidratada</i></b> .....	<b>38</b>
<b>2.2.3.3</b>	<b><i>Areia</i></b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.4</b>	<b><i>Propriedades das argamassas</i></b> .....	<b>42</b>
<b>2.3.4.1</b>	<b><i>Propriedades das argamassas no estado fresco</i></b> .....	<b>42</b>
<b>2.3.4.2</b>	<b><i>Propriedades das argamassas no estado endurecido</i></b> .....	<b>46</b>
<b>2.3.5</b>	<b><i>Dosagem das argamassas</i></b> .....	<b>50</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>Produtos da combustão do carvão mineral</i></b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Cimento</i></b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Cal</i></b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.3</b>	<b><i>Areia</i></b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.4</b>	<b><i>Água</i></b> .....	<b>53</b>

<b>3.2</b>	<b>Metodologia experimental</b> .....	53
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização física</b> .....	55
3.2.1.1	<i>Massa específica</i> .....	55
3.2.1.2	<i>Massa unitária</i> .....	55
<b>3.2.2</b>	<b>Caracterização química</b> .....	56
3.2.2.1	<i>Fluorescência de raios X</i> .....	56
3.2.2.2	<i>Difração de raios X</i> .....	57
<b>3.2.3</b>	<b>Atividade pozolânica</b> .....	58
<b>3.2.4</b>	<b>Conversão do traço em volume para massa</b> .....	60
<b>3.2.5</b>	<b>Preparo das argamassas</b> .....	62
<b>3.3</b>	<b>Método de ensaios para caracterização das argamassas</b> .....	64
<b>3.3.1</b>	<b>Argamassa no estado fresco</b> .....	64
3.3.1.1	<i>Índice de consistência</i> .....	64
<b>3.3.2</b>	<b>Argamassa no estado endurecido</b> .....	65
3.3.2.1	<i>Resistência à tração na flexão e à compressão</i> .....	65
3.3.2.2	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i> .....	66
3.3.2.3	<i>Análise microestrutural</i> .....	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	69
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	69
4.1.1	<i>Massa específica e massa unitária</i> .....	69
4.1.2	<i>Fluorescência de raios X e difração de raios X</i> .....	70
4.1.3	<i>Atividade pozolânica</i> .....	74
<b>4.2</b>	<b>Ensaio com as argamassas</b> .....	75
<b>4.2.1</b>	<b>Argamassa no estado fresco</b> .....	75
4.2.1.1	<i>Índice de consistência</i> .....	75
<b>4.2.2</b>	<b>Argamassa no estado endurecido</b> .....	76
4.2.2.1	<i>Resistência à tração na flexão e à compressão</i> .....	76
4.2.2.2	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i> .....	78
4.2.2.3	<i>Análise microestrutural</i> .....	81
4.2.2.4	<i>Difração de raios X</i> .....	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	87
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90





## 1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos é uma das consequências de qualquer processo industrial. Com o crescimento desse setor da economia, tornam-se maiores as quantidades de rejeitos, gerando uma preocupação constante com o descarte não adequado. Uma das formas de atenuar os impactos ambientais causados por esses rejeitos é a sua utilização como matérias-primas ou insumos em outras atividades industriais.

O uso de resíduos na construção civil tem sido um dos temas mais trabalhados e debatidos por pesquisadores nos últimos tempos. Com a possibilidade de se conquistar uma melhor colocação para a indústria de construção a partir da adoção e do emprego destes resíduos em materiais para vedação (blocos, tijolos e argamassas), pesquisadores vêm buscando conscientizar ceramistas, construtores e o próprio mercado consumidor quanto à importância da qualidade deste produto para as habitações (PRUDENCIO JUNIOR et al., 2003).

Para que novos materiais sejam utilizados na construção civil, eles devem atender as exigências físicas e mecânicas de acordo com a normalização, como por exemplo, ser resistente, durável, trabalhável entre outras características para que sejam melhores ou iguais aos produtos já existentes no mercado. Essas exigências são necessárias porque o setor necessita oferecer para o mercado, materiais que tenham boa qualidade e vida útil.

Um dos resíduos sólidos mais significativos, em termos de volume, são as cinzas de carvão geradas em usinas termoeletricas. A queima do carvão mineral em caldeiras, além de gerar vapor, também produz resíduos durante o processo, ou seja, produtos da combustão do carvão mineral (PCCs). Esses produtos incluem as cinzas volantes (leves), as cinzas de fundo (pesada), as escórias, além de resíduo do FGD (sistema de dessulfurização de gases de combustão).

Apesar de o Brasil possuir uma matriz energética “limpa”, baseada no uso da hidroeletricidade e de biocombustíveis, a utilização de combustíveis fósseis (gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral) deve aumentar nas próximas décadas. Dentre as fontes não renováveis de energia, o carvão merece destaque especial devido às grandes reservas existentes no país e ao incremento da geração

termelétrica de eletricidade utilizando esse combustível, prevista pelo Governo Federal para os próximos anos.

A indústria da construção civil é normalmente o maior usuário dos subprodutos do carvão mineral. Eles estão sendo cada vez mais usados como material aditivo ao concreto para obter melhores propriedades de produtos frescos e endurecidos. O uso de cinzas volantes modifica a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto (POON, 1997).

A utilização do produto da combustão do carvão mineral na formulação de argamassas e concretos é uma alternativa interessante, visto que este material possui atividade pozolânica. Pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (NBR -12653, 1992).

As pozolanas frequentemente são mais baratas do que o cimento Portland que elas substituem. Apresentam, ainda, a característica de uma hidratação lenta, e uma baixa taxa de desenvolvimento de calor. Isto é de grande importância na construção em massa e é por isso que o cimento Portland-pozolana ou uma substituição parcial do cimento Portland pela pozolana são bastante utilizados (COIMBRA *et al*, 2002).

Por suas características físico-químicas, o uso desses subprodutos da queima de carvão mineral é associado a produtos que contêm hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$ . Estes são, geralmente, a cal hidratada e/ou cimento Portland, que misturados com as cinzas de carvão e em presença de água reagem quimicamente, combinando o hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$  dos aglomerantes com óxido de silício  $[SiO_2]$  na fase vítrea das cinzas e, no caso de associação com o cimento Portland, resultando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) que melhora as características de desempenho do compósito (MARGON, 2002).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade da utilização dos produtos da combustão do carvão mineral (PCCs) como substituto parcial do cimento Portland em argamassas de revestimento.

### **1.1.2 Específicos**

- Avaliar as características físico-químicas das matérias-primas convencionais e alternativa;
- Estudar a atividade pozolânica dos produtos da combustão do carvão mineral (PCCs);
- Determinar o índice de consistência adequado para as argamassas, de referência e com incorporação dos PCCs como substituto parcial do cimento Portland;
- Avaliar o desempenho das argamassas produzidas por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão;
- Avaliar as características das argamassas com análises de absorção de água, índice de vazios, massa específica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios x.

## **1.2 Justificativa**

O reaproveitamento de resíduos se apresenta atualmente como primordial para resolução de parte dos problemas ambientais causados por estes, tanto em função da atenuação de desperdícios de recursos naturais, quanto na redução dos impactos ambientais provocados pela disposição final dos resíduos. Esse reaproveitamento desencadeou uma preocupação maior, provocando desta forma o surgimento de uma legislação ambiental muito rigorosa, fazendo com que o gerador de resíduos procure descartá-lo de maneira que não agride o meio ambiente (TASHIMA et al., 2004).

A utilização de combustíveis fósseis (gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral) deve aumentar, no Brasil, nas próximas décadas. O carvão merece uma preocupação especial devido às grandes reservas existentes no país e ao incremento da geração termelétrica de eletricidade utilizando esse combustível, prevista pelo Governo Federal para os próximos anos. Como mencionado anteriormente, a geração de energia por meio de carvão mineral é uma de muitas fontes da poluição ambiental. Com a implantação de uma usina termoelétrica a carvão no Porto do Pecém localizada em São Gonçalo do Amarante (CE), serão produzidas diariamente centenas de toneladas de PCCs (produto da combustão do carvão mineral), e é de fundamental importância que se iniciem estudos de caracterização e aproveitamento deste material, pois além de reduzir o descarte, será agregado valor ao mesmo.

As cinzas provenientes da queima do carvão mineral em usinas termelétricas são formadas em maior concentração por uma variedade de compostos de silício, alumínio; em menor concentração, por compostos que contêm ferro, enxofre, cálcio, sódio, potássio e magnésio, além de outros compostos que contêm elementos tóxicos como cádmio, zinco, cobre, níquel, arsênio, chumbo, mercúrio, cromo e selênio, entre outros. A disposição inadequada dessas cinzas pode acarretar contaminação de fontes de águas superficiais e subterrâneas, com a possível destruição do habitat aquático, tornando difícil e dispendiosa a recuperação dessas áreas (FUNGARO E IZIDORO, 2006).

Na construção civil, a busca por materiais alternativos vem se tornando cada vez mais intensa. A grande preocupação acerca do desenvolvimento destes novos materiais exige investigações quanto à durabilidade, qualidade e viabilidade da utilização destes novos materiais. Estes são aspectos cruciais para produtos da construção civil, pois devem ser considerados a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil destes produtos e o elevado custo das obras de construção civil.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Carvão mineral

Segundo Ribeiro (2002), o carvão mineral (Figura 2.1) é um combustível natural fóssil, resultante da transformação da matéria vegetal de grandes florestas soterradas há milhões de anos e sujeitas à ação da pressão, temperatura e bactérias. A pressão do solo, calor e movimento da crosta terrestre produziram a destilação dos produtos gasosos dos pântanos para formar lignitos. A contínua atividade subterrânea propiciou a redução progressiva do conteúdo gasoso dos carvões, resultando em carvões de diferentes classificações (rank): turfa, lignito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito.

Figura 2.1: Carvão mineral



Fonte: Copelmi, 2011.

Os principais elementos que constituem o carvão são carbono e hidrogênio, além de enxofre, nitrogênio, oxigênio e halogênios. O carbono, em função do seu elevado teor, é o principal elemento químico no carvão e está estreitamente ligado ao grau de carbonificação.

O carvão mineral é a segunda fonte de energia primária no mundo e representa a principal fonte geradora de energia elétrica. São grandes as reservas de carvão, sendo a sua produção mundial de cinco bilhões de toneladas anuais, aproximadamente, sendo possível assegurar o suprimento nesse ritmo por 200

anos. Pesquisas indicam que o carvão é o único combustível fóssil cujo suprimento será abundante e de baixo custo durante uma boa parte do século XXI (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 1998).

Segundo Goethe (1990), o carvão mineral já foi considerado o recurso energético não renovável mais abundante do Brasil, com reservas nacionais atingindo 32,4 bilhões de toneladas. Foi apontado como a alternativa para o petróleo, uma vez que possibilitava resultados positivos em curto prazo considerando o domínio da tecnologia de seu aproveitamento como combustível desde o início da sociedade industrial.

A partir do século XVII, durante a Revolução Industrial, o carvão mineral começou a ser utilizado em larga escala, como fonte para gerar energia para as máquinas e locomotivas. Atualmente 40% da eletricidade gerada mundialmente é produzida através do carvão. A indústria de ferro e aço mundial também é fortemente dependente do uso do carvão (SIQUEIRA, 2011).

De todos os combustíveis fósseis o carvão é sem dúvida o com maior reserva no mundo. Foi estimado que há mais de um trilhão de toneladas de carvão em reservas economicamente acessíveis usando a atual tecnologia de exploração de minas. Além de as reservas de carvão serem grandes, elas são geograficamente divididas, sendo espalhadas por centenas de países em todos os continentes. Essa grande quantidade de minas garante uma reserva para um grande período de exploração. Se o nível de exploração mundial continuar como atualmente, as reservas são suficientes para durarem, aproximadamente, 250 anos (DEMEC, 2013).

Atualmente, a principal aplicação do carvão mineral no mundo é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Em segundo lugar vem a aplicação industrial para geração de vapor necessário aos processos de produção, tais como secagem de produtos, cerâmicas e fabricação de vidros. Um desdobramento natural dessa atividade é a co-geração ou utilização do vapor aplicado ao processo industrial também para a produção de energia elétrica. No entanto, em todas essas atividades, são gerados subprodutos resultantes da queima de carvão, conhecidos como produtos da combustão do carvão mineral (SIQUEIRA, 2011).

### **2.1.1 Produtos da Combustão do Carvão Mineral (PCCs)**

De acordo com Martins (2001), os produtos da combustão do carvão são subprodutos gerados a partir da queima do carvão mineral nos processos de combustão pulverizada ou leito fluidizado. No processo de queima são gerados os seguintes tipos de cinzas:

- Escória/Cinza Grossa (*slag ou boiler slag*): originada nos processos de combustão ou gaseificação do carvão em grelhas fixas e móveis. Apresentam-se, frequentemente, com granulometria grosseira e blocos sinterizados, com consideráveis teores de carbono não queimado (10-20%). São retiradas pelo fundo das fornalhas, após resfriamento com água;
- Cinza de Fundo/Cinza Pesada/Cinza Úmida (*bottom ash*): originadas nos processos de combustão do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, contém geralmente teores de carbono não queimado de 5 a 10%. São mais pesadas e de granulometria mais grossa, que caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, de onde são retiradas por fluxo de água, principalmente nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor;
- Cinza Leve/ Cinza Volante (*fly ash*): constituídas de partículas extremamente finas (100% menor que 0,15mm), leves e que são arrastadas pelos gases de combustão de fornalhas ou gases gerados em gaseificadores industriais. Grande parcela dessas partículas é retida por sistema de captação – filtros de tecido, ciclones, precipitadores eletrostáticos, etc. As grandes unidades produtoras deste tipo de cinzas são as usinas termelétricas e centrais de vapor.

De acordo com Rohde et al. (2006) a formação das cinzas se dá pela combustão direta do carvão, matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas: uma orgânica (material volátil mais carbono fixo) e uma



mineral (argilas, quartzo, pirita, carbonatos, etc.). Pela ação do calor, a fração orgânica gera materiais voláteis e coque, enquanto a mineral se transforma em cinza com mineralogia modificada, tendo em vista: a perda de água das argilas, a decomposição dos carbonatos, a oxidação dos sulfetos, etc.

As propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por diversos fatores, tais como: composição do carvão; grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; sistema de extração e manuseio das cinzas. Goethe (1990) comenta: “Devido a estes fatores, as cinzas vão mostrar variação na sua composição e propriedades físico-químicas, não só de usina para usina, mas de caldeira para caldeira na mesma usina e até numa mesma caldeira em tempos diferentes”.

Além destes tipos de cinzas, a combustão do carvão com calcário poderá produzir outros tipos de cinzas ou resíduos assim chamados de: resíduos da dessulfurização do gás da chaminé (FGD); resíduo de combustão de leito fluidizado do tipo atmosférico, pressurizado ou circulante. Os resíduos FGD são produzidos passando os gases por um meio aquoso alcalino, resultando uma combinação de cinza volante, sais de Ca-S (sulfito e/ou sulfato de cálcio) e carbonato de cálcio, sendo que o tamanho das partículas variam normalmente entre 5 a 50µm (ADRIANO *et al.*, 1980). Independentemente do tipo de carvão e do processo de queima, as cinzas obtidas podem ser um dos tipos citados acima ou a mistura de cinzas.

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

A utilização dos produtos da combustão do carvão mineral resulta em numerosos benefícios, entre os quais podem ser citados: uma diminuição significativa de áreas destinadas aos aterros, a conservação de recursos naturais, um ambiente mais limpo e seguro, a redução de emissão de dióxido de carbono, impulso no desenvolvimento econômico e a redução geral do custo de geração de eletricidade.

#### 2.1.1.1 *Produtos da combustão do carvão mineral como pozolanas*

Segundo a NBR 12653 (1994) - materiais pozolânicos - são “materiais silicosos ou silico aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxio de cálcio, formando compostos estáveis e poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Dessa forma, em compostos a base de cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados que são produtos mais estáveis do cimento hidratado (OLIVEIRA E BARBOSA, 2006).

Segundo Santos (2006), as pozolanas são normalmente utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento.

Independentemente de como a pozolana é utilizada, a reação pozolânica e os benefícios associados são os mesmos ( MEHTA, 1987). Porém, deve-se considerar que cada material possui suas características próprias, o que proporciona resultados ( valores) diferentes.

O principal produto da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), podendo também haver a formação de aluminatos de cálcio hidratado. A precipitação do C-S-H ocorre pela dissolução da pozolana em meio alcalino com sua combinação com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  presentes em solução (JOHN et al, 2003).

A reação entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, de uma forma simplificada, é mostrada na equação:



Segundo Siqueira (2011), As pozolanas, isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. No entanto, o cálcio

pode estar presente nas pozolanas, existindo em alguns países pozolanas com mais de 25% de cálcio.

Quanto à origem, as pozolanas podem ser classificadas em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais, como cinzas do carvão mineral, cinza da casca de arroz entre outras, ou provenientes de tratamento térmico, como argilas (SIQUEIRA, 2011).

A norma ABNT NBR 12653 - Materiais pozolânicos - classifica os materiais pozolânicos em três classes sendo: Classe N que são as pozolanas naturais e artificiais, considerando as argilas calcinadas; Classe C, são as cinzas resultantes da queima do carvão mineral, e classe E são aquelas que não se enquadram nas classes anteriores.

