

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS  
PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Weyne Almeida de Melo Castro**

Campina Grande - PB  
Março/2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E**  
**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS**  
**PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Weyne Almeida de Melo Castro

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia  
de Materiais como requisito parcial à  
obtenção do título de MESTRE EM  
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Co-Orientador: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Agência Financiadora: CNPq – Proc. 409858 / 2006-4.

Campina Grande - PB

Março/2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C355i

2008 Castro, Weyne Almeida de Melo.

Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil / Weyne Almeida de Melo Castro. — Campina Grande, 2008.

89f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Gelmires de Araújo Neves, Heber Carlos Ferreira.

1. Atividade Pozolânica. 2. Argamassa. 3. Resíduo de Caulim. 4. Construção Civil. I. Título.

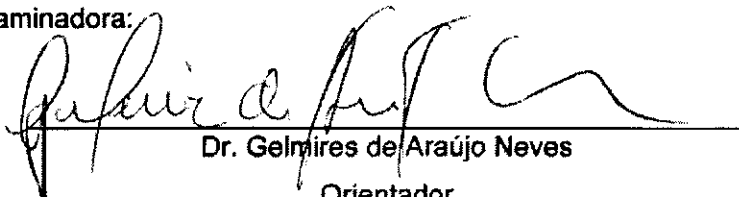
CDU – 666.95(043)

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS PARA USO  
NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Weyne Almeida de Melo Castro**

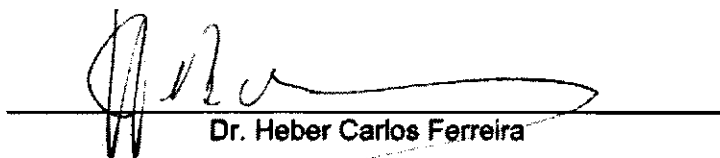
Dissertação aprovada em 25 de março de 2008, pela banca examinadora  
constituída dos seguintes membros:

Banca Examinadora:

  
Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador

UAEMa- UFCG

  
Dr. Heber Carlos Ferreira

Co-Orientador

UAEMa - UFCG

  
Dr. Lisiane Navarro de Lima Santana

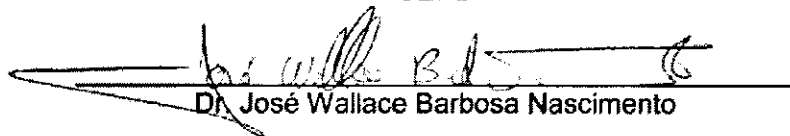
Examinador Interno

UAEMa - UFCG

  
Dr. Antonio Augusto Pereira de Souza

Examinador Externo

UEPB

  
Dr. José Wallace Barbosa Nascimento

Examinador Externo

UFCG

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho ao meu querido esposo, Sidcley Ferreira Castro, cujo incentivo, apoio, compreensão e companheirismo foram fundamentais para esta realização.*

## **VITAE DO CANDIDATO**

- Engenheiro de Civil pela UFCG (2004).
- Especialização em Engenharia de Produção pela UFCG (2006).

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela oportunidade de alcançar mais esta importante conquista em minha vida, e por me abençoar no desenvolvimento de todas as atividades do curso de mestrado.

Agradeço sinceramente a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho. De maneira particular, expresso minha gratidão ao meu esposo Sidcley Castro que foi o meu maior incentivador para este feito.

Agradeço aos meus pais Nivaldo e Fatima pelo suporte a mais uma conquista em minha vida e aos meus irmãos Shirley, Helmut e Júnior. Sem minha família, meu caminho até aqui não seria possível.

Ao meu orientador e amigo, Professor Gelmires de Araújo Neves, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis e pela orientação neste trabalho científico.

Ao Professor Heber Ferreira, co-orientador, pela parceria e colaboração na elaboração do meu trabalho.

A Indústria Caulisa por ceder o resíduo, objeto da minha pesquisa. E ao CNPq, financiadora deste trabalho.

A UFCG pelo apoio estrutural na realização dos ensaios e pesquisas. As alunas de pós-graduação da UFCG, Jozilene de Souza e Izabelle Marrie Trindade Bezerra, e funcionários dos laboratórios, pelo empenho no decorrer da realização dos ensaios e colaboração na coleta dos dados para o presente estudo.

A EMBASA por me dar condições de concluir a pesquisa, e a todos os colegas de trabalho que me ajudaram na fase da dissertação e ensaios finais.

Agradeço aos meus amigos, Marcia, Aline, Elaine, Ana Carla, Glória, Jussara, Verônica e Gilney pela paciência e companheirismo ao longo desses últimos dois anos. Em especial ao meu amigo e padrinho René Paz, pela troca de experiências e convívio fraterno neste período importante da minha vida.

Muito Obrigada.

# INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

## RESUMO

As indústrias de mineração geram a cada ano uma enorme quantidade de resíduos sólidos, principalmente as empresas de beneficiamento de caulim primário. Os resíduos de caulim gerados são descartados indiscriminadamente sobre vegetação, próximo a corpos d' água e em margens de estradas, provocando impactos ao meio ambiente e prejudicando a qualidade de vida da população, que vive no entorno das indústrias. Por esta razão, governantes, empresários, ambientalistas e a comunidade em geral estão preocupados com a grande poluição e impacto ambiental causado por estes resíduos. Este trabalho tem como objetivo estudar a incorporação dos resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e ambiental, tais como: análise granulométrica por difração a laser, análise química, difração de raios X, análise térmica diferencial e gravimétrica, solubilização e lixiviação de acordo com as normas da ABNT. Para os ensaios tecnológicos foram estudados os índices de atividade pozolânica dos resíduos no estado natural e calcinados na temperatura de 600°C durante o período de duas horas. Os traços para argamassas de assentamento e revestimento foram incorporados com 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo de caulim com e sem calcinação, em substituição à parte do cimento. Os resultados obtidos mostraram que os resíduos calcinados apresentaram elevada atividade pozolânica e resistência a compressão simples. Os resíduos sem calcinação incorporados até 10% nos traços das argamassas, apresentaram comportamento mecânicos dentro das normas da ABNT, e por fim concluímos que existe viabilidade técnica da utilização do resíduo para o uso na construção civil em argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Caracterização, atividade pozolânica, resíduo de caulim, argamassa.