Segundo Azevedo (2002), a pozolanidade das cinzas está intimamente relacionada com o teor de sílica, visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

A atividade pozolânica pode ser classificada conforme as propriedades mecânicas (resistência à compressão), químicas (difração de raios-X para determinar as fases cristalinas da sílica) e químicas (através da determinação da cal consumida); embora os resultados dos diferentes métodos tenham pouca correlação (SILVA, 2006).

A avaliação das propriedades mecânicas se faz pela resistência à compressão, que está associada à formação de silicatos de cálcio hidratado. Do ponto de vista químico, o consumo de hidróxido de cálcio na reação é analisado. Fisicamente, a natureza e o teor das fases ativas da pozolana – sílica e alumina - é outro parâmetro físico a ser considerado (CORDEIRO, 2006).

Os materiais pozolânicos são compostos, principalmente de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , preferencialmente no estado vítreo. Segundo Santos (2006), o uso de pozolanas em adição ao cimento confere, ao concreto e argamassa, características como:

- I. Menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas)

II. Menor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação de um silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com menor relação  $\text{CaO/SiO}_2$  de menor basicidade.

III. Maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

Segundo a norma ABNT NBR 12653- Materiais pozolânicos – Os mesmos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas nas Tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

Tabela 2.1: Exigências químicas para materiais pozolânicos

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

Fonte: ABNT NBR 12653/1992, adaptado.

Tabela 2.2: Exigências físicas para materiais pozolânicos

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, %máx	34	34	34
Índice de atividade pozolânica: com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	75	75	75
Com a cal aos 7 dias, em Mpa	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: ABNT NBR 12653/1992, adaptado.

### ***2.1.2 Importância da Reciclagem dos Produtos da Combustão do Carvão Mineral***

Os resíduos em termos de composição e volume variam das práticas de consumo e dos métodos de produção. As principais preocupações estão voltadas para as repercussões que podem ter sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente (solo, água, ar e paisagens). Os resíduos perigosos, produzidos, sobretudo pela indústria, são particularmente preocupantes, pois, quando incorretamente gerenciados, tornam-se uma grave ameaça ao meio ambiente.

O grande avanço da escassez dos recursos naturais tem desencadeado uma grande busca por materiais alternativos ecologicamente corretos principalmente no ramo da construção civil. Estes novos materiais vem sendo estudados, com o intuito de diminuir o impacto ambiental, verificar sua potencialidade e atender as condições de redução de custos, melhoria nas propriedades mecânicas e durabilidade.

A queima do carvão mineral provoca a liberação do enxofre que é transformado em dióxido de enxofre e em menor proporção em trióxido de enxofre, sendo que quando é liberado na atmosfera é prejudicial ao meio ambiente.

Segundo Poon (1997), A indústria da construção civil é normalmente o maior usuário dos produtos do carvão mineral. Eles estão sendo cada vez mais

usados como material aditivo ao concreto para obter melhores propriedades de produtos frescos e endurecidos. O uso dos PCCs modifica a composição da pasta de cimento, influência a hidratação e a microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto.

Garcia et al (2006), a adição mineral incorporada ao cimento não é um processo recente, originalmente incorporando pozolanas naturais à mistura e algum tempo depois, cinzas industriais, com propriedades semelhantes às primeiras. As pesquisas pioneiras com cinzas residuais datam de 1930 nos Estados Unidos.

Ao usar os produtos da combustão do carvão mineral, em vez de estocá-las, evita-se a degradação ambiental e os custos energéticos associados à mineração de matérias-primas virgens. Para cada tonelada deste resíduo utilizado no lugar do cimento Portland, cerca de uma tonelada de dióxido de carbono é impedindo de entrar na atmosfera da terra.

Dentre os resíduos industriais originados, os produtos da combustão do carvão mineral ocupa lugar em destaque, por estar presente na maioria dos processos de geração de energia. A necessidade de retirar o baixo custo das cinzas geradas em termelétricas fez com que fossem adotadas práticas de disposição em áreas impróprias e sem as medidas de proteção necessárias. A lixiviação das cinzas gera a possibilidade de que elementos tóxicos possam ter acesso ao lençol freático, contaminando fontes de abastecimento de água. Além disso, os elementos também podem entrar na cadeia alimentar através das plantas (SIQUEIRA, 2011).

O principal esforço para a redução dos impactos ambientais decorrentes da disposição dos produtos da combustão carvão mineral no meio ambiente vem sendo direcionado no sentido de avaliar as potencialidades dos mesmos, para utilização em diferentes processos industriais.

A discussão sobre os fatores restritivos ou benéficos ao uso dos resíduos gerados na queima de carvão mineral por usinas termelétricas tem sido amplamente divulgada nas publicações científicas. Os resultados têm influenciado os pesquisadores a traçarem considerações favoráveis ao uso dos resíduos e, ao mesmo tempo, contribuir com informações que diminuem as dúvidas quanto às restrições e aumentam o rol dos benefícios.

Há unanimidade quanto à importância da caracterização físico-química e mineralógica dos resíduos visando às aplicações industriais. Muitos estudos decorrentes têm sugerido diversas aplicações para os resíduos, dentre elas estão:

- Extração de metais de interesse como: Al, Si, Fe, Ge, Ga, V, Ni (RAYZMAN, *et al.*, 1997);
- Extração de carbono não queimado (HAMLEY, 2001);
- Adsorventes para gases de combustão (TSUCHIAI *et al.*, 1995)
- Produtos cerâmicos especiais (OZDEMIR, 2001) e painéis anti-incêndio (VILCHES *et al.*, 2002);
- Condicionamento de solos (MARTINS, 2001); Controle de erosão (TISHMACK *et al.*, 2001) e solo artificiais – Slash (REYNOLDS, 1999);
- Síntese de zeólitas (FUNGARO, 2006);
- Aditivos em cimento e cerâmicas, fabricação de blocos e tijolos (CALARGE *et al.*, 2000).

Os estudos acima são uma pequena amostra do potencial das cinzas geradas em usinas termelétricas pela queima de carvão mineral. No entanto, o conhecimento sobre as propriedades do carvão e suas cinzas é um parâmetro importante nas decisões sobre seu uso industrial.

### **2.1.3 Estudos sobre utilização dos produtos da combustão do carvão em argamassas**

O apelo do uso dos PCCs substituindo parte do clínquer, na produção do cimento composto, é um modo seguro e barato da destinação final destes resíduos, contribuindo para a conservação da energia usada na fabricação de cimento, e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração agride o meio ambiente. Muitos trabalhos já foram feitos acerca da utilização da cinza volante oriunda de termelétrica, por esta apresentar comprovada propriedade pozolânica.

POZZOBON (1999) cita que o uso das cinzas de carvão no mundo é, em média, de 30% em relação ao total gerado. Daí pode-se explicar o pequeno número de pesquisas que visam a valorização de cinza pesada para uso na construção civil.

Já a pesquisa da cinza volante é muito intensa, com seu uso já consagrado na fabricação de cimento Portland ou em adições em concreto, bem como na fabricação de artefatos de cimento; no entanto, o uso de cinza leve em argamassas com relação ao concreto e cimento é insignificante. Ainda assim, o uso não atende à demanda da geração desse subproduto, que chega a 42% da cinza leve produzida, restando ainda quase 60%, que são dispostos em bacias de decantação e posteriormente em aterros.

LENZI (2001) utilizou cinzas provenientes do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, em substituição do cimento por cinzas leves e da areia por cinzas pesadas, na dosagem de argamassas de revestimento. As substituições foram feitas em volume sendo que, para o cimento, os teores de substituição foram de 0, 20, 30, 40 e 50% por cinza leve e, para a areia, os teores de substituição foram de 0, 50 e 100% por cinza pesada.

Mustelier (2002) avaliou 15 argamassas mistas utilizando o traço 1:2:9 (em volume) para revestimento, onde variou o teor de substituição do cimento por cinza leve (20, 30, 40 e 50% em volume) e o teor de substituição de areia por cinza pesada (0, 50 e 100% em volume). A demanda de água aumentou com o aumento dos teores de cinza pesada, induzindo a uma massa específica reduzida (até 28%), aumento da exsudação e da absorção de água. Por outro lado, houve um aumento considerável na resistência à compressão a partir de 28 dias juntamente com a identificação de atividade pozolânica entre a sílica amorfa da cinza e o hidróxido de cálcio da cal.

Margon (2002) realizou o estudo de diferentes frações de cinzas volantes em substituição parcial do cimento em argamassas. Foram utilizadas cinzas com alto teor de cálcio (12,69%) e com baixo teor de cálcio (2,24%). As misturas utilizadas foram compostas por 25% de cinzas volantes e 75% de cimento, em peso. Foi verificado que os melhores resultados de resistência, realizados nas idades de 2, 7, 28 e 90 dias, foram obtidos com as cinzas com alto teor de CaO, sendo que, para os dois tipos de cinzas, quanto mais fina a fração utilizada, maior a resistência à compressão.

Já Siqueira *et. al.*, (2012), realizaram um estudo onde foram preparadas misturas na proporção 4 partes de agregado e 1 parte de cimento, com a inserção de cinzas nas proporções (0,10, 20, 30, 40 e 50%). Foi analisado o comportamento



de resistência à compressão após 28 dias e foi verificado que resistência diminui conforme o aumento da porcentagem de cinzas. Ainda assim, os resultados demonstraram a viabilidade da substituição de cimento pelas cinzas volantes para uso em diferentes tipos de aplicações.

Os resultados gerados demonstram o grande potencial de uso dos produtos da combustão do carvão mineral na fabricação de artefatos para construção civil em relação ao seu desempenho mecânico.

## **2.2 Argamassa**

### **2.2.1 Definição e histórico**

As argamassas são materiais de construção que tem seu uso cada vez maior e mais especializado nas edificações, cujos traços e características dependem do tipo de aplicação das mesmas.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Ha vários registros de uso de argamassas pelos egípcios, etruscos, gregos e romanos, mas acredita-se que as primeiras argamassas surgiram na Pérsia antiga, onde se usava alvenaria de tijolos secos, com assentamento de argamassas de cal (ROCHA, 2005). Em Roma durante o Império Romano, as argamassas se desenvolveram como sistema construtivo, sendo assim utilizadas e aprimoradas desde então.

As primeiras misturas utilizadas na junção de blocos de alvenaria são chamadas de “argamassas”, palavra que etimologicamente corresponde a misturas de cal, água e areia para construções (GUIMARAES E CINCOTTO, 1985 apud ROCHA, 2005).

No Brasil as argamassas passaram a ser utilizadas no primeiro século de sua colonização, para assentamento de alvenaria de pedra. Este material é empregado no assentamento de alvenarias e na execução de revestimentos, logo a

argamassa deve ter as seguintes características: economia, poder de incorporação da areia, plasticidade, aderência, retenção de água, homogeneidade, compacidade, resistência à infiltração, a tração e a compressão e durabilidade. Cada tipo de aplicação necessita diferentes características e propriedades correlacionadas aos materiais empregados.

Segundo Selmo (1989), a partir da década de 50 surge na Europa e nos Estados Unidos o processo de dosagem em instalações industriais da argamassa industrializada disponível em duas formas: a primeira faz necessário o acréscimo de água para efetuar a mistura e a segunda a mistura semi-pronta (cal e areia) que necessitava de cimento e água, que depois de homogeneizar, dispor para aplicação.

O crescimento da demanda pela utilização da argamassa e a busca da racionalidade de sua aplicação fez a indústria produtora de cimento investir para ofertar esses produtos. Contudo, a utilização da argamassa industrializada e semi-pronta se deu a partir dos anos 90.

Segundo Silva (2006), a aplicação de argamassa dosada em centrais, teve início no Brasil em 1997, com grande conquista no mercado consumidor pela sua produção em grande escala, além de ser observado itens importantes como: classificação e qualidade do material, controle tecnológico e assistência técnica no canteiro de obra.

Por tratar de argamassa a distribuição granulométrica dos agregados miúdos é fator determinante no desempenho tanto na proporção adequada de tamanho quanto no que se refere à morfologia e textura da partícula.

O empacotamento de partículas é fundamental no preenchimento dos vazios com os materiais particulados, desempenhando uma influência na propriedade da argamassa tanto no estado fresco como no estado endurecido, isto é, a densidade da massa é importante às propriedades mecânicas e é dada pela acomodação do agregado e da pasta de água/aglomerante.

Segundo Scandola (2010), a argamassa deve ter custo reduzido, plasticidade, aderência, retenção de água, homogeneidade, compacidade, resistência à infiltração, à tração e à compressão e durabilidade. Cada tipo de emprego exige diferentes características e propriedades que possam ser melhoradas com a inclusão de minerais e aditivos químicos.

Os tipos e as quantidades relativas desses componentes são chamados de traços e constituem determinantes para propriedades de uma argamassa. O aglomerante é o principal componente de uma argamassa, pois é ele que contém os compostos químicos que deflagram o processo de hidratação. Sintetizando, a qualidade de uma argamassa depende das suas características de seus componentes e da proporção da mistura entre eles (SCANDOLARA, 2010).

### **2.2.1 Tipos de argamassa**

As argamassas.

#### a) Argamassa para assentamento

As argamassas de assentamento são utilizadas para construção de paredes e muros de tijolos ou blocos, além de servirem também para colocação de cerâmicas, azulejos, ladrilhos, etc.

As propriedades das argamassas de assentamento para que apresentem um bom desempenho são: trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações. Estas argamassas possuem as seguintes funções:

- Unir os elementos de alvenaria e dar contribuição na resistência de esforços laterais;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda área resistente aos elementos de alvenaria;
- Selar as juntas para evitar a penetração das águas das chuvas;
- Absorver as deformações que ocorrem naturalmente na alvenaria, como as de origem de retração por secagem, térmica, entre outras.

Na Figura 2.2 pode-se observar a utilização desta argamassa no processo de execução de uma parede de alvenaria.

Figura 2.2 – Utilização de argamassa de assentamento na confecção de parede de alvenaria



Fonte: Autora.

#### b) Argamassa para revestimento de paredes e tetos

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, tetos e muros, os quais posteriormente recebem acabamento como revestimentos cerâmicos, pinturas e etc. Segundo Bezerra (2010), as argamassas para revestimento apresentam as seguintes funções:

- Proteger os elementos de vedação e a estrutura da edificação contra a ação direta dos agentes agressivos e, por consequência, evitar sua degradação precoce, aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção dos edifícios;
- Auxiliar as vedações nas seguintes funções: isolamento térmico e acústico, estanqueidade a água e gases e segurança ao fogo;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação, servindo de base regular para outro revestimento ou constituir-se no acabamento final;

- Colaborar para a estética de vedações e fachadas.

A função do revestimento não é corrigir falhas ou imperfeições grosseiras, como por exemplo, o desaprumo e desalinho provenientes da ausência de cuidado na execução de estruturas ou paredes. É seriamente prejudicial ao revestimento encobrir tais falhas com a massa. Na Figura 2.3 pode-se observar a utilização desta argamassa no processo de execução de uma parede de alvenaria.

Figura 2.3 – Utilização de argamassa de revestimento na confecção de parede de alvenaria



Fonte: Autora.

### **2.2.3 Materiais constituintes da argamassa**

#### **2.2.3.1 Cimento**

Cimento Portland é uma substância alcalina, cuja composição é formada em sua maior parte de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, originam compostos cristalinos hidratados e gel. Os silicatos e aluminatos liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos (BEZERRA, 2008).

Ele é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado. O cimento

Portland é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente, presente em todos os tipos de cimento Portland. Já as adições podem variar de um tipo de cimento para outro, sendo elas que definem os diferentes tipos de cimento (ABCP, 2002).

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, que são britados, moídos e depois de misturados são queimados a 1450 °C em um forno rotativo (NEVILLE, 1997). O clínquer em pó é um ligante hidráulico, responsável pela reação química do cimento na presença da água, causando o seu endurecimento.

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

As argamassas mais ricas em cimento Portland tendem a apresentar maiores resistências mecânicas e impermeabilidade, porém isso pode ocasionar o aumento da ocorrência de formação de fissuras devido a hidratação do cimento provocar o enrijecimento e alterações na consistência inicial pela perda de parte da água de amassamento (MULLER, 1993 apud ROCHA, 2005).

As argamassas empregadas na construção civil não exigem resistências tão elevadas, pois de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 1995) os valores variam de 0,1 MPa a 8,0 MPa, sendo possível obter esses valores com o uso de materiais alternativos que não prejudiquem as propriedades mecânicas estabelecidas pelas normas e que tampouco ocasionem patologias a estas argamassas.

A escolha do tipo de cimento mais adequado a uma determinada obra ou serviço a executar requer o bom conhecimento das características dos diversos tipos disponíveis no mercado (SOUSA e RIPPER, 1998). Na tabela 2.3 encontra-se o resumo dos diversos tipos de cimento brasileiro e as normas que os especificam.

Tabela 2.3 – Tipos de cimento Portland

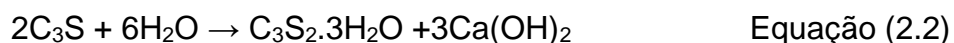
<b>Designações</b>	<b>Classes</b>	<b>Norma ABNT</b>
Cimento Portland comum	CP I - 25	NBR - 5732
	CP I - 32	
	CP I - 40	
Cimento Portland comum (com adições)	CP I - S - 25	NBR - 5732
	CP I - S - 32	
	CP I - S - 40	
Cimento Portland comum (com escória)	CP II - E - 25	NBR 11578
	CP II - E - 32	
	CP II - E - 40	
Cimento Portland composto (com pozolana)	CP II - Z - 25	NBR 11578
	CP II - Z - 32	
	CP II - Z - 40	
Cimento Portland composto (com filler)	CP II - F - 25	NBR 11578
	CP II - F - 32	
	CP II - F - 40	
	CP III - 25	
Cimento Portland de alto forno	CP III - 32	NBR - 5735
	CP III - 40	
Cimento Portland pozolânico	CP IV - 25	NBR - 5736
	CP IV - 32	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V - ARI	NBR - 5733

Fonte: Carasek, (2007).