# INCORPORATION OF KAOLIN RESIDUES IN MORTARS FOR USE IN THE CIVIL CONSTRUCTION

## ABSTRACT

The mining industries generate to each year an enormous amount of solid residues, mainly the companies of primary kaolin improvement. The generated kaolin residues are discarded indiscriminately on vegetation, next the bodies to water and in edges of roads, provoking impacts to the environment and harming the quality of life of the population, that lives in around of the industries. By this reason, governing, entrepreneurs, ambientalists and the community in general are worried about the great pollution and ambient impact caused by these residues. This work has as objective to study incorporation of the kaolin residues in mortars for use in civil construction. In this research assays of physical, chemical, mineralogical and ambient characterization had been carried through, such as: granulometric analysis by laser diffraction, chemical analysis, X-ray diffraction, thermogravimetrie and thermodifferential analysis, solubilize and leaching in accordance with the norms of the ABNT. For the technological assays the indices of pozzolanic activity of the residues in the natural state and calcined in the temperature of 600°C during the period of two hours had been studied. The traces for mortars of nesting and covering had been incorporated with 5%, 10%, 15% and 20% of kaolin residue with and without calcination, in substitution to the part of the cement. The gotten results had shown that the calcined residues had presented high pozzolanic activity and resistance the simple compression. The residues without calcination incorporated up to 10% in the traces of mortars, had inside presented behavior mechanical of the norms of the ABNT, and finally we conclude that viability exists technique of the use for residue for the use in the civil construction in mortars of nesting and covering of masonry.

**PALAVRAS-CHAVE:** Characterization, pozzolanic activity, kaolin residue, mortar.

## **PUBLICAÇÕES**

Artigos Submetidos à Publicação:

- MELO, W. A. de; ROCHA, A. K. A. da; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. Argamassas Mistas para Alvenaria Utilizando Resíduo de Caulim - Parte I: Comportamento Mecânico, Revista Escola de Minas, 2008.

- MELO, W. A. de; ROCHA, A. K. A. da; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C; FERREIRA, H. S. Viabilidade e atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria, AGRIAMBI – Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2008.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
PUBLICAÇÕES .....	iv
SUMÁRIO.....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xi
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Justificativa .....	15
1.2 Objetivos .....	16
1.2.1 Objetivo Geral .....	16
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 Materiais Pozolânicos.....	18
2.1.1 Pozolana .....	18
2.1.2 Classificação .....	20
2.1.3 Composição Química .....	22
2.1.4 Atividade Pozolânica .....	23
2.1.5 Vantagens do Uso da Pozolana .....	24
2.1.6 Pozolana como Material de Substituição Parcial do Cimento .....	25
2.2 Caulim .....	27

2.2.1 Reservas de Caulim .....	30
2.2.2 Produção de Caulim .....	32
2.2.3 Beneficiamento de Caulim.....	33
2.2.3.1 Decantação .....	34
2.2.3.2 Filtração.....	37
2.2.3.3 Secagem e Moagem .....	38
2.2.4 Impactos Gerados pelo Resíduo de Caulim .....	39
2.3 Argamassa .....	46
2.3.1 Definição .....	46
2.3.2 Argamassas Utilizando Resíduos.....	48
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
3.1 Materiais.....	51
3.2 Métodos.....	52
3.2.1 Caracterização Físico-mineralógica .....	52
3.2.2 Caracterização Ambiental .....	54
3.2.3 Ensaio Tecnológicos.....	55
3.2.3.1 Atividade Pozolânica .....	55
3.2.3.2 Preparação das Argamassas .....	56
3.2.3.3 Moldagem dos Corpos de Prova .....	56
3.2.3.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	57
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
4.1 Caracterização Física.....	58
4.2 Caracterização Químico-mineralógica .....	59

4.3 Caracterização Ambiental .....	63
4.4 Atividade Pozolânica .....	65
4.5 Resistência à Compressão Simples .....	66
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1 Conclusões Parciais .....	79
5.2 Conclusões Finais .....	80
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>81</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto à origem....	22
Tabela 2.2 – Composição química da pozolana.....	23
Tabela 2.3 – Reservas de caulim – 2005.....	31
Tabela 3.1 – Traços para argamassas alternativas, recomendadas pela CIGRA, feitos a partir de traços para argamassas convencionais.....	56
Tabela 4.1 – Composição química dos resíduos.....	59
Tabela 4.2 – Comparação das características físicas e químicas dos materiais produzidos, com as exigências normativas.....	60
Tabela 4.3 – Análise do extrato lixiviado.....	63
Tabela 4.4 – Análise do extrato solubilizado.....	63
Tabela 4.5 – Resultados adicionais da caracterização ambiental.....	64
Tabela 4.6 – Índice de atividade pozolânica com cal.....	65
Tabela 4.7 – Índice de atividade pozolânica com cimento.....	65
Tabela 4.8 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, para o traço 1:4:28, em estado natural, utilizados em assentamento de tijolos de alvenaria.....	67
Tabela 4.9 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, em estado natural, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria.....	68
Tabela 4.10 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF calcinados na temperatura de 600 °C, para o traço 1:4:28 utilizados em assentamento de tijolos de alvenaria.....	71
Tabela 4.11 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, calcinados na temperatura de 600 °C, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria.....	72
Tabela 4.12 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com 50%RCG + 50%RCF, com e sem calcinação, para o traço 1:4:28 de assentamento de tijolos de alvenaria.....	74
Tabela 4.13 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com 50%RCG + 50%RCF, com e sem calcinação, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caulim bruto oriundo da jazida (a), processo de lavagem do caulim bruto (b) e (c), separação do resíduo grosso de caulim.....	35
Figura 2.2 – Vista externa do coberto de peneiramento de caulim – peneira ABNT nº. 200 - 0,074mm (a) e vista interna do caulim sendo beneficiado.....	35
Figura 2.3 – Resíduo fino de caulim (borra) que fica retido na peneira ABNT nº. 200, acumulado nas proximidades das indústrias de beneficiamento (a) e (b).....	36
Figura 2.4 – Tanques de decantação do caulim.....	36
Figura 2.5 – Etapa do processo de beneficiamento onde o caulim é bombeado para o filtro-prensa.....	37
Figura 2.6 – Caulim sendo passado no filtro-prensa (a) e (b), retirada dos blocos de caulim (c) e empilhamento para secagem (d) .....	38
Figura 2.7a – Secagem natural do caulim.....	38
Figura 2.7b – Secagem do caulim através de forno.....	38
Figura 2.8 – Moagem do caulim destorroado (a) e ensacamento do caulim (b) .....	39
Figura 2.9 – Estocagem do caulim beneficiado – em sacos de 20 kg (a) e em “big bag” (b).....	39
Figura 2.10 – Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim.....	41
Figura 2.11 – Local de coleta (a) e depósito dos resíduos de caulim (b).....	43
Figura 2.12 – Resíduos de caulim depositados sobre vegetação, próximos a corpos d’água e às margens de estradas.....	44
Figura 2.13 – Classificação das argamassas.....	47
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.....	53
Figura 3.2 – Ilustração representando as proporções das matérias-primas na preparação dos corpos de prova.....	57
Figura 3.3 – Prensa dos corpos de prova de argamassa.....	57
Figura 4.1 – Distribuição do tamanho de partículas do resíduo grosso de caulim (RCG).....	58
Figura 4.2 – Distribuição do tamanho de partículas do resíduo fino de caulim (RCF).....	58

Figura 4.3 – Padrão de difração de raios X dos resíduos de caulim em estado natural.....	60
Figura 4.4 – Padrão de difração de raios X dos resíduos de caulim calcinados.....	61
Figura 4.5 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo grosso de caulim.....	62
Figura 4.6 – Análises térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo fino de caulim.....	62
Figura 4.7 – Resistências à compressão simples dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, em estado natural, para o traço 1:4:28 de assentamento de tijolos de alvenaria.....	68
Figura 4.8 – Resistências à compressão simples dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, em estado natural, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91d.....	69
Figura 4.9 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, calcinados na temperatura de 600°C, para o traço 1:4:28 de assentamento de tijolos de alvenaria.....	71
Figura 4.10 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, calcinados na temperatura de 600°C, para o traço 1:2:9 de reboco de alvenaria.....	73
Figura 4.11 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com 50%RCG + 50%RCF com e sem calcinação, para o traço 1:4:28 de argamassa de alvenaria.....	75
Figura 4.12 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com 50%RCG + 50%RCF com e sem calcinação, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria.....	77



## SÍMBOLOS E ABREVIações

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
$Al_2O_3$	- Óxido de Alumínio
ASTM	- American Society for testing and Materials
ATD	- Análise Termodiferencial
ATG	- Análise Termogravimétrica
CADAM	- Indústria de Caulim da Amazônia Ltda.
CaO	- Óxido de Cálcio
$C_2S$	- Silicato Dicálcico
$C_3A$	- Aluminato Tricálcico
$C_2S$	- Silicato Tricálcico
$C_4AF$	- Ferro Aluminato Tetracálcico
$Ca(OH)_2$	- Hidróxido de Cálcio
CAULISA	- Caulisa Indústria SA
CCT	- Centro de Ciências e Tecnologia
CIGRA	- Cia. Industrial Gramame
COPANT	- Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas
CP	- Cimento Portland
CPH-F	- Cimento Portland Composto com Filler
DRX	- Difração de Raios - X
$D_{10}$	- 10% do Volume com Partículas de Diâmetro
$D_{50}$	- 50% do Volume com Partículas de Diâmetro
$D_{90}$	- 90% do Volume com Partículas de Diâmetro
EIA	- Estudos de Impactos Ambientais
$Fe_2O_3$	- Óxido de Ferro
IAP	- Índice de Atividade Pozolânica
IRCC	- Imerys Rio Capim Caulim
IS	- Indian Standards Institution
ISO	- International Standards Organization
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
$K_2O$	- Óxido de Potássio
MPa	- Mega Pascal
MgO	- Óxido de Magnésio

$\mu\text{m}$	- Micrômetro
$\text{Na}_2\text{O}$	- Óxido de Sódio
NASSAU	- Companhia de Cimento Nassau
NBR	- Norma Brasileira Registrada
PPSA	- Pará Pigmentos S/A
RBC	- Resíduo de Beneficiamento de Caulim
RCF	- Resíduo Fino de Caulim
RCG	- Resíduo Grosso de Caulim
RCS	- Resistência à Compressão Simples
RIMA	- Relatório de Impactos Ambientais
$\text{SiO}_2$	- Sílica
$\text{TiO}_2$	- Óxido de Titânio
UFMG	- Universidade Federal de Campina Grande
USEPA	- Agência Americana de Proteção Ambiental

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

O caulim é uma argila constituída, por caulinita e/ou haloisita. Geologicamente existem dois tipos de caulim: a) caulim residual, quando é encontrado no local em que se formaram pela ação de intemperismo ou hidrotermal, esse caulim geralmente se apresenta constituído por quartzo, mica moscovita e por caulinita bem cristalizado, b) caulins sedimentares, quando resultam de transporte, deposição e purificação de caulins primários ou argilas caulinitas por meio de correntes de água doce e matéria orgânica, esses caulins apresentam em sua constituição, mica, quartzo e teor de 1 a 2% de

com propriedades cimentícias. Os materiais pozolânicos podem ser classificados como naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são formadas por processo natural e, em geral, necessitam apenas de moagem, dispensando qualquer tratamento para revelar seu potencial pozolânico para uso. Como pozolanas naturais podem ser incluídas as cinzas vulcânicas e as terras diatomáceas. As pozolanas artificiais são obtidas através do beneficiamento industrial ou originário de um subproduto industrial, que passaram por processos e/ou modificações químicas e mineralógicas, acentuando o potencial pozolânico. Um deles é a metacaulinita, obtido pela calcinação de argila caulínica (caulim), pura ou refinada, a temperaturas entre 600 °C e 850 °C, e que, quando moída até a finura de 7000 cm<sup>2</sup>/g ou 9000 cm<sup>2</sup>/g, resulta em um material de grande pozolanicidade.

Estudos sobre reciclagem de resíduos para uso como pozolanas tem sido intensificados nos últimos anos, podendo-se destacar os resíduos de construções e demolição, resíduos cerâmicos, resíduos de escória granulada de fundição, cinza de casca de arroz, resíduos de termoelétricas, etc. Esses resíduos quando incorporado em argamassas substituindo parte da cal ou cimento Portland apresentam elevadas propriedades cimentícias (FARIAS FILHO et al., 2000).

A utilização de resíduos como materiais de construções pode contribuir para diminuir o consumo de combustível e o preço dos materiais de construção, para preservação ambiental e o aperfeiçoamento de política social. Estes resíduos quando incorporado num traço para uso em construção civil envolvem aspectos químicos, físicos e de risco ambiental, tanto em seus valores médios como na sua dispersão ao longo do tempo (LIMA et al., 2006).

É viável lembrar que, o aproveitamento de resíduos deve ser encarado com uma atividade complementar, que poderá contribuir muito na redução de custos finais de produção, permitindo a adição de algum valor ao resíduo. Os depósitos de resíduos devem ser vistos como mais uma fonte de renda e não apenas simples armazenadores de resíduos.