A hidratação do cimento Portland pode ser analisada como a soma das reações de vários compostos individuais do cimento, que ocorrem simultaneamente. Com a introdução de água, os componentes do cimento começam a hidratar, formando compostos que, em sua maioria, são silicatos de cálcio hidratado (CSH).

Estes começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos (CARVALHO, 2002).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o contato da água gera o processo de hidratação dos seus componentes, principalmente os silicatos como silicato tricálcico e silicato dicálcico, que liberam hidróxido de cálcio em grande quantidade. Sua formação pode ser representada através das equações.



As reações que fazem com que o cimento se torne um agente ligante ocorrem na pasta de água e cimento. Na presença de água, os silicatos e aluminatos que fazem parte da composição química do cimento, formam produtos de hidratação, representados esquematicamente na Figura 2.4, onde os pontos cheios representam as partículas de gel, os espaços intersticiais são os poros de gel e os marcados com C são os poros capilares, e que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta do cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

Figura 2.4 – Produtos da hidratação do cimento



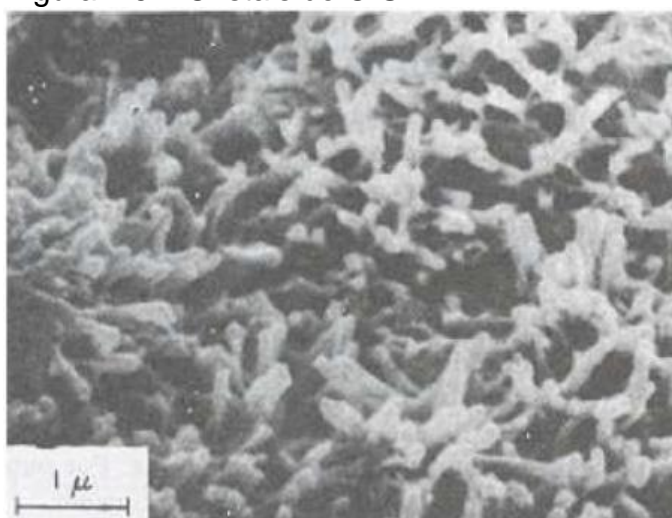
Fonte: Neville, 1997.



A fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H), constitui cerca de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo responsável pela alta resistência da mesma (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Dal Molin (1995), a morfologia das placas varia de fibras pouco cristalinas a uma malha reticulada. A Figura 2.5 apresenta os cristais de C-S-H na pasta de cimento com três dias de idade, através da micrografia eletrônica de varredura.

Figura 2.5 – Cristais de C-S-H



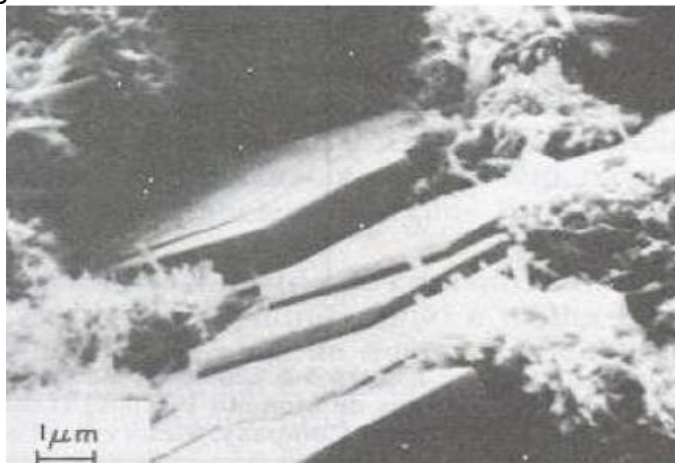
Fonte: Mehta e Monteiro, 1994.

Os cristais de hidróxido de cálcio, na química do cimento abreviados por CH, são grande e frágeis, constituindo de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada. Ao contrário do CSH, o CH não contribui potencialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida. Além disso, a presença de uma quantidade considerável destes cristais no cimento Portland tem um efeito desfavorável sobre a resistência química, em razão da sua alta solubilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com Diamond (1976), morfologicamente a portlandita (hidróxido de cálcio), nas primeiras idades após a hidratação, apresenta-se com uma “placa fina hexagonal”, de tamanho considerável. À medida que hidratação prossegue, os depósitos de CH crescem muito, alterando sua morfologia: as placas perdem seu contorno hexagonal e invadem e englobam outras regiões da pasta contendo gel e outros constituintes. A pasta madura é então caracterizada por extensos depósitos deste material, facilmente reconhecíveis. A Figura 2.6 mostra os

crístais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  através da microscopia eletrônica de varredura, segundo Mehta e Monteiro, 1994.

Figura 2.6 – Crístais de hidróxido de cálcio



Fonte: Mehta e Monteiro, 1994

Os sulfatoaluminatos de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida e, segundo Mehta e Monteiro (1994) desempenham papel menor nas relações estrutura-propriedade. Durante os primeiros estágios de hidratação a relação iônica sulfato/alumina da solução favorece a formação de trissulfato hidratado, conhecido como etringita. Os principais produtos da hidratação presentes na pasta de cimentos são mostrados na tabela 2.4.

Figura 2.4 - Produtos da hidratação do cimentos

Produto	Quantidade	Formas
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	50% a 60% do volume de sólidos	Pequenos cristais fibrilares
Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$	20% a 25% do volume de sólidos	Cristais prismáticos grandes hexagonais
Sulfoaluminatos	15% a 20% do volume de sólidos	Cristais prismáticos aciculares

Fonte: Mehta e Monteiro, 1994.

### 2.2.3.2 Cal Hidratada

A NBR 7175 (ABNT, 1992) - Cal Hidratada Para Argamassas - define a cal hidratada como sendo um pó seco proveniente da hidratação da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ou de uma mistura de  $\text{Ca(OH)}_2$  e hidróxido de magnésio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ), ou também, de uma mistura de  $\text{Mg(OH)}_2$  e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), sendo designada de acordo com os teores de óxido não hidratados e de carbonatos.

A cal é usada com o propósito de unir e revestir as alvenarias, devido a plasticidade e durabilidade que acrescenta as argamassas. Deve-se ter bastante cautela ao se comprar e até mesmo no preparo, para que sejam evitados problemas como rachaduras e desprendimento.

A cal hidratada possui várias propriedades que favorecem a sua utilização como, por exemplo, a trabalhabilidade, boa aderência, rendimento, retenção de água, durabilidade, agir como bactericida, entre outros. Tem-se com o uso da cal uma melhor trabalhabilidade, boa aderência e maior rendimento na mão-de obra.

Além destas características a cal hidratada tem enorme capacidade de retenção de água em torno de suas partículas, favorecendo desta maneira a reação desta com o cimento Portland. Por ser um produto alcalino, a cal hidratada impede a oxidação das ferragens e, também por essa característica, atua como bactericida e fungicida. Além disso, evita que se formem manchas e apodrecimento precoce dos revestimentos.

Argamassas que possuem cal hidratada como constituinte tem boa resistência à compressão, tanto para assentamentos como para revestimentos, apresentam também baixo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as pequenas movimentações das construções, evitando trincas, fissuras e até o descolamento dos revestimentos (BEZERRA, 2010).

Segundo Guimarães (2002), a cal é obtida através de um processamento de rochas. Para rochas carbonatadas de calcário (variedade de rocha onde o constituinte principal é o carbonato de cálcio), o agregado obtido é submetido à ação do calor (processo denominado calcinação) em fornos apropriados, com temperatura entre  $850^\circ\text{C}$  e  $1200^\circ\text{C}$ . Nesta reação química, o carbonato de cálcio, sob a ação do calor, se decompõe, formando o óxido de cálcio (cal) e o dióxido de carbono, sendo

que este gás se desprende resultando basicamente a cal. A reação ocorrida está representada na Equação (2.4) a seguir:



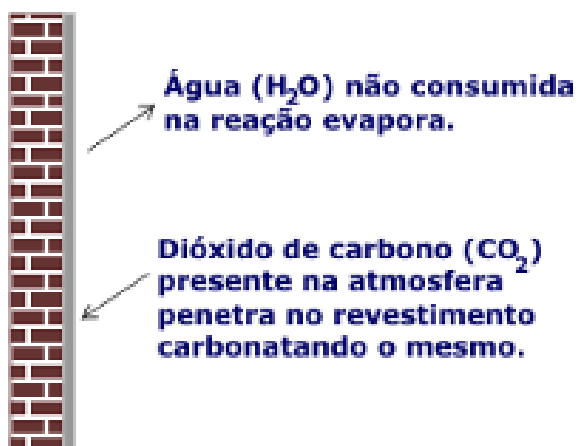
Esta reação produz a cal denominada de “cal virgem” ou “cal aérea”. Nesta fase a cal ainda não pode ser utilizada, pois se faz necessário a moagem deste material, e logo após pode ser misturada com água em proporções adequadas. O resultado deste processo é o hidróxido de cálcio (cal hidratada), que pode ser representado na Equação (2.5).



Quando a cal hidratada é utilizada no preparo de uma argamassa e posteriormente aplicada, ocorre a seguinte reação: a água excedente evapora e o dióxido de carbono presente na atmosfera penetra no revestimento, resultando na formação da "rocha carbonatada". A Figura 2.7 ilustra este fenômeno.

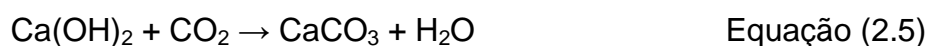
Figura 2.7 – Ilustração da reação da cal hidratada quando utilizada em argamassa

**Parede revestida com argamassa mista  
(cal, cimento e areia)**



Fonte: Pezente, (2009).

Para cal hidratada derivada de rochas carbonatadas o processo químico que ocorre pode ser representado pela Equação (2.5).



De acordo com o processo ilustrado, percebe-se que a cal hidratada retorna a sua condição inicial que era a de rocha calcária, tendo como resultando final uma argamassa estável e resistente.

O processo do endurecimento acontece de forma lenta e propaga de fora para dentro e devido a isso exige que a superfície tenha certa porosidade para permitir a evaporação da água excedente, e ao mesmo tempo permitir penetração do dióxido de carbono presente na atmosfera. Devido ao endurecimento ser lento e adicionado a mistura o cimento Portland, que promove a aderência e resistência inicial do revestimento.

Uma boa argamassa além de ser dosada, deve ser composta por materiais de boa qualidade. Tradicionalmente, sempre se utilizou cal como um dos constituintes das argamassas. No estado fresco, a cal propicia maior plasticidade à argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na execução do revestimento. No estado endurecido, a cal apresenta a capacidade de absorver deformações devido ao seu módulo de deformação. Esta propriedade é de extrema importância no desempenho da argamassa, que deve acompanhar as movimentações da estrutura. A cal possibilita a diminuição da retração gerando menor variação dimensional (BEZERRA,2010).

### 2.2.3.3 Areia

A areia é um agregado miúdo de grãos consistentes e provem, como material de construção, de rios, cavas, britagem, escórias, praias e dunas. Ela pode ser classificada como natural ou artificial.

De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1982) - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - as areias utilizadas nas argamassas devem ser constituídas de grãos mistos de composição identificável em ensaios de laboratório. As areias, além de possibilitarem a fabricação de argamassas de natureza mais econômica do ponto de vista financeiro, tendo como base que o custo unitário da areia é inferior quando comparado ao do cimento, podem também favorecer outras propriedades tais como: redução da retração da pasta de cimento,

aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo.

As areias naturais quartzosas são as mais utilizadas na fabricação de argamassas, sendo em especial a areia lavada proveniente de areais (portos de areias), e a pedra britada proveniente de pedreiras. Este material tem a denominação de agregado miúdo (areia natural ou resultante de britamento de rochas estáveis) devido seus grãos passarem na peneira de malha 4,8 mm e ficarem retidos na de 0,075 mm. As areias podem ser classificadas de acordo com sua dimensão como pode ser observado na Tabela 2.5, de acordo com as prescrições da NBR 7211 (ABNT, 1983) – Agregado para o concreto – Especificação.

Tabela 2.5 – Classificação do agregado miúdo quanto a dimensão

Tipo de areia	Tamanho nominal (mm)		Módulo de finura (MF)
	Mínima	Máxima	
Muito fina	0,15	0,60	MF < 2,0
Fina	0,60	1,20	2,0 < MF < 2,4
Media	1,20	2,40	2,4 < MF < 3,2
Grossa	2,40	4,80	MF > 3,2

Fonte: NBR 7211(ABNT,1982).

A NBR 7200 (ABNT, 1982) prescreve que o teor de materiais finos de natureza argilosa não deve ultrapassar 5% em massa nas areias para argamassas. Podendo desta forma, ser nocivos quando envolvem grãos de agregado, aderindo a eles ou até mesmo quando se apresentam em forma de aglomerante.

Segundo Bezerra (2010), a quantidade de água utilizada em uma mistura e a acomodação das partículas (empacotamento) é influenciada diretamente pelas características do agregado miúdo utilizado. A finura do material e diretamente proporcional a quantidade de água utilizada, ou seja, quanto mais fino o agregado miúdo maior deve ser a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade adequada.

A forma das partículas do agregado miúdo tem influência quanto à questão do empacotamento, pois o teor de vazios diminui com o aumento do teor de

material arredondado. Segundo Mineropar (2004) apud Silva (2006), as principais funções dos agregados são:

- Promover o aglomerante de um material de enchimento relativamente econômico;
- Promover a pasta de partículas adaptadas para resistir às cargas aplicadas, ao desgaste mecânico e à percolação da intempérie;
- Reduzir as variações de volume resultante do processo de pega, endurecimento e variações de umidade na pasta de cimento, cal e água.

### **2.3.4 Propriedades das argamassas**

Para que possam cumprir adequadamente suas funções, as argamassas precisam apresentar um conjunto de propriedades, relativas aos estados frescos e endurecido. O entendimento dessas propriedades e dos fatores que influenciam a sua obtenção permite prever o comportamento dos revestimentos nas diferentes situações de uso.

#### *2.3.4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco:*

### **Consistência**

A consistência é a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhes são impostas. Para Silva (2006), a consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/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 a mesa de consistência (*flow table*) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e são realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 1995). Entretanto, apesar da grande utilização, este é um dos ensaios mais criticados, pois vários são os autores que comentam que a mesa não tem sensibilidade para medir a reologia da argamassa (GOMES et al., 1995; YOSHIDA & BARROS, 1995; CAVANI et al., 1997; PILLEGI, 2001; JOHN, 2003; BAUER et al., 2005; ANTUNES, 2005 apud SILVA, 2006).

De acordo com Bauer et al (2005), apesar de existirem equipamentos sofisticados que permitem uma avaliação mais do comportamento reológico de argamassas, fornecendo inclusive os parâmetros fundamentais (viscosidade e tensão de escoamento), os mesmos não são usuais em laboratórios de tecnologia das argamassas, devido, em primeiro lugar, ao seu elevado custo e, em segundo lugar, a algumas dificuldades operacionais.

### **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 (ROCHA, 2005).

Avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios é uma tarefa muito difícil, uma vez que ela depende não só das características intrínsecas da argamassa, mas também da habilidade do pedreiro que está executando o serviço e de várias propriedades do substrato, além da técnica de aplicação (CASCUDO et al., 2005 apud SILVA, 2006).

Pode-se considerar que uma argamassa possui boa trabalhabilidade quando a mesma espalha-se facilmente sobre o substrato e adere à sua superfície, e ainda no caso das argamassas de revestimento quando proporciona facilidade no seu acabamento final.

Segundo Roman et al (1999), uma boa trabalhabilidade das argamassas depende da combinação de diversos fatores como a qualidade dos agregados e dos



aglomerantes, quantidade de água utilizada na mistura, consistência, capacidade de retenção de água da argamassa, tempo decorrido da preparação da argamassa, adesão, fluidez e massa. Outro fator importante a ser considerado nesta propriedade são as características granulométricas das areias: coeficiente de uniformidade, módulo de finura e forma dos grãos.

### **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 (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 proporcionamento e natureza dos materiais.

### **Retenção de água**

Para Mattos (2002), em argamassas para revestimentos, a retenção de água influencia no tempo disponível para sua aplicação, regularização e desempenho, assim como afeta algumas propriedades no estado endurecido ao influenciar nas reações dos aglomerantes durante a cura, porém esta propriedade pode variar em função das condições do ambiente e das características de absorção da base. A retenção de água está relacionada com a manutenção da consistência, porque a argamassa tende a conservar a água necessária para molhar a superfície dos materiais, possibilitando que as reações de hidratação dos aglomerantes se processem.

A capacidade de retenção de água das argamassas varia em função do potencial de absorção do substrato, podendo ser ainda influenciada pela:

- Área específica dos materiais constituintes;

- Maturação prévia das argamassas de cal (período em que a pasta ou argamassa de sal é deixada em repouso antes da aplicação);
- Natureza da cal, onde as cales dolomíticas apresentam melhores características que as cales calcíticas (CINCOTTO et al, 1995);
- Relação cal/cimento no traço;
- Relação agregado/aglomerante do traço.

As argamassas que possuem elevada retenção de água permitem a hidratação do cimento sem perder a sua plasticidade, enquanto que as argamassas com baixa retenção de água dificultam o manuseio e podem ocasionar a expansão do substrato (MULLER et al, 1999).

Da mesma forma que na trabalhabilidade, os fatores que influenciam a retenção de água são as características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa. A presença de cal e de aditivos pode melhorar essa propriedade (BAÍA e SABATTINI, 2000).

### **Densidade de massa e Teor de ar incorporado**

A densidade de massa corresponde à relação entre a massa e o volume de material, sendo importante por ser um dos fatores que afetam a trabalhabilidade do material, pois à medida que a densidade diminui, a argamassa se torna mais leve e com melhor trabalhabilidade.

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar existente em certo volume de argamassa. À medida que o teor de ar aumenta, a densidade da argamassa diminui, interferindo diretamente em outras propriedades da argamassa no estado fresco, como a trabalhabilidade, ou seja, uma argamassa com menor densidade de massa e maior teor de ar, apresenta melhor trabalhabilidade, afetando negativamente quanto às propriedades de resistência mecânica e a aderência da

argamassa, que são propriedades importantes para que as argamassas sejam utilizadas (BEZERRA, 2010).

### **Adesão**

Adesão corresponde à aderência da argamassa no estado fresco ao substrato. A ocorrência desta adesão depende das características de trabalhabilidade, porosidade ou rugosidade, ou até mesmo de um tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais.

A adesão inicial ou a aderência da argamassa no estado fresco ao substrato a revestir deve-se, em princípio, às características reológicas da pasta aglomerante; a baixa tensão superficial da pasta, sendo função inversa do consumo de aglomerantes. É o que propicia sua adesão física ao substrato, assim como aos próprios grãos do agregado miúdo (SILVA, 2006).

#### *2.3.4.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido:*

### **Resistência mecânica**

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).

De acordo com CARASEK (2007) apud SANTOS (2008) 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. A execução de ensaios de resistência à compressão pode ser feita com a finalidade de controlar a argamassa produzida, obtendo indiretamente informações sobre o seu grau de hidratação, e conseqüentemente, o seu poder em resistir às ações externas.

A NBR 13281 (ABNT, 1995) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos prescreve que os requisitos mecânicos

e reológicos das argamassas devem estar em conformidade com as exigências indicadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Exigências mecânicas e reológicas para argamassas de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 1995)

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência a compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,1$ e $\leq 8,0$	(ABNT, 2004)
	III	$> 8,0$	
Capacidade de retenção de água (%)	Normal	$\geq 80$ e $\leq 90$	NBR 13277
	Alta	$> 90$	(ABNT, 1995)
Teor de ar incorporado (%)	A	$< 8$	NBR 13278
	B	$\geq 8$ e $\leq 18$	(ABNT, 1995)
	C	$> 18$	

Fonte: Santos, (2008).

## Retração

A retração é um processo sofrido pelas argamassas, principalmente, nas primeiras idades. No estado endurecido, a retração ocorre logo após o endurecimento da argamassa, resultante da reação química dos aglomerantes (cal hidratada e cimento Portland) e da remoção da água adsorvida nos produtos de hidratação, durante o processo de secagem (KOPSCHITZ, et al, 1997).

Segundo Sánchez et al (1997), a retração pode ser definida simplesmente como o processo de redução de volume sofrido pelas matrizes cimentícias durante e após o seu endurecimento, quando expostas ao ar. Além disso, os autores ainda ressaltam que este fenômeno gera tensões internas nas argamassas que podem causar desde a redução de volume até a fissuração do material. A propagação de

fissuras de um material heterogêneo como a argamassa e o concreto é influenciada pelos seus componentes.

### **Aderência**

Corresponde à propriedade que permite a argamassa absorver tensões tangenciais (cisalhamento) ou normais (tração) na superfície da interface com a base sem romper-se (ROCHA, 2005).

Segundo SABATTINI (1984) se houver um aumento do teor relativo de cimento no aglomerante pode-se aumentar ou diminuir a capacidade de aderência, dependendo das características do substrato.

A aderência à alvenaria é dividida em dois tipos descritos a seguir (CARVALHO JR et al., 2005 apud SILVA, 2006):

- Aderência química: corresponde à resistência de aderência que advém de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento;
- Aderência mecânica: formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros dos blocos de alvenarias devido ao efeito da sucção ou absorção capilar.

Alguns fatores como processo de execução do revestimento, condições climáticas e os materiais utilizados, correspondem a uma variabilidade de até 33% nos resultados do ensaio de aderência. Os resultados do ensaio de resistência de aderência a tração devem ser analisados em relação ao tipo de ruptura ocorrido, pois tanto o fato de romper na interface argamassa/substrato (aderência pura) quanto no interior dos materiais (falha de estruturação interna) representam fraturas no sistema de revestimento (GONCALVES, 2004apud SILVA, 2006).

### **Permeabilidade**

De acordo com ROCHA (2005), permeabilidade da argamassa corresponde à 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, técnica de execução, espessura da camada, natureza da base e existência de fissuras.

A permeabilidade, portanto, está relacionada à passagem de água pela camada de argamassa, que é um material poroso e permite a percolação da água tanto no estado líquido como no de vapor (BAÍA e SABBATINI, 2000). Assim a argamassa, já no estado endurecido permite a penetração de água por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água.

### **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 à dimensão original inicial quando cessam estas solicitações (SILVA, 2006).

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 à base e, conseqüentemente, sua durabilidade (CINCOTTO et al., 1995 e SILVA, 2006).

No entanto, este sentido é estendido, no caso de argamassas, para o estado tal de deformação plástica em que a ruptura ocorre sob a forma de fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais (SABBATINI, 1986).

A capacidade da argamassa de absorver deformações pode ser avaliada através do módulo de elasticidade que pode ser obtido através do método estatístico ou dinâmico. Quando menor o valor do módulo, maior será a capacidade do material de absorver deformações (SILVA, 2006).

### **Durabilidade**

Nenhum material é inerentemente durável; como resultados de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando propriedades sob dadas condições de uso deterioram a tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada insegura ou antieconômica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Sendo assim, a durabilidade de um revestimento pode ser definida como a propriedade do período de uso desse revestimento, resultante de suas propriedades no estado endurecido, e que reflete o desempenho das argamassas diante das ações do meio externo ao longo do tempo (BAÍA e SABBATINI, 2000).

A durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por causas internas no interior do próprio material. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas (NEVILLE, 1997).

### **2.3.5 Dosagem das argamassas**

O adequado desempenho das argamassas depende fundamentalmente da correta escolha dos materiais e de seu proporcionamento, cujas operações são denominadas de dosagem (LARA et al., 1995).

Segundo CARNEIRO (1999), usualmente a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume) descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e cadernos de encargos. De acordo com o mesmo autor, para argamassas de revestimentos tem-se adotado com mais frequência os traços de dosagem 1 : 1 : 6 (cimento : cal : areia) e 1 : 2 : 9, em volume, numa proporção aglomerante : agregado de 1 : 3 ou 1 : 4. A escolha de um desses traços está de acordo com o desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja, sua durabilidade. No entanto, na prática identifica-se o emprego de traços mais pobres, como 1 : 4 a 1 : 9 (aglomerante : agregado), como constataram CAMPITELI et al. (1995), não dando qualidade ao revestimento.

Embora na presente década os textos normativos sobre revestimentos de argamassa tenham passado por uma grande evolução, constata-se que a NBR 7200 (ABNT, 1998) suprimiu toda e qualquer indicação de traços ou consumos empíricos para a produção de argamassas de revestimentos (MIRANDA, 2000).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e as metodologias utilizadas no desenvolvimento da pesquisa envolvendo a incorporação dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 *Produtos da combustão do carvão mineral*

Os produtos da combustão do carvão mineral (Figura 3.1) utilizados nesta pesquisa são provenientes dos Estados Unidos da América (EUA), cedidos pela MPX Energia, empresa de energia do grupo EBX.

Figura 3.1 – Produtos da combustão do carvão mineral a) in natura e b) seca e peneirada.



Fonte: Autora.

##### 3.1.2 *Cimento*

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o cimento Portland CP II F, classe 32, da marca Votorantim. Este foi utilizado por não conter pozolana em sua composição, pois os PCCs serão utilizados com esta função. O cimento foi doado pela indústria Votorantim, produtora de cimentos, localizada na cidade de Fortaleza-CE e posteriormente acondicionado em sacos plásticos, ficando assim totalmente

protegido das intempéries. A tabela 3.1 mostra suas principais propriedades segundo o fabricante.

Tabela 3.1 – Propriedades do cimento utilizado

Propriedades	Resultado
Resistência à compressão aos 28 dias	≥32 MPa
Tempo de pega (h)	Início: ≥1 e Fim: ≤10
Finura: resíduo na peneira 75mm (%)	≤12,0
Expansibilidade à Quente	≤ 5,0 mm

Fonte: Votorantim Cimentos.

### **3.1.3 Cal**

A cal utilizada foi a cal hidratada CH I, fornecida pela indústria Carbomil localizada na cidade de Fortaleza-CE. A cal foi retirada da embalagem comercial e acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados de forma a não modificar as propriedades originais e proteger das intempéries.

### **3.1.4 Areia**

A areia utilizada foi proveniente de um depósito de materiais de construção da cidade de Fortaleza-CE.

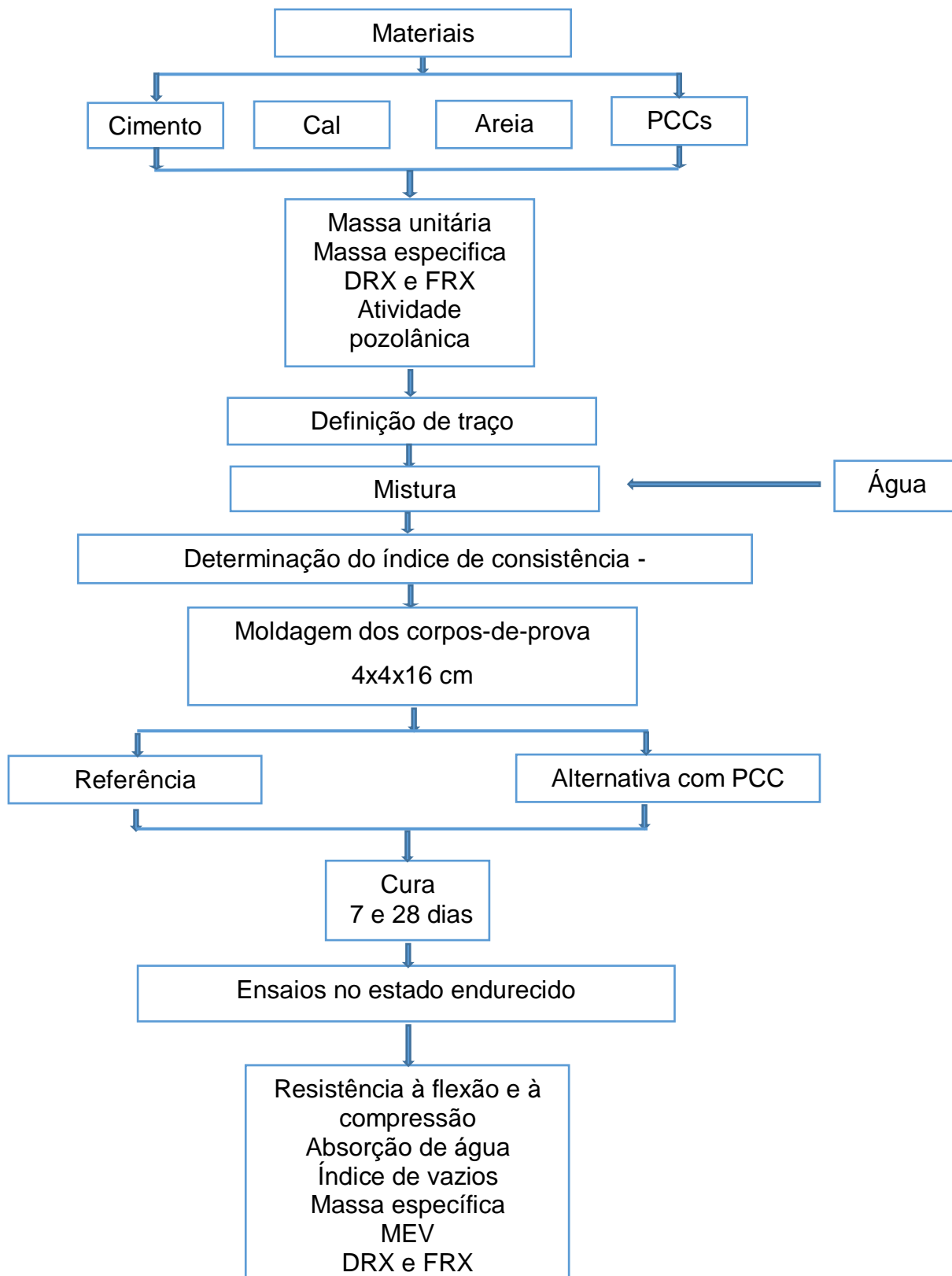
### **3.1.5 Água**

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal do Ceará (UFC).

## **3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

A figura 3.2 mostra o fluxograma esquemático das etapas realizadas no desenvolvimento da pesquisa.

Figura 3.2 – Fluxograma das etapas dos ensaios realizados na pesquisa



### 3.2.1 Caracterização física

Os materiais utilizados foram secos em estufa à  $105 \pm 5$  °C por 24h e foram submetidos a vários processos de caracterização, descritos a seguir.

#### 3.2.1.1 Determinação da massa específica

Para a determinação da massa específica dos materiais, utilizou-se a norma NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Utilizou-se o frasco Le Chatelier, que foi preenchido com xilol até uma marcação conhecida entre 0 e 1cm<sup>3</sup>. Após o colo do frasco volumétrico ter sido secado na parte acima do nível do líquido com papel absorvente, o frasco foi submerso em banho termorregulador até obter o equilíbrio térmico, e a leitura inicial ( $V_i$ ) foi anotada. Em seguida, a amostra foi introduzida no frasco através de um funil de haste longa. Foram necessários 60g de cada material. Após promover a retirada de bolhas de ar, o frasco foi submerso no banho termorregulador até que fosse atingido o equilíbrio. Por fim, foi anotado a leitura final ( $V_f$ ).

As massas específicas foram então calculadas de acordo com equação 3.1.

$$\rho = \frac{M}{v_f - v_i} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde:

$\rho$  = é a massa específica dos materiais (g/cm<sup>3</sup>);

$M$  = é a massa da amostra ensaiada (g);

$V_i$  = volume inicial de xilol no frasco (cm<sup>3</sup>);

$V_f$  = volume após colocação do material no frasco com xilol (cm<sup>3</sup>).

#### 3.2.1.2 Massa unitária

Para a determinação da massa unitária dos materiais foi utilizada a norma NM 45 (ABNT, 2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de

vazios. A amostra a ser ensaiada foi colocada em um recipiente com volume conhecido, com o auxílio de uma concha da seguinte forma: o agregado foi lançado de uma altura de 12cm do topo do recipiente. Após o recipiente estar cheio a superfície foi alisada com uma régua tomando como limite as bordas da caixa (rasou-se o topo com uma régua). O recipiente foi pesado (kg) com o material nele contido. A massa do agregado ( $M_a$ ) é a diferença entre o recipiente cheio e vazio. Foram feitas três determinações com amostras distintas  $M_{a1}$ ,  $M_{a2}$  e  $M_{a3}$ . A massa unitária (Equação 3.2) é a média de três determinações dividindo-se a média das massas pelo volume do recipiente utilizado.

$$\rho_u = \frac{\rho_{u1} + \rho_{u2} + \rho_{u3}}{3} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal do Ceará-UFC.

### **3.2.2 Caracterização química**

#### *3.2.2.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)*

Para determinação da composição química realizada nos materiais, cimento, PCCs e a cal, a técnica utilizada foi a espectrometria de fluorescência de Raios-X (Figura 3.3).

A análise de FRX é uma poderosa técnica não destrutiva que permite não só uma análise qualitativa (identificação dos elementos presentes numa amostra), mas também quantitativa, permitindo estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente.

Figura 3.3 – Aparelho utilizado para determinação da composição química



Fonte: Autora.

Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Foi utilizado um equipamento *Rigaku*, modelo ZSX Mini II operando em uma tensão de 40 kV e corrente de 1,2mA, equipado com tubo de paládio.

As análises foram realizadas no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará - UFC.

### 3.2.2.2 Difração de Raios – X

O ensaio de difração de Raios – X foi realizado para o cimento, os PCCs e a cal, tendo como objetivo caracterizá-los mineralogicamente. O aparelho utilizado para realização do ensaio foi o Difratômetro *Panalytical* modelo *XPERT Pro MPD*, operando em uma tensão de 40kV e corrente 40mA, equipado com um tubo de cobalto (Figura 3.4), com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6 s, com angulo  $2\theta$  percorrido de 10°a 60°C.

A realização deste ensaio se faz importante devido esta análise ter caráter qualitativo, pois promove a identificação das fases cristalinas presentes no material, sendo realizada por análise dos picos presentes no difratograma e pela comparação com bancos de dados específicos. Com este ensaio é possível determinar o quanto uma amostra é amorfa ou cristalina.

Figura 3.4 – Difratorômetro de Raios-X



Fonte: Autor.