Além do mais, o custo dos materiais de construção tradicionais é alto para serem utilizados por parcela considerável da população, sendo que uma parte apreciável de seu custo é devido ao preço da energia consumida para a sua fabricação e transporte. Por esta razão, o desenvolvimento de materiais

que têm um consumo global de pouca energia é bastante importante para redução do custo da edificação. Logicamente, o custo dos materiais corresponde a uma fração do custo global das construções, e sem a otimização dos demais custos incidentes, o esforço não será suficiente. (SOUZA et al., 2007).

Com base no exposto, observa-se a constante necessidade de estudos que permitam um aproveitamento racional do resíduo proveniente das indústrias beneficiadoras, para uso como material de construção. Portanto, este trabalho tem o propósito de estudar a potencialidade destes resíduos para serem utilizados em argamassas de assentamento e revestimento.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Preocupados com a grande quantidade de rejeitos gerados pelas indústrias beneficiadoras de caulim, governantes e ambientalistas alertam a população para o impacto causado por estes rejeitos. Os resíduos são jogados diretamente no meio ambiente sem haver nenhum processo de tratamento, para eliminar e diminuir a agressividade que é causada ao meio ambiente e as populações.

A reciclagem destes resíduos é uma das maneiras de diversificar a oferta de matérias-primas alternativas para produção de componentes para uso de construção civil, viabilizando eventualmente, reduções no preço da obra.

Nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte existem várias beneficiadoras de caulins primários para uso em uma vasta gama de produtos destacando-se a indústria cerâmica e a indústria de papel. Esses caulins primários são oriundos da Província Pegmatítica da Borborema e são beneficiados para eliminação de acessórios principalmente na forma de quartzo.

O aproveitamento desses resíduos tem sido pouco estudado nos últimos anos. O emprego de resíduos na construção civil pode vir a se tornar uma atividade de extrema importância e mais freqüente, principalmente, pela quantidade disponível com potencialidades de reciclagem, minimizando os impactos ambientais.

Diante deste contexto, na Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba vem sendo desenvolvidos vários estudos direcionados ao

aproveitamento destes resíduos, como forma de diminuir a agressão ambiental, e os custos em alguns processos de fabricação de materiais, como na confecção de argamassas, confecção de blocos de concreto, produção de blocos, telhas, pisos, revestimentos, louças sanitárias, etc.

A utilização de resíduos industriais como matéria-prima e sua transformação em produtos que possam ser comercializados ou que se mostrem economicamente viáveis, se apresenta como uma opção interessante tanto para as empresas que deles se descartam, bem como para o meio ambiente.

O problema delineado justificaria, em si, a dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Esta justificativa é corroborada pelos resultados encorajadores obtidos, aliados ao crescimento da atividade poluidora em causa, e ao seu crescente desperdício e impacto ambiental tão negativo, numa região carente e num estado dos mais pobres do país, onde devem ser preconizadas ações de cunho imprescindível de caráter emergencial por suas repercussões sócio-econômicas e ambientais.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a potencialidade do uso dos resíduos de beneficiamento de caulim em argamassas alternativas de assentamento e revestimento de alvenarias, com substituição parcial do cimento. Estas argamassas são tradicionalmente usadas na construção civil.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para o atendimento do objetivo geral deste trabalho, buscar-se-á atingir os seguintes objetivos específicos:

- caracterização física, química e mineralógica das matérias primas convencionais e alternativas (rejeitos de caulim);
- caracterização ambiental dos resíduos de acordo com as normas da ABNT;
- avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de caulim no estado natural de acordo com as normas da ABNT;
- avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de caulim calcinados de acordo com as normas da ABNT;

- estudar traços de argamassas de assentamento e revestimento incorporadas com resíduos de caulim de acordo com as normas da ABNT;
- caracterizar tecnologicamente através das propriedades físico-mecânicas à incorporação dos resíduos como matéria-prima alternativa para o desenvolvimento de argamassas;
- comparar os resultados obtidos com as argamassas alternativas em relação às convencionais.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Materiais Pozolânicos**

#### **2.1.1. Pozolana**

Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, não possui poder aglomerante hidráulico, mas que, em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos (de cálcio, magnésio e outros), em temperaturas próximas à ambiente, para formar compostos que possuem poder aglomerante.

Segundo Souza Santos (1989), a pozolana é um material natural ou artificial que quando adicionado às argamassas e concretos, dá origem a produtos com características tecnológicas superiores às dos produtos sem adição, além de apresentar baixo custo.

Para Ruas (1977) e Lima (1993a), as pozolanas contêm constituintes que combinam com a cal, à temperatura ambiente e em presença de água, dando lugar a compostos permanentemente insolúveis e estáveis que se comportam como aglomerantes hidráulicos. Em resumo, pozolanas são materiais reativos a cal.

Coimbra et al. (2002) definem a pozolana como um material natural ou artificial que contém sílica em uma forma reativa. Uma definição mais formal da ASTM (618-1991) descreve pozolana como um material silicoso ou silicoso-aluminoso que em si mesmo possui pequeno ou nenhum valor cimentício, mas poderá, em uma forma finamente dividida e na presença de umidade, reagir quimicamente com hidróxido de cálcio em temperaturas tais que possuam propriedades cimentícias. É essencial que a pozolana esteja em um estado finamente dividido para que ocorram as reações na presença da água para formar estáveis silicatos de cálcio que possuem propriedades cimentícias.

Segundo Massazza (1993), o termo pozolana tem dois significados distintos. O primeiro indica as rochas piroclásticas, essencialmente vítreas e algumas vezes zeolíticas como as encontradas nas vizinhanças do monte Pozzuoli, ao sul da Itália. O segundo significado inclui todo material inorgânico natural ou artificial que endurece na presença de água se misturado com o hidróxido de cálcio (cal) ou outros materiais que possam liberar o hidróxido de



cálcio (clínquer do cimento Portland).

O termo pozolana deriva-se do nome da vila italiana Pozzuoli, que se encontra nas proximidades do Monte Vesúvio. Durante o Império Romano, cinzas vulcânicas dessa área eram misturadas com água e cal para se fazer uma argamassa cimentante. Hoje pozolanas são definidos como materiais a base de silício e alumínio que reagem com cal para formar sólidos não porosos, duros como pedras, quando misturados com água nas proporções corretas. Essas reações são freqüentemente chamadas de reações pozolânicas. Reações pozolânicas ocorrem quando cal e materiais pozolânicos se combinam para formar a ligação permanente, covalente, que define uma estrutura sólida.