A análise foi realizada no laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará – UFC.

### **3.2.3 Atividade pozolânica**

Para determinação da atividade pozolânica dos PCCs, foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 1992) – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica.

Nesta metodologia, são confeccionadas duas argamassas com traço 1:3 (cimento: areia normal). Na primeira argamassa foi usado apenas cimento Portland e, na segunda, 35% do volume absoluto do cimento foi substituído pela pozolana. A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos-de-prova foram feitas seguindo a NBR 7215 (ABNT, 1996) - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Na execução do ensaio, foi determinada a quantidade de água para um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm de acordo com as prescrições estabelecidas pela norma. Desta forma, foi possível variar a trabalhabilidade da argamassa adicionando ou retirando água até atingir a faixa desejada

Para cada tipo de argamassa foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm. A cura inicial ocorreu dentro dos moldes, em câmara úmida, com temperatura de  $(23\pm 2)$  °C. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em ambiente hermeticamente fechado, permanecendo estanques com temperatura de  $(38\pm 2)$  °C, por um período de 27 dias. Aos 28 dias, os corpos de prova, já resfriados, foram capeados (Figura 3.5). Por fim, foi realizado o ensaio de resistência à compressão.

Figura 3.5 – Capeamento dos corpos-de-prova



Fonte: Autor

O índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência média dos corpos de prova moldados com a substituição de pozolana pela resistência média dos corpos de prova moldados com cimento, sendo seu resultado apresentado em percentual (Equação 3.3).

$$IAP\% = \frac{f_{CP}}{f_{CC}} \times 100 \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde:

$f_{cp}$  - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos de prova moldados com cimento Portland e material pozolânico – argamassa A;

$f_{cc}$  - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos de prova moldados somente com cimento Portland como material cimentício – argamassa B.

A NBR 12653 (ABNT, 1992) – Materiais pozolânicos – estabelece que um material, para ser classificado como pozolânico, entre outros critérios, deve atingir  $IAP \geq 75\%$ .



A confecção dos corpos de prova e ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará-UFC.

### **3.2.4 Conversão do traço em volume para massa**

Nesta pesquisa foram utilizadas argamassas na proporções 1:1:6 (cimento: PCCs: cal: areia) em massa, respectivamente. Tem-se as argamassas de referência que são as sem adição mineral (sem PCCs) e as argamassas com produto da combustão mineral com percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. O traço utilizado foi devido ser usado comercialmente em argamassa para revestimento.

Após determinação da proporção fez-se necessário a transformação das medidas de volume para massa, ou seja, transformar as medidas de m<sup>3</sup> para kg.

A proporção dos materiais, em massa foi definida de acordo com a massa unitária de cada material utilizado na produção das argamassas. Para as argamassas de referência observa-se através da equação 3.4, a proporção dos materiais, sendo uma unidade de volume de cimento, “a” unidades de volume da cal e “b” unidades de volume da areia. Para os traços com produto da combustão do carvão mineral tem-se na equação 3.5, “a” unidades de volume de cimento, “b” unidades de volume da cinza, “c” unidades de volume cal e “d” unidades de volume da areia.

$$1 : a : b \quad \text{Equação (3.4)}$$

$$a : b : c : d \quad \text{Equação (3.5)}$$

De acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982) que define massa unitária de um agregado no estado solto com sendo a relação entre a massa do material colocado em um recipiente e o volume deste recipiente. Então para facilitar a transformação da proporção dos materiais de volume para massa, fez-se a multiplicação das unidades de volume de cada material do traço por suas respectivas massas unitárias, este procedimento esta apresentado na equações 3.4 e 3.5.

$$1 \cdot \mu_{\text{cim}} : a \cdot \mu_{\text{cal}} : b \cdot \mu_{\text{areia}} \quad \text{Equação (3.6)}$$

$$a \cdot \mu_{\text{cim}} : b \cdot \mu_{\text{PCC}} : c \cdot \mu_{\text{cal}} : d \cdot \mu_{\text{areia}} \quad \text{Equação (3.7)}$$

Onde:

$\mu_{\text{cim}}$ : massa unitária do cimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{\text{PCC}}$ : massa unitária do produto da combustão do carvão mineral ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{\text{cal}}$ : massa unitária da cal ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{\text{areia}}$ : massa unitária da areia ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Ao transformar cada unidade de volume em unidade de massa que corresponde às Equações 3.6 e 3.7, dividem-se estas pela massa unitária do cimento de forma que se obtenha uma unidade de massa de cimento para os traços de referência e para os com PCCs o valor correspondente ao percentual de substituição dos produtos da combustão do carvão mineral, logo as equações 3.8 e 3.9 demonstram tal procedimento, respectivamente.

$$\frac{\mu_{\text{cim}}}{\mu_{\text{cim}}} : \frac{\mu_{\text{cal}}}{\mu_{\text{cim}}} : \frac{\mu_{\text{areia}}}{\mu_{\text{cim}}} \quad \text{Equação (3.8)}$$

$$\frac{\mu_{\text{cim}}}{\mu_{\text{cim}}} : \frac{\mu_{\text{PCC}}}{\mu_{\text{cim}}} : \frac{\mu_{\text{cal}}}{\mu_{\text{cim}}} : \frac{\mu_{\text{areia}}}{\mu_{\text{cim}}} \quad \text{Equação (3.9)}$$

Utilizando a equação 3.9 e o valor das massas unitárias de cada componente, o proporcionamento em massa da argamassa passa a ser 1: 0,442: 8,538.

Os valores desta transformação podem ser conferidos na Tabela 3.2, onde estão os traços em volume e em massa. Após transformação dos traços em massa, determinou-se o índice de consistência das argamassas seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 1995) para se obter um espalhamento de 255 mm  $\pm$  10 mm, os valores desta propriedade são encontrados posteriormente. E então foram moldados em cada traço um correspondente a 3 corpos de prova com tempo de cura de 7 e 28 dias para utilização nos ensaios.

Tabela 3.2 – Valores dos traços em volume e em massa

	PCC	Traço em volume	Cimento: PCCs: cal: areia
	(%)	(m <sup>3</sup> )	(kg)
<b>1:1:6</b> <b>(Cimento:%Cinza:</b> <b>Cal: Areia)</b>	0	1:0:0,442:8,538	150:0:66,3:1.280,7
	10	0,90:0,10: 0,442:8,538	135:15:66,3:1.280,7
	20	0,80:0,20: 0,442:8,538	120:30:66,3:1.280,7
	30	0,70:0,30: 0,442:8,538	105:45:66,3:1.280,7
	40	0,60:0,40: 0,442:8,538	90:60:66,3:1.280,7
	50	0,50:0,50: 0,442:8,538	75:75:66,3:1.280,7

### 3.2.5 Preparo das argamassas

Neste trabalho foram confeccionadas argamassas de referência (sem substituição) e alternativas que utiliza os PCCs como substituinte de parte do aglomerante (cimento) nos percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Os materiais foram pesados em balanças devidamente calibradas e em seguida, homogeneizadas em um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 litros, da marca PAVITEST (Figura 3.6), seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

Figura 3.6 – Misturador mecânico



Fonte: Autora.

Após o preparo das misturas, em moldes prismáticos com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 3.7) foram confeccionados corpos de prova, os quais foram desmoldados após 24h. Após a desmoldagem os corpos de prova foram identificados e em seguida submetidos a períodos de cura de 7 e 28 dias de idade.

Figura 3.7 – Moldagem das argamassas de revestimento



Fonte: Autora.

### 3.3 Métodos de ensaios para caracterização das argamassas

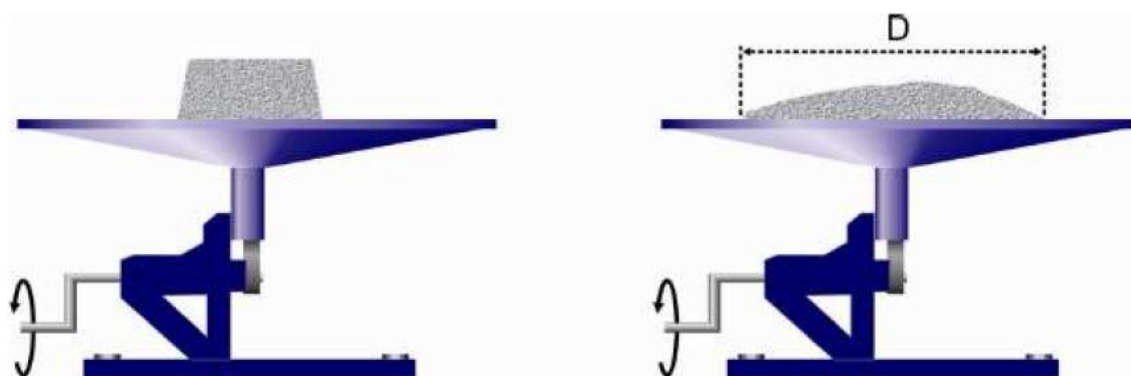
#### 3.3.1 Argamassa no estado fresco

##### 3.3.1.1 Índice de consistência

A Norma NBR 13276 (ABNT, 2005) foi utilizada neste ensaio visto que prescreve o método de determinação do teor de água na preparação de argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. O princípio do ensaio consiste em medir o índice de consistência com a utilização da mesa de consistência, também conhecida como *flow table*, descrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996). O índice de consistência padrão proposto pela norma NBR 13276 (ABNT, 1995) é  $255 \pm 10$  mm, sendo este o valor utilizado.

O ensaio consistiu na medida do espalhamento obtido através de uma quantidade de argamassa inicialmente moldada em forma tronco-cônica sobre a mesa de consistência (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Esquema do ensaio de determinação do índice de consistência, para determinação do espalhamento (“D”) mesa de consistência flow table



Fonte: Silva (2006).

A argamassa foi moldada em três camadas, sendo a primeira com 15 golpes, a segunda com 10 golpes, a terceira com 5 golpes e por fim retirado o excesso. Em seguida retira-se o molde tronco-cônic e inicia-se o processo de espalhamento através de 30 golpes em 30s e logo em seguida medem-se os diâmetros ortogonais

da argamassa após a deformação, sendo a média dessas medidas o índice de consistência padrão.

### **3.3.2 Argamassa no estado endurecido**

#### **3.3.2.1 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão**

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas formuladas foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento revestimento de paredes e tetos, no Laboratório de Ensaio Físicos do Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) em uma prensa de ensaio universal EMIC, modelo DL 1000. A figura 3.9 ilustra a execução do ensaio.

Figura 3.9 – Ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão



Fonte: Autora.

A norma permite que, primeiramente se ensaie o corpo de prova à tração na flexão e, em seguida, que este mesmo corpo de prova seja ensaiado à compressão. Para cada tipo de argamassa, ensaiaram-se três corpos de prova à flexão e, conseqüentemente, 6 corpos de prova à compressão, já que as metades dos corpos de prova resultantes do ensaio de flexão foram utilizados para o ensaio de compressão.

Antes da realização do ensaio de resistência à tração na flexão, o eixo do corpo de prova foi demarcado para garantir a aplicação da carga no centro do

mesmo. Relativamente ao ensaio, o processo consiste numa aplicação gradual de cargas ao meio do corpo de prova levando à ruptura. Da última carga registrada obteve-se o valor da força de cálculo para resistência à flexão.

As metades dos corpos de prova resultantes do ensaio de flexão foram utilizados para o ensaio de compressão. Neste ensaio é de forma análoga ao ensaio de flexão onde foram aplicadas cargas gradualmente crescentes, até a ruptura do corpo de prova, no qual foi registrado a sua última carga.

### 3.3.2.2 *Absorção de água, índice de vazios e massa específica*

Após o tempo de cura de 28 dias das argamassas, foi necessário avaliar suas propriedades cerâmicas e verificar como se comportavam para diferentes teores de PCCs. Portanto, foram realizadas análises tais como: absorção de água ( $\text{g/cm}^3$ ), índice de vazios ( $\text{g/cm}^3$ ) e massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ). Estes ensaios estão de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005).

A absorção de água por parte de uma argamassa permite avaliar a sua aplicabilidade em sistemas que requerem alta impermeabilidade, como piscinas, tanques e diques. Quanto mais porosa for a argamassa, mais rapidamente agentes como gás carbônico existente no ar, o sal da água do mar, os gases sulfurosos de uma rede de esgoto e etc., irão prejudicar a integridade da peça. Este ensaio avalia a porosidade da argamassa em corpos de prova moldados para o ensaio de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Os corpos de prova foram colocados na estufa e mantidos a uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 72h e determinadas as massa das amostras ( $m_s$ ). Em seguida, as amostras foram imersas em água à uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C e mantidas durante 72h nesta condição. Ao completar a etapa de saturação as amostras foram mantidas em ebulição durante 5h e deixadas esfriar naturalmente para serem determinadas as massas ( $m_i$ ) com auxílio de uma balança hidrostática. Por fim, as amostras foram retiradas da água e enxutas com um pano para serem determinadas suas massas ( $m_{\text{sat}}$ ).

A absorção por imersão  $A_i$  é calculada através da equação 3.10:

$$A_i = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação (3.10)}$$

Em que:

A = absorção de água por imersão;

$M_{sat}$  = massa da amostra saturada em água;

$M_s$  = massa da amostra seca em estufa.

Uma das características desta propriedade é a de ser inversamente proporcional a resistência à compressão, ou seja, quanto maior a resistência à compressão menor e a absorção.

O índice de vazios das argamassas é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, com aplicação da equação 3.11:

Uma das características desta propriedade é a de ser inversamente proporcional a resistência à compressão, ou seja, quanto maior a resistência à compressão menor e a absorção.

O índice de vazios das argamassas é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, com aplicação da equação 3.9:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação (3.11)}$$

Onde:

$I_v$  = índice de vazios;

$M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado imersa em água após fervura.

A massa específica da amostra seca segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005) é relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros impermeáveis; Nesta análise permite, a partir da massa real do corpo-de-prova quando seco e em estado saturado, expressar sua massa específica real.

Tomando-se as orientações efetuadas através dos procedimentos e as medidas necessárias conforme NBR 9778/2005, foi determinado à densidade através da equação 3.10:



$$P_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação (3.12)}$$

### 3.3.2.3 *Análise microestrutural*

O progresso no campo dos materiais resultou principalmente do reconhecimento do princípio de que as propriedades de um material são determinadas, em grande parte, pela sua estrutura interna; em outras palavras, as propriedades podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Diante disso, as argamassas formuladas foram analisadas microestruturalmente, visando um auxílio na busca por respostas quando da sua caracterização.

Para aprofundar a análise das argamassas no seu estado endurecido, foi realizada a análise de sua microestrutura utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Philips XL 30. Foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizadas no ensaio de compressão para cada traço. Em cada amostra foi feito o recobrimento com carbono grafite na superfície de fratura para realizar a análise.

A análise da composição química elementar pontual das amostras, foi feita por Espectroscopia de Raios – X por Energia Dispersiva (EDS) – acoplado ao MEV.

O ensaio foi realizado no LACAM - Laboratório de Caracterização de Materiais, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará – UFC.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos Materiais

#### 4.1.1 Massa específica e massa unitária

A determinação dessas características físicas é de fundamental importância, pois como os produtos da combustão do carvão mineral vão substituir o cimento para compor a pasta utilizada na confecção das argamassas a serem investigadas, essas características poderão ser o fator determinante na avaliação das propriedades das argamassas tanto no estado fresco, como no estado endurecido. A Tabela 4.1 apresenta os resultados das massas específicas e massas unitárias dos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 4.1 – Massa específica e massa unitária dos materiais

<b>Materiais</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) NBR 9776 (1987)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>) NBR 7251 (1982)</b>
PCC's	2,13	0,59
Cimento	3,17	1,04
Cal	2,01	0,73
Areia	2,61	1,48

Os resultados encontrados mostram que a massa específica dos PCCs é inferior à massa específica da areia e do aglomerante cimento. Com relação à massa unitária, os resultados mostram que os PCCs possuem uma massa unitária menor do que a dos aglomerantes e do agregado miúdo. A massa unitária é de grande importância devido à sua utilização na transformação de traços em volume para traços em massa.

#### 4.1.2 Fluorescência de raios-X e Difração de raios-X

##### Produto da Combustão do Carvão Mineral (PCCs)

A caracterização química dos PCCs é importante tanto com relação aos elementos majoritários quanto aos elementos traços presentes em sua composição, pois estes influenciam fortemente no seu potencial de aplicação, bem como determinam seu impacto no meio ambiente.

A composição química dos PCCs depende essencialmente das características dos carvões queimados e das impurezas que eles contém. Os resultados da análise química por fluorescência de raios-X dos PCCs estão apresentados na Tabela 4.2. Quase 65% da composição deste material apresenta sílica -  $\text{SiO}_2$  (41,65%) e alumina-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (22,17%) como óxidos principais, sendo esta característica esperada, uma vez que estes são os principais constituintes dos produtos da combustão do carvão mineral. Os altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrados nos PCCs conferem a estes um grande potencial de aplicação como matéria-prima na produção de argamassas e concreto.