Os materiais pozolânicos são comumente descritos como: cinzas vulcânicas - a pozolana original - pumicitas, xistos de opalinas, terras de diatomáceas calcinadas, barro queimado, cinzas volantes, etc. Por último, também conhecida como cinzas de combustível pulverizadas, provavelmente é a pozolana artificial mais comum. As partículas das cinzas volantes são esféricas (que é vantajoso do ponto de vista de exigência de água) e são aproximadamente de mesma área superficial que o cimento, de forma que a sílica fica prontamente disponível para reação. Considerando as pozolanas em geral, a componente sílica tem que ser amorfo, pois a sílica cristalina possui baixa reatividade.

As propriedades exigidas das pozolanas para um determinado propósito são prescritas pela ASTM 618 (1991) e ABNT 12653 (1992). Para pozolanas são necessárias as seguintes propriedades: um conteúdo mínimo de sílica, 70% de  $Al_2O_3$ , e  $F_2O_3$  um máximo conteúdo de 5% de  $SO_3$ , uma máxima perda ao fogo de 12%, e um conteúdo máximo de álcalis (expresso como  $Na_2O$ ) de 15%. O último valor só é aplicável quando as cinzas volantes forem usadas com agregados reativos.

Atualmente existem vários materiais disponíveis que se encaixam nessa definição. Exemplos são partículas de cinza, pedra-pomes, xisto opalino, terra de diatomáceas.

Materiais pozolânicos são utilizados em argamassas e concretos contendo cimento a cerca de vinte séculos. Seu uso é especialmente vantajoso em grandes estruturas maciças de concreto, tais como barragens e instalações

portuárias, e seu emprego em concreto estrutural vem aumentando rapidamente.

As pozolanas freqüentemente são mais baratas do que o cimento Portland que elas substituem, e possuem a característica de uma hidratação lenta, e sua 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 é bastante utilizado.

As obras antigas realizadas com argamassas compostas por misturas de pozolanas e cal, existem até hoje como inestimáveis relíquias dos romanos, mais técnicos e menos artísticos que os gregos. Citam-se, por exemplo, o Panteão (templo dos Deuses), o Coliseu, estádios, basílicas, cisternas, pontes, portos, aquedutos, e as mais diversas estruturas que perduram até hoje (CALLEJA, 1958).

Embora a pozolana, por definição, seja um material capaz de reagir com hidróxidos de cálcio e/ou magnésio, julgou-se conveniente neste trabalho centralizar os estudos com o hidróxido de cálcio.

### **2.1.2. Classificação**

Os materiais pozolânicos são aqueles capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , em condições normais de temperatura e pressão, e de formar compostos cimentantes de boa resistência. São vários os materiais que satisfazem essas condições, portanto é necessário agrupá-los segundo critérios que possibilitem uma avaliação prévia de seus desempenhos e características químicas e mineralógicas.

Os materiais pozolânicos podem ser classificados em dois grandes grupos: naturais e artificiais. As pozolanas naturais são rochas que foram formadas por algum processo da natureza (origem vulcânica ou sedimentar) e que, em geral, necessitam apenas de uma moagem para uso ou que podem facilmente ser convertidas em pozolanas. As pozolanas artificiais são aquelas obtidas por um processo industrial ou como um subproduto.

O ponto crucial da questão está em classificar uma rocha cujas propriedades pozolânicas são realçadas com o tratamento térmico. Massazza

(1976), entre outros, classificam como pozolanas naturais todas as rochas portadoras de atividade pozolânica natural. Por outro lado, Mielenz et al. (1951), Mehta (1987), entre outros autores, admitem como pozolanas naturais também os produtos da calcinação dessas rochas. Se alguma controvérsia persiste quanto à abrangência classificatória das pozolanas naturais, ela inexistente no tocante à classificação, como pozolanas artificiais, aqueles subprodutos industriais que são de natureza artificial.

No tocante à origem, posicionando-se argilitos naturalmente pozolânicos (ex: as argilas caulínicas bem cristalizadas da Província Pegmatítica da Borborema do Estado da Paraíba) para um grupo e as argilas calcinadas (metacaulinita), para o outro, pode-se classificar os materiais pozolânicos conforme apresentado na Tabela 2.1.

Nesse ponto, dependendo de sua origem, as pozolanas naturais apresentam variações consideráveis nas suas propriedades à proporção que variam os componentes ativos das rochas, suas características físicas e mineralógicas. A forma, finura, distribuição do tamanho das partículas, densidade e composição mineralógica das pozolanas naturais são também fatores que influenciam na reação pozolânica.

Algumas pozolanas naturais podem causar problemas devido às suas propriedades físicas como, por exemplo, as terras diatomáceas que, devido à sua porosidade e angulosidade, demandam alto teor de água. Algumas pozolanas naturais têm suas atividades melhoradas por calcinação a temperaturas entre 550° C e 1100° C, dependendo do material (MATOSKI, 2005).

Outros materiais que são considerados ainda como pozolanas artificiais são materiais tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, rejeito sílico-aluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral.

Estas classificações de materiais pozolânicos artificiais estão de acordo com os critérios impostos pela NBR 5736 (1991).

**Tabela 2.1 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto à origem.**

Pozolana Natural	Pozolana Artificial
Rochas vulcânicas ácidas: rochas contendo minerais de opala, em geral são encontradas em forma de xistos, contendo outras formas de sílica que não a amorfa, necessitando de uma calcinação para sua ativação completa.	Escórias ácidas de alto forno
Tufos vulcânicos: são talvez as primeiras pozolanas de que se tem notícia, usadas na antiguidade pelos romanos e que são ainda hoje exploradas.	Cinzas volantes: são resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado e granulado.
Terras diatomáceas: são a pozolana mais ativa na reação com a cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de microorganismos. São rochas de origem biogênica com alto teor de sílica amorfa	Resíduos argilosos de folhelhos betuminosos após extração.
Arenitos e folhelhos opalinos	Microsílica: resíduo do processo de produção de ferro-silício (silício metálico).
Argilitos de argilas mal cristalizadas	Argilas calcinadas (metacaulinita) afinidade e intensidade de reação em presença da água, do hidróxido de cálcio com o tipo de componente ativo presente no composto mineralógico, independentemente da origem da rocha.

Fonte:

**Tabela 2.2 – Composição química da pozolana.**

SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- mínimo-	70%
MgO	- máximo-	5%
SO <sub>3</sub>	-máximo -	3%
Perda ao fogo	- máximo-	10%
Umidade	- máximo-	3%

Fonte: NBR 12653 (1992).

Segundo Davis (1949), uma pozolana deve ter no mínimo 40% de SiO<sub>2</sub>, máximo 30% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e no máximo 20 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os teores de CaO e MgO devem ser os mais baixos possíveis, bem como os de álcalis.

As restrições quanto ao conteúdo de MgO e SO<sub>3</sub> são apenas para manter a coerência com as restrições impostas ao cimento Portland (CASTRO SOBRINHO, 1970).

#### **2.1.4. Atividade Pozolânica**

Na Antigüidade, tanto gregos como romanos tinham conhecimento de que certos materiais vulcânicos, quando finamente moídos e acondicionados à cal extinta e areia, proporcionavam argamassas de melhor desempenho mecânico, os quais exibiam adicionalmente a propriedade de enduoie, à

Desse modo, considera-se, como fator determinante da atividade pozolânica, a instabilidade termodinâmica aos constituintes pozolânicos vítreos e/ou amorfos. Portanto, do ponto de vista genérico, a atividade pozolânica pode ser explicada por uma instabilidade do sistema composto de cal, pozolana e água. Esta instabilidade, em condições adequadas, causa uma série de reações acompanhadas de endurecimento do sistema, que assume alta resistência mecânica (KIHARA, 1982). Estudos feitos por Silva (1982), concluíram que, a atividade pozolânica define aqueles fenômenos que, à temperatura ambiente transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante.

A composição química de uma pozolana oferece poucos elementos para julgar a sua atividade pozolânica. Em princípio, parece lógico, que quanto maior a porcentagem de sílica presente, melhor sua atividade pozolânica. Entretanto, existem boas pozolanas com apenas 40 % de SiO<sub>2</sub> (RUAS, 1977).

#### **2.1.5. Vantagens do Uso da Pozolana**

A reação pozolânica promove, durante a produção de argamassas e de concretos, um aumento no seu desempenho tecnológico, ademais sua utilização que, via de regra, leva a uma diminuição de custo quando comparado com a mistura sem adição devido a menor necessidade de cimento para se alcançar as características desejadas.

Muitas são as pesquisas envolvendo pozolanas, sejam elas naturais ou artificiais, a fim de verificar seu emprego em construções de diversos tipos e portes. Hoje, seu uso é bastante freqüente como aditivo em cimentos para obtenção dos cimentos pozolânicos (CP II - Z 25, CP II - Z 32 e CP II - Z 40, cimentos Portland com adição de pozolana, com 6% a 14% de material pozolânico, e CP IV 25 e CP IV 32, cimentos Portland pozolânicos, com 15% a 50% de material pozolânico).

No concreto, segundo Castro Sobrinho (1970), o uso de uma boa pozolana, em quantidade adequada e com condições ótimas de cura, melhora a maioria das suas propriedades mais importantes. Seu uso em mistura com cimento pode variar de 15% a 40% nos concretos; essa porcentagem de

substituição refere-se ao volume sólido do cimento, para facilidade dos trabalhos de dosagem.

Segundo Mielenz, citado por Santos (1992), algumas das vantagens técnicas resultantes do emprego de pozolanas em concretos são as seguintes: a reação álcali-agregado pode ser reduzida ou inibida; a resistência mecânica pode ser aumentada; a resistência a cloretos, sulfatos e água do mar, pode ser melhorada; a permeabilidade pode ser reduzida e a liberação de calor é diminuída; a redução do calor de hidratação do concreto; o aumento da resistência à tração do concreto; a melhoria da reologia do concreto, no seu estado fresco. Além dessas vantagens técnicas, tem-se o benefício econômico obtido por um consumo menor de cimento Portland mantendo ou aumentando a resistência mecânica e melhorando a durabilidade. Economia de energia pode ser atingida porque os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos que o clínquer do cimento Portland, além disso, o uso de pozolanas tem outras implicações ecológicas, contribuindo para um aproveitamento melhor dos resíduos industriais poluidores, como é caso das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termelétricas, da microssílica oriunda das indústrias de ferro-silício e silício metálico (ZAMPIERI, 1989), e até mesmo os resíduos de cerâmica moída e do beneficiamento do caulim.

Tendo em vista, o comprovado desempenho mecânico da pozolana em pesquisas de Silva (1982), Lima (1993) e Mota (1994), acredita-se também na possibilidade de seu uso na fabricação de materiais alternativos, como tijolos, redes monolíticas, argamassas, entre outros, visto que pode-se reduzir consideravelmente o uso do cimento, podendo também reduzir os custos, desde que a pozolana seja industrializada.

#### **2.1.6. Pozolana como Material de Substituição Parcial do Cimento**

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

O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado na produção do concreto, seus principais constituintes são: os silicatos de cálcio ( $C_3$

sódio, potássio e sílica) na sua estrutura cristalina (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os componentes do cimento Portland reagindo com a água se hidratam da seguinte forma:

- a reação do  $C_3A$  com a água é imediata, por isso há necessidade de adição de sulfato para retardar esta reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfatos resulta na etringita, que após alguns dias, pode-se tornar instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável. Os compostos resultantes do processo de hidratação do  $C_4AF$  são estruturalmente similares aos formados a partir do  $C_3A$  (MEHTA; MONTEIRO 1994);
- a hidratação dos silicatos se dá algumas horas após o início da hidratação do cimento, originando os silicatos de cálcio hidratado representados genericamente pelo C-S-H e o hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$ , indicado na química do cimento por CH.

Assim, a hidratação do cimento resulta em três compostos principais:

- C-S-H → representa, segundo Mehta e Monteiro (1994), 50 a 60% do volume dos sólidos na pasta completamente hidratada e é responsável pela resistência aos esforços mecânicos;
- CH → segundo Mehta e Monteiro (1994), ocupa 20 a 25% do volume dos sólidos na pasta e contribui pouco para a resistência da pasta endurecida;
- sulfoaluminatos de cálcio → ocupam 15 a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Os principais compostos sulfatados são a etringita e o monossulfato de cálcio.

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Assim, no cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos reage com a pozolana, utilizada em substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais estáveis do cimento hidratado.



## **2.2 CAULIM**

O termo caulim ou “china clay” deriva da palavra chinesa Kauling (colina alta) e se refere a uma colina de Jauchau Fu, ao norte da China, onde o material é obtido, há muito tempo. É formado essencialmente pela caulinita, apresentando em geral cor branca ou quase branca, devida ao baixo teor de ferro. É um dos mais importantes e provavelmente um dos sais minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre (SILVA, 2001).