Tabela 4.2 – Composição química dos PCCs

Componente	Massa %
$\text{SiO}_2$	41,648
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22,166
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	16,733
$\text{K}_2\text{O}$	7,722
$\text{CaO}$	6,481
$\text{SO}_4$	1,589

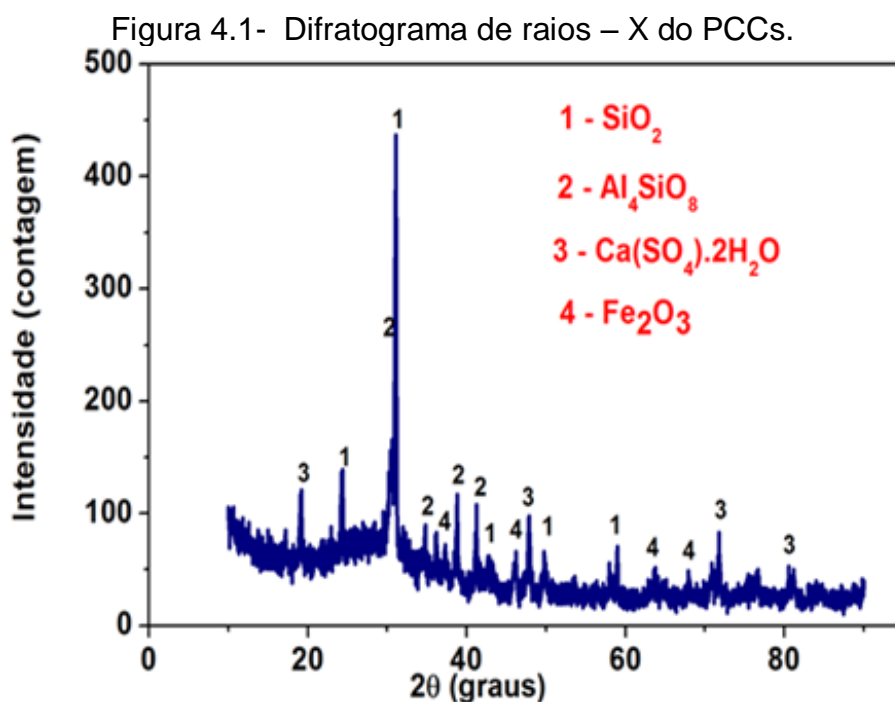
O teor de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), segundo Rocha (1997), está relacionado principalmente à presença de sulfito (pirita e marcassita) nos carvões minerais.

Outro aspecto relacionado às concentrações de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  está no fato de que a soma destes óxidos pode classificar o produto da combustão do carvão mineral como classe C na classificação de materiais pozolânicos, uma vez que apresentam a soma de suas concentrações maior que 70% que é o valor

mínimo requerido na normalização, evidenciando propriedades cimentantes e pozolânicas.

A Figura 4.1 ilustra o difratograma de raios-X dos produtos da combustão do carvão mineral. Analisando o difratograma observa-se o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) como fase mineralógica principal, bem como se identifica a presença de outras fases como: mulita ( $\text{Al}_4\text{SiO}_8$ ), sulfato de cálcio hidratado/gipsita ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

De acordo com Ferret (2002), algumas fases identificadas nos PCCs estão relacionadas à temperatura utilizada durante a combustão do carvão, sendo que para processos a temperaturas inferiores a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , algumas fases cristalinas ou amorfas presentes originalmente no carvão se mantêm durante todo o processo, uma vez que estas temperaturas não são suficientes para destruir essas estruturas, como por exemplo o quartzo e a hematita. Já a mulita e sulfato de cálcio hidratado, por sua vez, são decorrentes das reações que ocorrem durante a combustão do carvão mineral.



Na determinação das fases presentes utilizando o difratograma de raios X, é preciso considerar que podem existir picos de fases que se sobrepõem aos de

outras fases presentes, seja por apresentarem a mesma intensidade ou por estarem muito próximos.

### Cimento

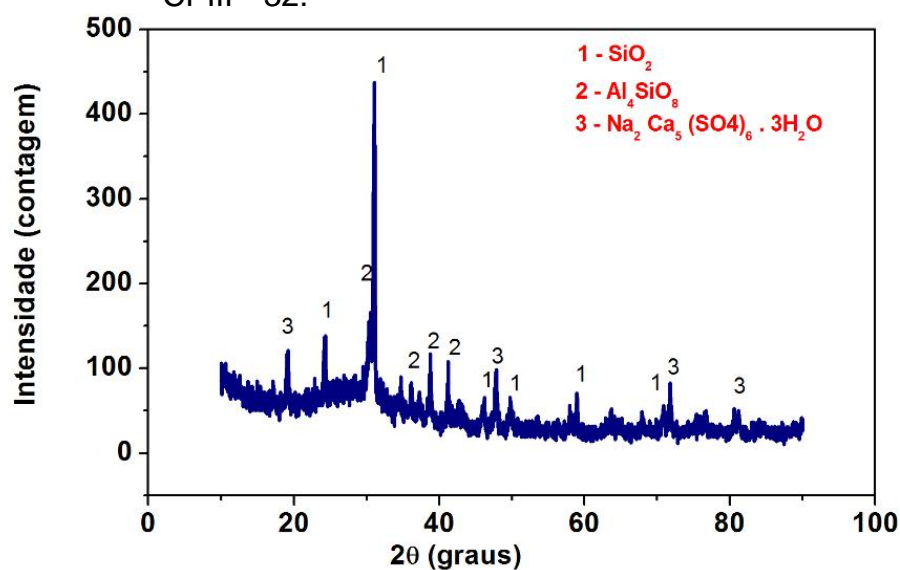
Na Tabela 4.3 estão listados os resultados da composição química do CP II F – 32. Analisando-se estes dados, pode-se observar que o cimento apresenta maiores teores de óxido de cálcio e de dióxido de silício, correspondendo a 74,35% e 12,28% respectivamente, estando os demais óxidos com valores abaixo de 7%. De acordo com os resultados da composição química é possível recomendar a utilização deste cimento, por apresentar grande percentual de óxido de cálcio, para produção de argamassas de assentamento e revestimento, concretos simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, dentre outros (POUEY, 2006).

Tabela 4.3 – Composição química do cimento Portland CP II F – 32.

<b>Componente</b>	<b>Massa %</b>
<b>CaO</b>	74,3496
<b>SiO<sub>2</sub></b>	12,284
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,1783
<b>SO<sub>3</sub></b>	3,4942
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,8748

A Figura 4.2 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CP IIF- 32. Observa-se a presença de materiais cristalinos, com picos referentes ao silicato tricálcico ou alita ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), silicato dicálcico ou belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Figura 4.2 – Difratoograma de raios - X do cimento Portland CPIIF- 32.



### Cal

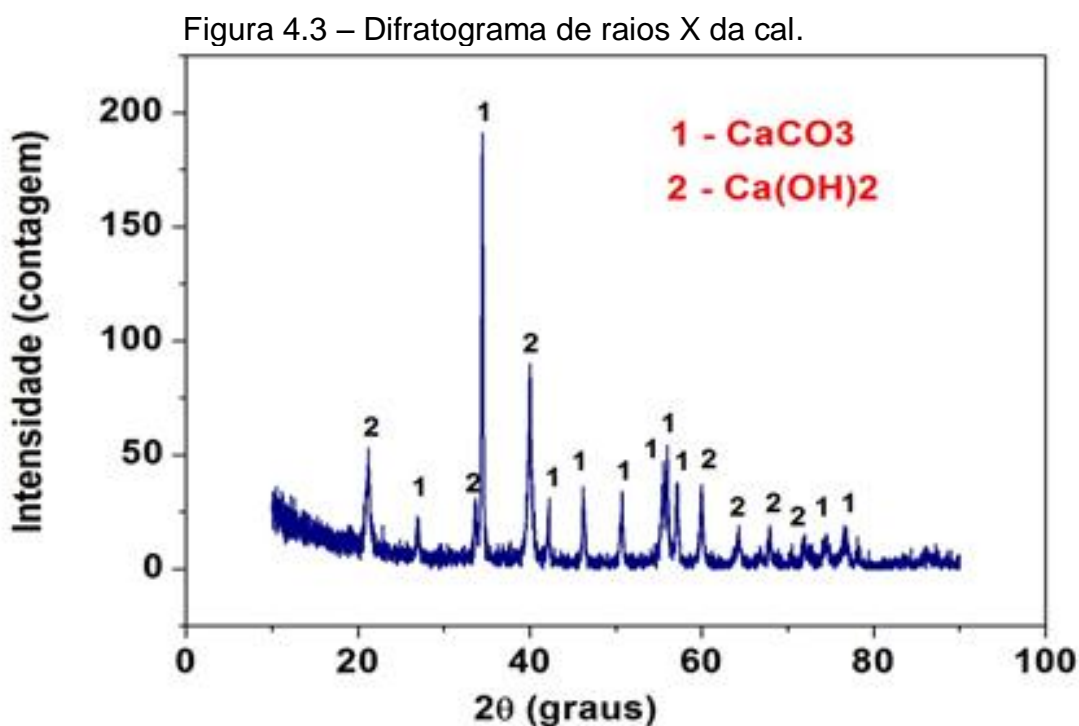
Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores da composição química da cal.

Tabela 4.4 – Composição química da cal

Componente	Massa %
CaO	98,8549
SiO <sub>2</sub>	0,6425
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3665
K <sub>2</sub> O	0,0717
SrO	0,0644

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a cal possui um elevado teor de óxido de cálcio (CaO), aproximadamente 99%. Quanto aos demais componentes encontrados na composição química da cal como principais impurezas, apresentam valores inferiores a 1%. De acordo com esta composição a cal pode ser considerada como sendo calcítica por apresentar como principal composto o óxido de cálcio. Esta composição favorece a utilização desta cal para produção de argamassas de assentamento e revestimento (SILVA, 2006).

A Figura 4.3 apresenta o difratograma de raios X da cal. Observa-se que a cal é constituída basicamente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente do calcário precursor e da portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) decorrente da reação de hidratação do óxido de cálcio ou cal virgem ( $\text{CaO}$ ).



#### 4.1.3 Atividade pozolânica

O valor obtido para o índice de atividade pozolânica para o produto da combustão do carvão mineral com o cimento, foi de 98,49 % sendo maior que o valor estabelecido pela norma NBR 5752 (ABNT, 1992), que é de 75%. Portanto, assume-se que os produtos da combustão do carvão mineral em questão podem ser caracterizados como um material pozolânico e utilizados como substituto parcial do cimento.

## 4.2 Ensaio com as argamassas

### 4.2.1 Argamassa no estado fresco

#### 4.2.1.1 Índice de consistência

A Tabela 4.5 apresenta os valores para relação água/aglomerante e índice de consistência das argamassas. Observa-se para a relação água/aglomerante que conforme aumenta a porcentagem de finos, há um aumento na quantidade de água utilizada para se obter o índice de consistência desejado. Provavelmente isso ocorreu devido à elevada superfície específica dos materiais aglomerantes, pois a cinza e a cal são materiais com mais finos que o cimento, existindo uma relação entre a quantidade de finos e a necessidade de água.

Tabela 4.5 – Relação água/cimento e índice de consistência das argamassas.

Traço	PCC's (%)	Relação Água/aglomerante	Índice de Consistência (mm)
	0	1,25	260
	10	1,30	254
	20	1,32	261
1:1:6 (Cimento:cal:areia)	30	1,34	256
	40	1,35	259
	50	2,00	253

#### 4.2.2 Argamassa no estado endurecido

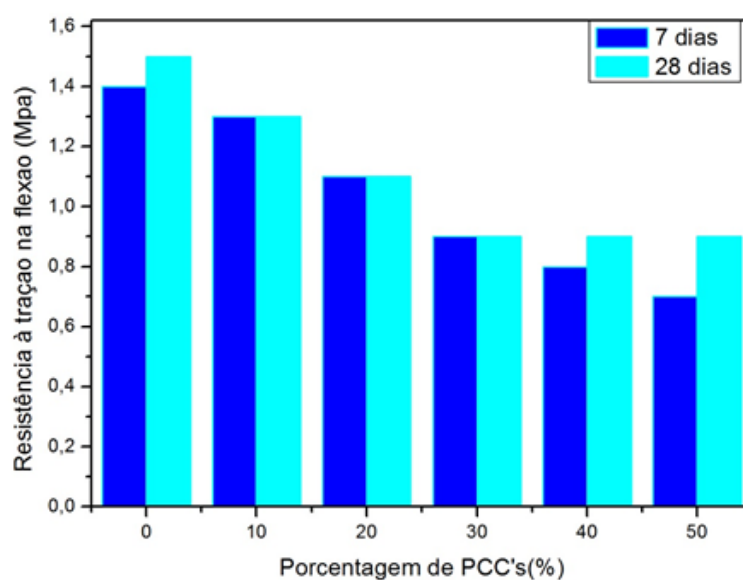
##### 4.2.2.1 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

Nesta etapa, foram realizadas ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005), nas argamassas com adição dos produtos da combustão do carvão mineral, bem como nas argamassas sem adição. A argamassa de referência forneceu parâmetros para comparação das propriedades desta argamassa com as demais.



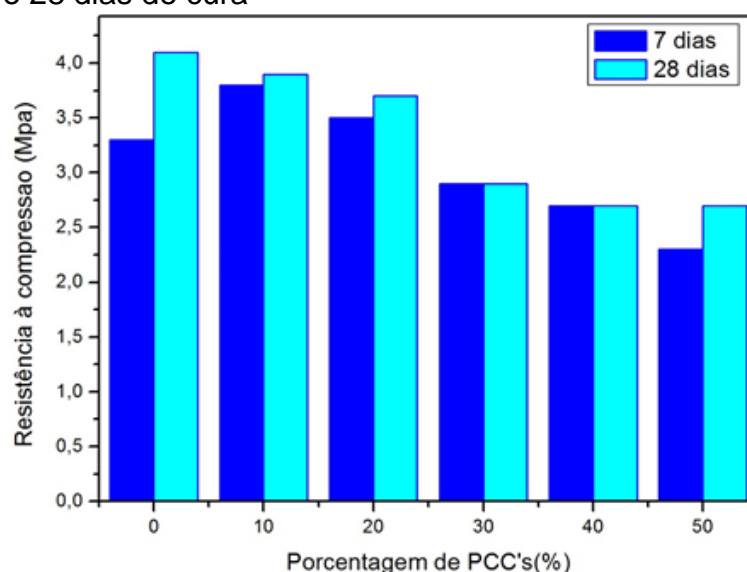
A Figura 4.4 mostra os resultados da resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de cura. Observa-se que todas as argamassas com adição dos PCCs apresentaram resultados inferiores quando comparadas com argamassa de referência. Nota-se que aos 28 dias de cura há um pequeno ganho na resistência à tração na flexão tanto para a argamassa de referência quanto para os teores de 40% e 50% de PCCs que é originado pelas diversas reações de hidratação de ocorrem no material.

Figura 4.4 – Resistência à tração na flexão para argamassas 7 e 28 dias de cura.



A Figura 4.5 mostra os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura.

Figura 4.5 – Resistência à compressão para argamassas 7 e 28 dias de cura



Analisando os resultados da Figura 4.5, observa-se que a tensão ruptura apresentou um comportamento semelhante ao da resistência à tração na flexão. Constatou-se que a adição de 10 e 20% dos produtos da combustão do carvão mineral ocorreu um pequeno aumento da resistência aos 7 dias de idade quando se comparada com a argamassa referência. No entanto, as argamassas com 30, 40 e 50% houve o decréscimo da resistência. Já a ruptura aos 28 dias, as argamassas com adição dos produtos da combustão do carvão mineral, apresentam resistência à compressão inferior ao traço de referência. Esta situação pode ter como causas vários fatores. Em primeiro lugar, as partículas do cimento possuem superfície específica maior do que a dos PCCs, causando um não preenchimento dos vazios pelos grãos finos dos PCC'. Além disso, o aumento da quantidade de água utilizada gerou a perda de resistência das argamassas, que é originado pelas diversas reações de hidratação que ocorre no material.

A Figura 4.6 mostra um pequeno ganho na resistência das argamassas dos 7 para os 28 dias, indicando que a evolução da resistência à compressão é mais lenta, devido às reações de hidratação.

A Tabela 4.6 apresenta os valores da resistência à compressão segundo a norma NBR 13281(1995). Alisando-se as exigências físicas e mecânicas para argamassas industrializadas, especificadas para assentamento de paredes e revestimentos de tetos e paredes, observa-se que todas as argamassas produzidas

neste trabalho, atendem aos limites de  $\geq 0,1$  e  $< 4$  MPa, o que as classifica como do Tipo I.

Tabela 4.6 - Resistência à compressão (MPa) de acordo com a norma NBR 13281.

Limites	Tipos de argamassa
$\geq 0,1$ e $< 4$	I
$\geq 4$ e $\leq 8$	II
$\geq 8$	III

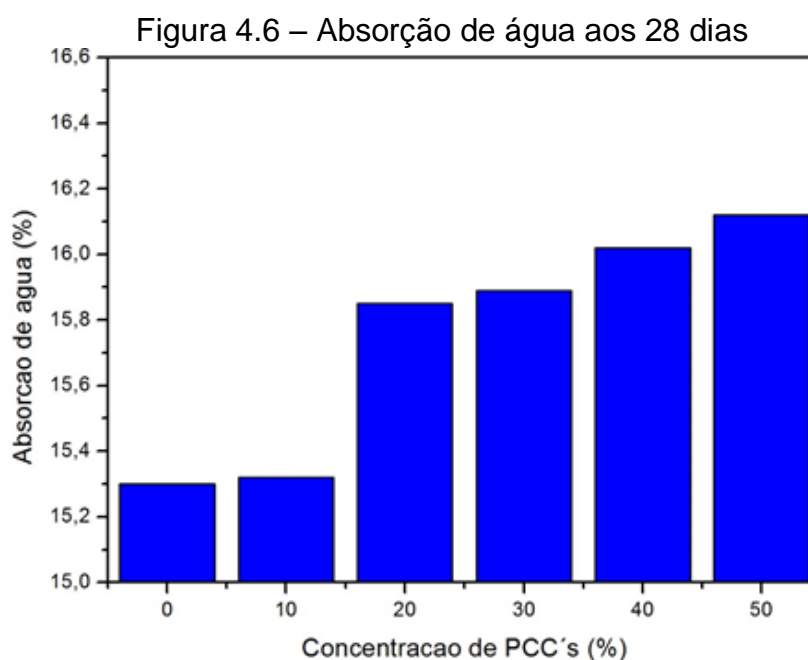
Fonte: NBR 13281(ABNT, 1995)

De acordo com Silva (2006), os revestimentos de argamassa estão mais associados à resistência à tração na flexão do que a resistência à compressão. Diante disso, a baixa resistência à tração na flexão não permite ao revestimento suportar os esforços de tensões, provocando assim as patologias nos revestimentos.