Caulim é o nome comercial dado a uma argila branca ou quase branca, constituída essencialmente de caulinita. Segundo (Roskil, 1996) apud Luz; Chaves (2000) há mais de três mil anos, os chineses já usavam o caulim para fazer porcelana. Grim (1958) apud Luz; Chaves (2000) definem caulim como sendo uma rocha constituída de material ar

metahalosita e outras, são variedades polimorfas da caulinita, com sistemas diferentes de cristalização. A halosita poderá estar associada à caulinita, sendo possível a sua identificação através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) ou de transmissão, apropriando-se de seu hábito tubular característico. Segundo Bristow (1987), citado por Luz (1995), em algumas aplicações cerâmicas a presença da halosita apresenta vantagens, no entanto em outras, como cobertura de papel, é muito prejudicial.

Embora o mineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) seja o principal constituinte do caulim, outros elementos além do alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio acham-se geralmente presentes. A composição química do caulim é usualmente expressa em termos de óxidos dos vários elementos, embora eles possam estar presentes em forma mais complicada e por vezes desconhecida (LIMA, 2005).

Para Luz et al. (2000) caulins são produtos de alteração de silicatos de alumínio, principalmente dos feldspatos (caulinita e halosita) e podem ocorrer em dois tipos de depósito: primário ou residual (aluvial) e secundário.

Bristow (1987) descreve os caulins primários como sendo o resultado da alteração de rochas *in situ*, e dependendo da sua origem são classificados em: intemperizados e hidrotermais. Segundo Santos e Sousa Santos (1959), os caulins secundários são resultantes da deposição de materiais transportados por corrente de água doce. Ainda segundo os mesmos autores, as diferentes origens geológicas dos caulins resultam em diferenças significativas na composição mineralógica, principalmente nos componentes não argilosos.

Bristow (1987) relata que os caulins secundários apresentam teores mais baixos de quartzo e mica, no entanto ocorrem contaminados com óxidos de ferro e minerais de titânio, que podem alterar a sua cor branca original. Outra característica que merece registro é a granulometria mais fina dos argilo-minerais.

Os caulins secundários, segundo Bristow (1987), são classificados em três grupos: caulins sedimentares, areias caulínicas e argilas plásticas, refratárias e silicosas.

O caulim é um mineral amplamente utilizado nos diversos setores industriais cabendo destacar o de papel, que consome cerca de 47% da

produção mundial, sendo 33% para revestimento ou cobertura (“coating”) e 14% para carga (“filler”).

Em menor escala, o caulim é usado na fabricação de materiais refratários, plásticos, borrachas, tintas, adesivos, cimentos, inseticidas, pesticidas, produtos alimentícios e farmacêuticos, catalisadores, absorventes, dentifrícios, clarificantes, fertilizantes, gesso, auxiliares de filtração, cosméticos, produtos químicos, detergentes e abrasivos, além de cargas e enchimentos para diversas finalidades (SILVA, 2001).

Murray (1986) considera que o vasto campo de aplicação industrial do caulim deve-se às suas características tecnológicas: quimicamente inerte; branco ou quase branco; tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento e reforçador para aplicações como carga; possui baixa condutividade térmica e elétrica; macio e pouco abrasivo e competitivo com os materiais alternativos.

Geralmente, nas jazidas de caulim de valor econômico, segundo Kiyohara (1984) apud Rocha (2005) são os minerais chamados de feldspatos que, predominantemente dão origem a caulinita e a haloisita em qualquer das formas, seja por intemperismo ou por ação hidrotérmica.

Hanson (1996) apud Luz et al. (2000) afirma que atualmente a seleção de um bem mineral para ser usado na indústria, depende de uma série de critérios: tamanho e forma das partículas, composição química, área específica, energia de superfície, alvura, opacidade, viscosidade da suspensão, índice de refração, compatibilidade com a polpa e com aditivos químicos tais como ligantes e auxiliares de retenção.

Para o aproveitamento do caulim “bruto”, é necessário o seu beneficiamento, que pode ser pelo processo a seco ou pelo processo úmido. O beneficiamento a seco é usado para caulins que já possuam qualidades desejadas de alvura, com pouco quartzo e distribuição granulométrica adequada de partículas. Como a maioria dos caulins não atende a essas especificações, o seu beneficiamento é feito a úmido (ROCHA, 2005).

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (2006), no período de 1988 a 2006, a produção bruta brasileira passou de 2,1 milhões para 6,6 milhões de toneladas, registrando um aumento de 214,3%, enquanto que a beneficiada

passou de 796 mil para 2,3 milhões de toneladas, acusando um aumento de 188,9%.

O Brasil é hoje um grande produtor de caulim, quer para consumo interno, quer para exportação para os mercados internacionais. Os depósitos sedimentares da Bacia Amazônica contêm grandes quantidades de caulins de alta qualidade, os quais com desenvolvimentos e infra-estrutura adequados irão desempenhar um papel cada vez maior nos mercados mundiais. A ampla variedade de depósitos de caulins provenientes de ambientes geológicos diferentes e a cronologia que levou à sua formação irão continuar a ser um grande desafio aos industriais e pesquisadores.

### **2.2.1. Reservas de caulim**

As reservas mundiais de caulim são bastante abundantes e de ampla distribuição geográfica. Porém, apenas 4 países detêm cerca de 95,0% de um total estimado de aproximadamente 14,2 bilhões de toneladas: Estados Unidos (53,0%), Brasil (28,0%), Ucrânia (7,0%) e Índia (7,0%). Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2006), as reservas brasileiras de caulim atingiram, no ano de 2005, um total em torno de 4,9 bilhões de toneladas, das quais 2,7 bilhões são medidas. O somatório destas com as reservas indicadas atingiram 4,4 bilhões de toneladas, correspondendo a 89,8% das reservas totais. Os Estados do Amazonas, Pará e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando, respectivamente, com 68,25%, 16,72% e 8,06% do total das reservas.

Os depósitos de caulim hoje conhecidos nos Estados do Amazonas, Pará e Amapá são do tipo sedimentar, caracterizando-se por grandes reservas e com propriedades para diversas aplicações industriais, principalmente em revestimentos de papel (coating). Nas demais Unidades da Federação verifica-se uma predominância de caulim primário, originado tanto da alteração de pegmatitos como do intemperismo de granitos, destacando-se os Estados de São Paulo, Goiás, Santa Catarina e Paraná. No estado da Paraíba tem grande ocorrência nas regiões do Seridó e do Compartimento da Borborema, onde é explorado, hoje, por pelo menos seis indústrias.