#### 4.2.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os procedimentos utilizados neste ensaio foram os descritos pela NBR 9778 (1987) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

Este ensaio foi executado em amostras nas quais os procedimentos e os resultados encontrados serviram de base para a definição da absorção, o índice de vazios e a massa específica no estado endurecido. A Figura 4.6 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água, realizada nos corpos-de-prova aos 28 dias.

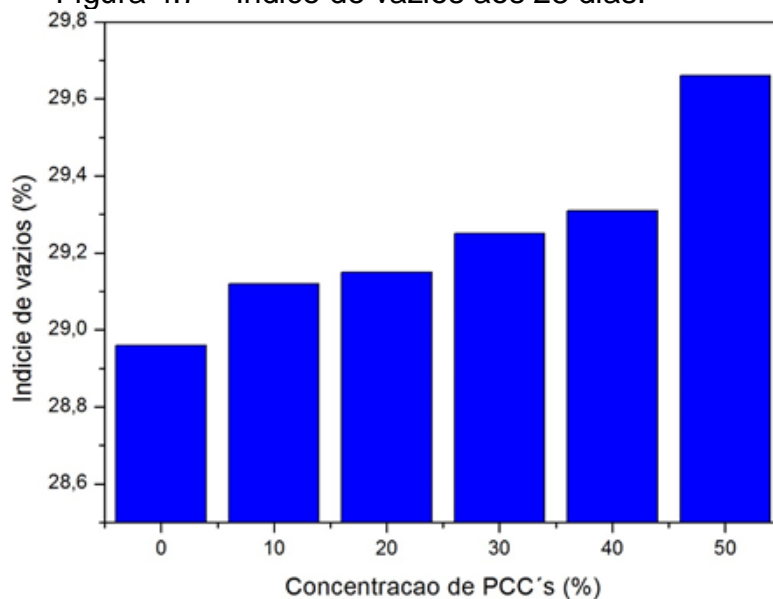


Ao observar a figura percebe-se que a absorção por imersão das argamassas aumentou com substituição do cimento Portland pelos produtos da combustão do carvão mineral, confirmando os resultados encontrados por Lenzi (2001). A maior absorção pode ser atribuída ao maior teor de finos devido ao aumento no teor dos PCCs nas argamassas.

Segundo Scandolaro (2010), o acréscimo na absorção de água quando aumentada a relação água/aglomerantes é um dos fatores que influenciam esta propriedade sobre os materiais cimentícios. Devido ao excesso de água presente na argamassa, a quantidade que não reagiu para a formação dos hidratos será expelida, formando vazios na matriz de cimento endurecida.

Os resultados de absorção por imersão obtidos apresentaram uma boa correlação com o índice de vazios no estado endurecido (Figura 4.7), como já era de se esperar. A água absorvida irá preencher os poros permeáveis existentes nas argamassas endurecidas. Desta forma, a argamassa que possuir um elevado índice de vazios consequentemente terá uma elevada absorção.

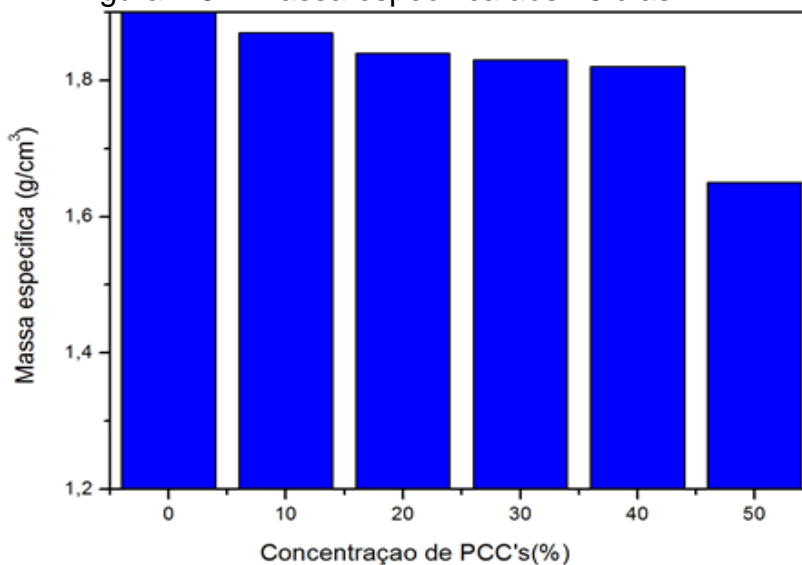
Figura 4.7 – Índice de vazios aos 28 dias.



A argamassa de referência apresentou a menor porosidade, fato este ligado à menor quantidade de finos quando comparada aos demais traços.

O valor da massa específica da argamassa é um indicativo da compacidade obtida na mistura agregado e aglomerante. A figura 4.8 apresenta o gráfico com os valores das massas específicas para cada argamassa.

Figura 4.8 – Massa específica aos 28 dias.



Os valores da massa específica apresentam um decréscimo com a incorporação dos produtos da combustão do carvão mineral, que é justificada pela

diferença existente entre os valores das massas específicas dos materiais utilizados. Com isso, o acréscimo de PCCs nas argamassas contribui para o aumento do índice de vazios e conseqüentemente o aumento no teor de absorção.

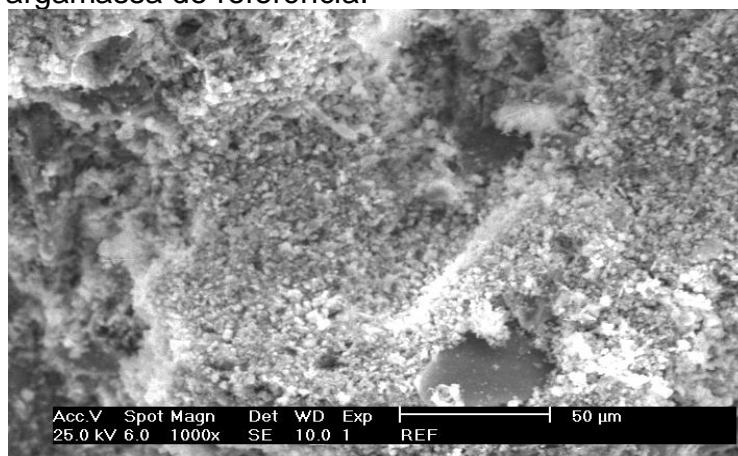
#### 4.2.2.3 Análise microestrutural

A seguir, são apresentadas as micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura das argamassas de referência e com adição de 10% e 50% de PCCs. Com isso, é possível observar alguns aspectos da interface entre o agregado e a matriz de pasta ou cimento e presença de poros de grandes diâmetros. Também são mostrados dados de composição qualitativa e informações sobre a composição química em regiões das amostras obtidos por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

Através da análise por MEV das argamassas verificou-se que a substituição parcial do cimento pelo produto da combustão do carvão mineral influencia na microestrutura das mesmas. A análise espectroscópica realizada na área central identificou os diferentes elementos presentes nas argamassas.

A Figura 4.9 apresenta imagem obtida por MEV da superfície fraturada da argamassa de referência, onde se observa a pouca formação de poros. Observa-se também a presença de quartzo, matriz de cimento e a formação da portlandita.

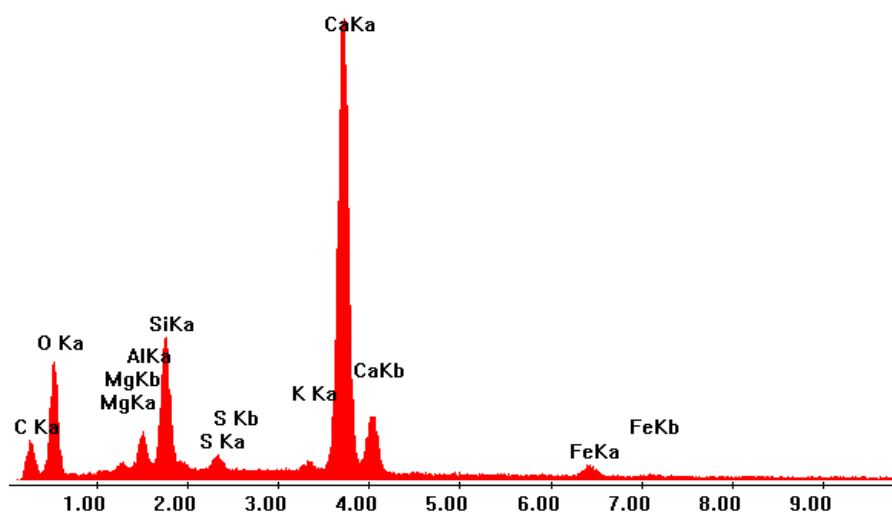
Figura 4.9 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa de referência.



O espectro de análise EDS apresentado no Figura 4.10 apresenta a concentração dos elementos químicos encontrados na região central da Figura 4.9,

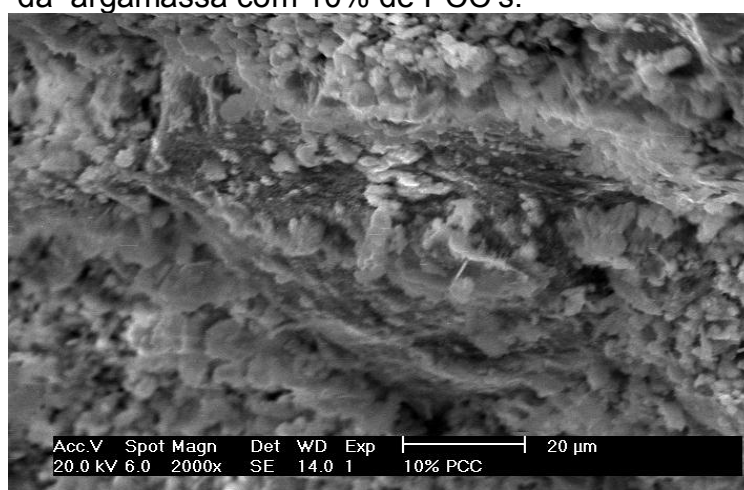
detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, alumínio, potássio, carbono, ferro, enxofre, oxigênio e magnésio, sendo o cálcio em maior concentração, fato ligado possivelmente à formação da portlandita.

Figura 4.10– Análise espectroscópica da argamassa de referência.



A Figura 4.11 Apresenta a imagem obtida por MEV da argamassa com adição de 10% de PCCs em relação ao cimento. Pode-se verificar que há uma melhor homogeneização na mistura e pouca presença de poros. Na Figura 4.13 encontra-se a análise espectroscópica realizada na área central da figura 4.12.

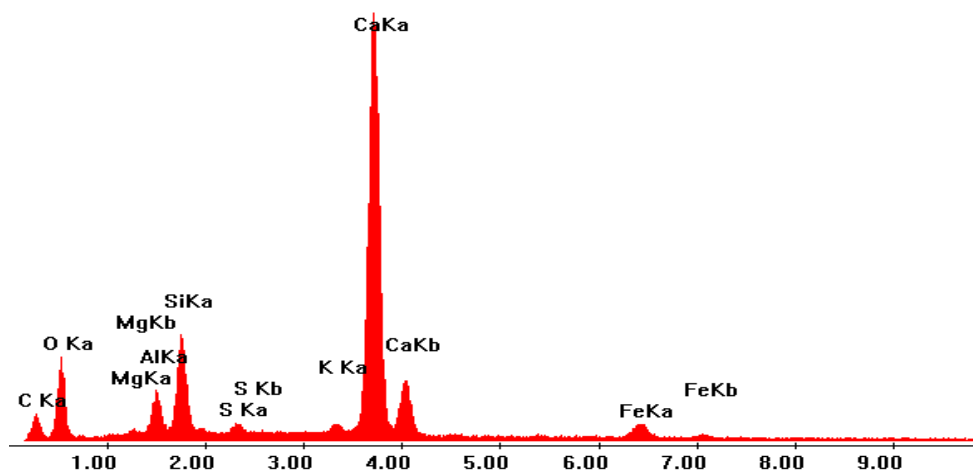
Figura 4.11 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com 10% de PCC's.



O espectro da análise EDS apresentado na Figura 4.12 apresenta a concentração dos elementos químicos encontrados na região da Figura 4.11, da

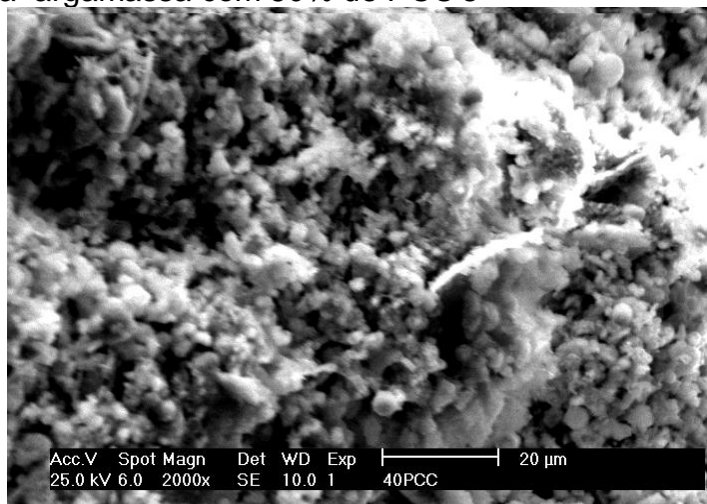
argamassa com adição de 10% de PCCs, detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, carbono, ferro, oxigênio, magnésio e potássio. O cálcio e o silício estão presentes em maior concentração, fato ligado, possivelmente à formação do silicato de cálcio hidratado.

Figura 4.12 – Análise espectroscópica da argamassa com 10% de PCC's



A Figura 4.13 apresenta a imagem obtida por MEV da argamassa com adição 40% de PCCs em relação ao cimento. A formação de poros é maior quando comparado com a argamassa de referência e com adição de 10% de PCCs devido à maior quantidade de resíduo adicionado.

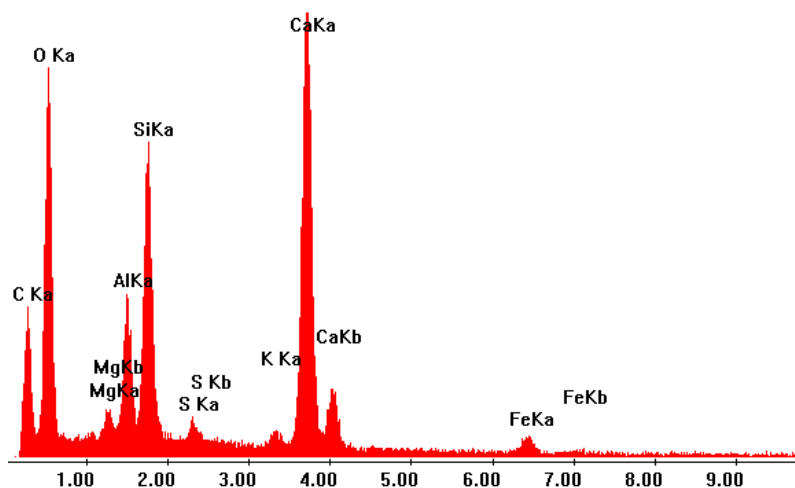
Figura 4.13 – Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com 50% de PCC's





O espectro da análise EDS mostrado na Figura 4.14 apresenta a concentração dos elementos químicos encontrados na região central da Figura 4.13 (argamassa com adição de 50% do produto da combustão do carvão mineral), detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, alumínio, ferro, potássio, magnésio, silício, oxigênio, carbono, enxofre, sendo cálcio e silício em maior concentração devido à formação do silicato de cálcio hidratado.

Figura 4.14– Análise espectroscópica da argamassa com 50% de PCC's



A análise microestrutural das argamassas constatou que a substituição parcial do cimento por percentuais de produtos da combustão do carvão mineral, influencia na microestrutura das mesmas. No entanto, as argamassas produzidas com adição de 10% de PCCs apresentaram microestrutura mais densa que as produzidas com 50%.

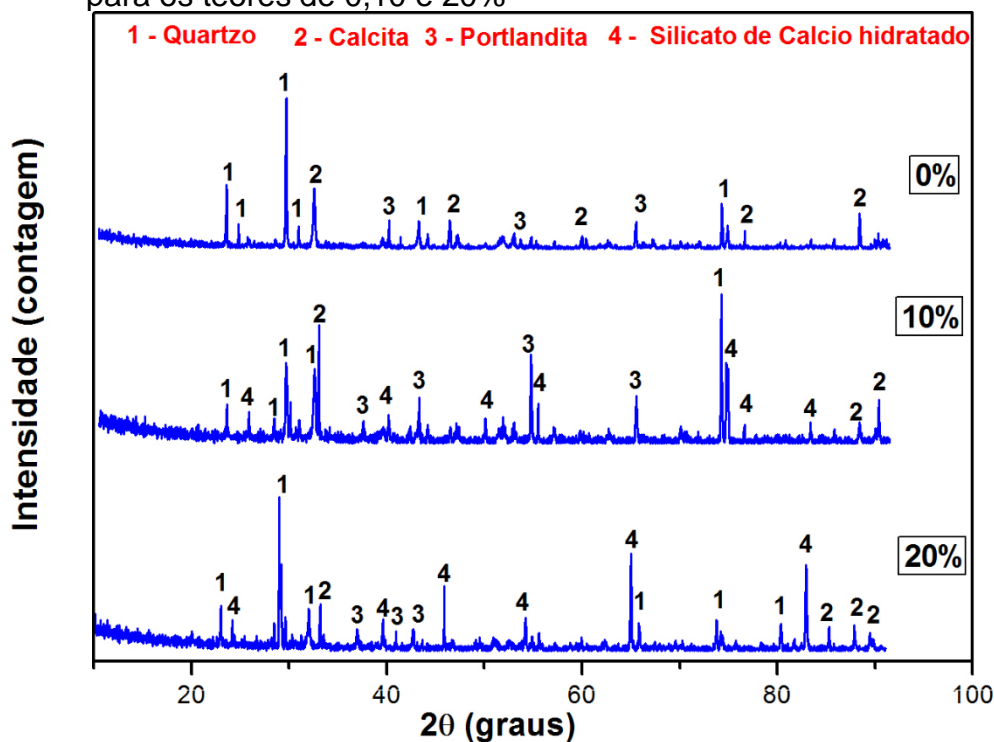
#### 4.2.2.4 Difração de Raios X

Foi realizada a análise das fases cristalográficas das argamassas produzidas, através da difração de raios X. Esta análise mostra uma redução das fases principais do cimento (silicatos e aluminatos) com o aumento no teor dos produtos da combustão do carvão mineral, devido ao aumento do teor de sílica livre. Isto influenciou na diminuição das propriedades mecânicas das argamassas, o que esclarece a queda na resistência à medida que aumenta o teor de PCC's.

As análises de difração de raios X indicaram que as fases cristalinas observadas nas amostras são similares às presentes nas matérias-primas empregadas na formulação das argamassas, havendo uma predominância do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Observando-se as Figuras 4.15 e 4.16, percebe-se que, para a argamassa de referência foi identificado um pico relevante de Portlandita(CH) que é o produto da reação do cimento com água e predominância de picos de quartzo e calcita.

Figura 4.15 – Comparação dos difratogramas de raios X para os teores de 0,10 e 20%

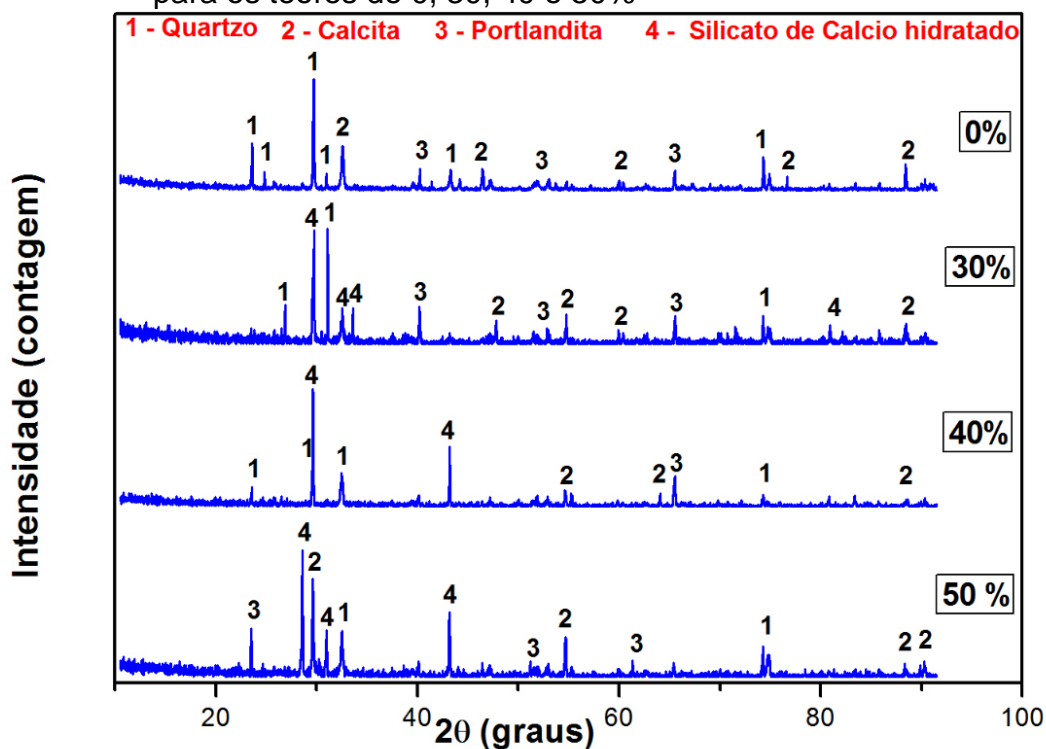


As argamassas com adições de 10% e 20% dos produtos da combustão do carvão mineral apresentaram picos de silicato de cálcio hidratado, decorrentes das reações entre a sílica ativa presente no material pozolânico(PCC's) e hidróxido de cálcio (Portlandita).

Coerentemente com as adições de 30, 40 e 50% de PCCs, observa-se a presença de picos de silicato de cálcio hidratado bem mais evidentes e redução da

Portlandita (CH) evidenciada pela combinação com os PCC's e por haver menores quantidades de cimento na mistura.

Figura 4.16 – Comparação dos difratogramas de raios X para os teores de 0, 30, 40 e 50%



De um modo geral, observa-se que as argamassas contendo os produtos da combustão do carvão mineral apresentam picos menores de hidróxido de cálcio (CH) e picos maiores de silicato de cálcio hidratado (CSH) em relação a argamassa de referência, isso se dá pelo fato de que as reações pozolânicas é feita com a combinação da sílica ativa presente nos PCC's e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação dos silicatos do cimento.

## 5 CONCLUSÕES

A análise química dos produtos da combustão do carvão por difração de raios-X demonstrou a cristalinidade desse material. Elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  conferem aos PCCs um grande potencial de aplicação como matéria-prima para a produção de argamassas.

De acordo com a norma NBR 5752 (ABNT,1992), os produtos da combustão do carvão mineral utilizados neste trabalho apresentam valor de índice de pozolanicidade maior que o mínimo estabelecido (75%), caracterizando esse material como pozolânico, podendo ser considerado adequado para uso como aglomerante na produção de argamassas.

As argamassas produzidas com adição dos PCCs apresentaram desempenho inferior ao da argamassa de referência em relação às propriedades de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Observa-se um pequeno aumento na resistência mecânica com o tempo. O aumento do teor dos produtos da combustão do carvão mineral na mistura é proporcional à redução na resistência, tanto à tração quanto à compressão dos corpos-de-prova.

Apesar da diminuição da resistência, os resultados demonstram a viabilidade da substituição de cimento pelos produtos da combustão do carvão mineral na produção de argamassas. De acordo com a norma NBR 13281, os resultados obtidos permitem classificar as argamassas obtidas como do Tipo I. É conveniente ressaltar que a argamassa de referência também foi classificada como do Tipo II aos 7 dias. Esses resultados estão de acordo com outros publicados na literatura, onde foram utilizadas cinzas volantes na produção de argamassas.

As análises realizadas mostram que a tendência dos valores de resistência à compressão é aumentar conforme o avanço do tempo de cura, o que acontece devido às reações pozolânicas, que ocorrem pelo alto teor de sílica livre

nas partículas dos PCCs, que reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido pelas reações de hidratação do cimento.

Em relação à absorção de água e índice de vazios, observou-se um crescimento com adição dos produtos da combustão do carvão mineral. Já a massa específica aparente mostrou uma queda com a adição dos PCCs, devido ao efeito da incorporação de finos.

Os resultados das análises de difração de raios-X mostram que, em relação à argamassa de referência, as argamassas elaboradas com PCCs apresentam picos menores de hidróxido de cálcio (Portlandita) e picos maiores de silicato de cálcio hidratado à medida que se aumenta o teor de PCCs. Isso se dá porque o desenvolvimento das pozolanas é facilitado pelo elevado teor de sílica dos PCCs que possibilita a reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação com cimento.

De um modo geral, as análises realizadas mostram que a produção de argamassa contendo os produtos da combustão do carvão mineral é promissora e sustentável devido à utilização de um material abundante e de baixo custo.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo mais aprofundado sobre a caracterização dos PCCs;
- Variar a granulometria do agregado;
- Estudar o efeito dos diferentes tipos de cura nas propriedades e durabilidades da argamassa com o resíduo;
- Avaliar a resistência de aderência à tração das argamassas com os PCC's;
- Avaliar a influencia de aditivos em substituição da cal nas propriedades das argamassas com o resíduo;
- Avaliar a resistência mecânica das argamassa com diferentes idades.

## REFERÊNCIAS

### ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

\_\_\_\_\_, NBR NM 30: Determinação da absorção de água dos agregados miúdos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, NBR NM 45: Determinação da massa unitária dos agregados. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_, NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, NBR 6220: Determinação da massa específica aparente, massa específica aparente da parte sólida, absorção de água, porosidade aparente e total. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_, NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_, NBR 7200: Revestimentos de paredes e tetos com argamassas. Materiais, preparo, aplicação e manutenção – Procedimento. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_, NBR 7211: Agregado para o concreto e argamassa. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_, NBR 7219: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, NBR 9206: Cal hidratada para argamassas – Determinação da plasticidade. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_, NBR 10004: Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_, NBR 11578: Cimento Portland comum: Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_, 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, 2005.

\_\_\_\_\_, NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_, NBR 13281: Argamassa para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_, NBR 13258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ALBUQUERQUE, A. S. “**Agregados**”. In: BAUER, L.A.F. materiais de construção. 4ª ed.: Livros Técnicos e Científicos. v.1. p.63- 120. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

AZEVEDO, A. F. F L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal. 2002.

BAUER, e.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES. E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. ANTAC, p. 95-105, 2005.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza de casca de arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PR, 2010.

BAÍA, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1 ed. P. 82. São Paulo, 2000.

BRASIL, *MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA*. **Balanço Energético Nacional**, Brasília, 1999.

CALARGE, L.M., SILVA, N.I.W., CHIES, F., ZWOSNOK, O. **Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada - Caracterização de cinza pesada**. In: Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Certificação Ambiental. EDIPUCRS, v. 1, p.130-139, Porto Alegre,2000.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências de Materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte. 2005. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>. Acesso em 20 de agosto de 2012.



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: ANTAC, p. 83-94, 2005.

CINCOTTO, M. A E KAUPATEZ, R. M. Z. **Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica.** Tecnologia de edificações. São Paulo: IPT-PINI, P. 26-27. 1988.

COIMBRA, M. A., SANTOS, W. N., MORELLI, M. R., **Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil.** Cerâmica vol. 48, p. 306, 2002.

COPELMI - Mineração Ltda. Disponível em <http://www.copelmi.com.br/>. Acesso em 16 de setembro de 2012.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciência e Tecnologia. Campos dos Goytacazes, 2001.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 237.

EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANIZATION – EMO. History. Disponível em: <http://www.euromortar.com>. Acesso em 10 agosto 2012.

FERRET, L.S. **Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso.** Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FUNGARO, D.A., IZIDORO, J.C. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão.** Quím. Nova, v. 29, n. 4, p. 735-740, 2006.

GARCIA, T. L., NAVES, V. C., ALVES, J. ., BARROS, B. C., RODRIGUES, C. S. G., PEREIRA, E. A. A., ATAÍDES, R. L. A. **Substituição de parte do cimento por finos inertes de pedra em concretos com baixo fator a/c.** IV Seminário de Iniciação Científica. Curso de Engenharia Agrícola. Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, Goiânia, 2006.

GERBER, Wagner. **Impacto ambiental: resíduos sólidos e reciclagem.** Pelotas: UCPEL, p. 40. 1999.

GOETHE, C.A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS.** Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral. Anais. Florianópolis, Santa Catarina, 1990.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal. Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2002.

HAMLEY, P. **The removal of carbon from fly ash using supercritical water oxidation.** In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

JOHN, V.M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V. São Paulo: Anais, p.47-62. 2003.

KOPPSCHITZ, P.; FRANCINETE, JR.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Estudo da retratação e do desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas para revestimento.** In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas. P. 120 – 132, Salvador, 1997.

LARA, D.; NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, E. **Dosagem das argamassas.** In: Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. ANTAC, p. 63-72, Goiânia,1995.

LENZI, E. J. **Influência do Uso de Cinzas da Combustão de Carvão Mineral em Argamassas de Revestimento.** Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A.; CAMPOS, M. F. **Pozolanicidade e resistência mecânica de argamassas confeccionadas com cinza da casca da castanha de caju.** Revista Minerva, v. 5, p. 249-256, 2008.

MARGON, P. V., **Influência do uso de cinzas de carvão mineral de termoelétricas em argamassas de revestimentos: dosagem por curvas granulométricas,** Dissertação. Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, SC 2002.

MARTINS, J.L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de minas e Metalúrgica- universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MATTOS, L. R. S.; DAL MOLIN, D. C. C. **Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA (Brasil): estudo do comportamento no estado fresco.** Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre – RS, 2002.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan.** In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 427p,1987.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimento de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 172 p. São Paulo, 2000.

MUSTELIER, N. L. **Avaliação do desempenho de blocos e argamassas com cinzas de carvão mineral incorporada para aproveitamento em conjuntos habitacionais.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MULLER, A.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R. **Propriedades físicas e mecânicas de argamassas de assentamento com adições minerais e orgânicas.** In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. Vol. 1. P. 309-322. UEFES/PPGEC, Vitória, 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**; 2º Ed. São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

OZDEMIR, O., ERSOY, B., CELIK, M.S. **Separation of pozzolonic materials from lignitic fly ash of Tuncbilek Power Station.** In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

PEZENTE, J. H. **Cal nas argamassas.** <<http://www.escolher-econstruir.eng.br>> (Acesso: 19/01/2013).

POON, C. S., WONG Y. L., LAM, L. **The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars.** Construction and Building Materials, Vol. 11. Great Britain, p.383-393, 1997.

POZZOBON, C. E. **Aplicações tecnológicas para cinza do carvão mineral produzida no complexo Termelétrico Jorge Lacerda.** Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999)

**PORTAL SÃO FRANCISCO – MEIO AMBIENTE – FONTE DE ENERGIA. CARVÃO MINERAL (ON LINE).** Disponível em:  
<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/carvao-mineral/carvao-mineral-9.php>.  
Acesso em 16 de Setembro de 2012.

PRUDENCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Cinzas da casca de arroz. Coletânea Habitar: Utilização de resíduos na construção civil.** Programa de Tecnologia de Habitacao, vol. 4, pg. 242-246, Porto Alegre – RS: ANTAC, 2003.

Raysman, V.L. Technology for chemical-metallurgical coal ash utilization. Energy and Fuels, v. 11, p. 761-773, 1997.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D. S., STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG.2002.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão Fóssil no Brasil. Aspectos técnicos e Ambientais**. V.I, CIENTEC, Porto Alegre, 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.

ROMAN, H. **Argamassas de assentamento para alvenarias**. In: III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. P. 11-116, Florianópolis, 1991.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenarias resistentes**. Boletim IPT, p. 26, São Paulo, 1986.

SABEDOT, S., SUNDSTRON, M. G., BÖER, S. C, SAMPAIO, C. H., DIAS, R. G. O., RAMOS, C. G.; **Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Gramado. Rio Grande do sul: UFRGS, 2011.

SÁNCHEZ, J. A.; BARRIOS, J.; BARRIOS, A.; AGUDO, A. R. A. La retracción em los morteros de cal. *Materiales de construcción*. Vol. 47. N. 245.1997.

SANTOS, F. I. G. **Avaliação das propriedades hidrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis. 2006.

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

SELMO, S.M.S. **Prevenção de patologia em revestimentos externos de argamassa dos edifícios: a importância dos serviços de manutenção**. IN: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, Porto Alegre, 1989. Anais. Porto Alegre, UFRGS, 1989. p.195-212.

SIQUEIRA, J. S., SOUZA, C. A. G., SOUZA, J. A. S., **Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas**. *Cerâmica* vol. 58, p. 275-279, 2012.

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2006.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R. L.; AKASAKI, J. L. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada**. XXXI Jornada Sud-americanas de Ingenieria Estructural, Mendoza, Argentina, 2004.

TIBONI, R. A **Utilização da Cinza da Casca de Arroz de Termoelétrica como Componente do Aglomerante de Compósitos à Base de Cimento Portland**. Dissertacao de mestrado. Universidade de Sao Paulo. Sao Carlos – SP, 2007.

TSUCHIAI, H. **High active absorbent for SO<sub>2</sub> removal prepared from coal ash**. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 34, p. 1404-1411, 1995.

VILCHES, L.F. **Development of new fire-proof products made from coal fly ash: the Cefyr Project**. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v. 77, p. 361-366, 2002.