No período de 1988 a 2006, pode-se destacar o significativo incremento das reservas de caulim no Brasil, ocorrido em 1996, passando de um patamar

---

\***Reserva medida:** a tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e

### **2.2.2. Produção de caulim**

O valor da produção mineral comercializada do Brasil, segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2006) foi de R\$ 696.150.225,00, dos quais R\$ 475.900,00 corresponde ao valor comercializado pela Paraíba.

Dados do Anuário mineral Brasileiro acusam que o Brasil produziu, em 2006, cerca de 2.300.005 toneladas de caulim beneficiado. A produção bruta, que foi destinada principalmente às usinas de beneficiamento, atingiu 830.451 toneladas.

O estado da Paraíba tem grande ocorrência nas regiões do Seridó e do Compartimento da Borborema, onde é explorado, hoje, por pelo menos seis indústrias, sendo uma delas a Caulisa, empresa responsável por ceder o material para a realização deste trabalho.

Segundo Souza Santos (1989), apesar das reservas relativamente reduzidas, os caulins da Paraíba são de elevado rendimento, alvura e refletância pelo fato de serem constituídas por caulinita hexagonal.

A natureza da lavra de caulim no Brasil é invariavelmente a céu aberto, sendo utilizadas galerias apenas para pesquisa em alguns depósitos primários. Há casos em que a lavra se faz totalmente mecanizada, como nas minas de caulim sedimentar do Amapá e do Pará, ou de forma semi-mecanizada, comum nos depósitos de caulins primários de vários estados das regiões Sudeste, Sul e Nordeste. Como subprodutos do caulim há o aproveitamento de outros minerais industriais como quartzo, mica e feldspato (depósito primário), além da produção de grandes quantidades de areia.

Segundo Oliveira et al. (2004), o uso do caulim como material pozolânico no cimento Portland pode incrementar o mercado da mineração de uma localidade e favorecer a economia das regiões produtoras, comumente dominadas pela pobreza.

A produção do mineral caulim para a utilização industrial é dividida em duas etapas, extração e beneficiamento. Aspectos básicos e técnicos operacionais referentes ao processo de beneficiamento de caulim devem ser estudados para que se possa verificar a origem dos resíduos gerados pela indústria de mineração.

### **2.2.3. Beneficiamento de caulim**

A industrialização do caulim envolve basicamente o processo de lavra e beneficiamento. A lavra pode ser feita em duas maneiras: em aberto e subterrânea. A lavra subterrânea é mais praticada nos locais de topografia acidentada, sendo preferida pelos garimpeiros, por evitar a operação de remoção da camada superficial (OLIVEIRA et al., 2004).

Os processos utilizados para beneficiar o caulim dependem do uso e da finalidade do produto. Existem dois processos: via seca e via úmida.

Numa visão geral, no processo a seco, ou de separação ao ar, o caulim bruto é levado à usina de beneficiamento em grandes pedaços, onde é fragmentado em moinhos de rolos desintegradores que em seguida alimenta um moinho de bolas com um separador de ar tipo ciclone. As partículas finas são recolhidas em um coletor e ensacadas, enquanto que as mais grossas voltam ao moinho.

No processo por via úmida, o caulim bruto é desintegrado em batedor onde é adicionada água para a lavagem dos minerais acessórios de modo a retirar a fração de caulim agregada aos mesmos.

Em seguida, o material passa por tanque para a separação do caulim da areia e depois para tanques de sedimentação onde os flocos são precipitados.

O caulim precipitado é bombeado para os filtros-prensa, nos quais é retirada a água em excesso, resultando na torta de caulim. A torta é seca ao ar ou em fornos-de-teto-quente no período chuvoso, ou quando se quer um produto de maior qualidade.

Segundo Rocha (2005), no processo de beneficiamento do caulim, o minério é submetido a uma lixiviação química, com o objetivo de remover, principalmente, as impurezas de ferro, que conferem colaboração ao produto final e, com isso, depreciam seu valor comercial. Nessa lixiviação é empregado o zinco metálico em meio ácido, com a finalidade de reduzir quimicamente o ferro. A água de lavagem daí resultante é bombeada para um tanque e posteriormente neutralizada com hidróxido de cálcio.

No processo de beneficiamento da Caulisa, indústria que cedeu o resíduo para esta pesquisa, não se utiliza à etapa de lixiviação química.

Em resumo, a produção industrial do caulim primário começa com a sua extração no estado bruto e sua separação da sílica. Depois de realizada essa

etapa, inicia-se o processo de beneficiamento constituído de três etapas: decantação, filtração e processo de secagem e moagem. Em seguida serão descritos com maiores detalhes as etapas mencionadas, que fazem parte do beneficiamento úmido do caulim.

### **2.2.3.1. Decantação**

Na decantação, a finalidade é classificar as parcelas da mistura de acordo com a sua granulometria.

A Figura 2.1a apresenta a matéria-prima caulim bruto, que chega das jazidas. O material é disperso em água e se inicia a primeira lavagem do material bruto, conforme Figura 2.1b, seguindo o seu transporte por gravidade até o coberto de peneiramento, Figuras 2.2a e 2.2b. Nesse processo de transporte se realiza a separação do material grosso da mistura facilitando o peneiramento, Figura 2.1c. Nessa etapa já se verifica a grande quantidade de rejeito produzido correspondendo ao resíduo grosso na obtenção do mineral caulim, conforme Figura 2.1d.

Segundo Guimarães (2004) apud Lima (2005) o coberto é formado por um conjunto de peneiras ABNT nº. 200, de abertura 0,074mm, e peneiras ABNT nº. 325, de abertura 0,044mm, que estão empilhadas em ordem crescente da abertura da malha. Nesse sistema, a mistura é classificada de acordo com as dimensões de suas partículas. Todo o material que passa nas peneiras ABNT nº. 200 (0,074mm) corresponde ao caulim que será beneficiado. Caso seja necessário um maior refinamento do minério, ele é passado nas peneiras ABNT nº. 325 (0,044mm). O material retido nas peneiras nº. 200 de abertura 0,074mm é rejeitado e consiste no resíduo fino da cadeia produtiva do caulim, conforme apresentado nas Figuras 2.3a e 2.3b. Este material é conhecido usualmente, como a “borra do caulim”. Esse resíduo de caulim fino possui algum valor comercial, e em alguns casos são vendidos pelas empresas.



**Fig. 2.1 – Caulim bruto oriundo da jazida (a), processo de lavagem do caulim bruto (b) e (c) e separação do resíduo grosso de caulim (d).**

**Fig. 2.2 – Vista externa do Coberto de Peneiramento do caulim – peneira ABNT nº. 200 (0,074mm) (a) e vista interna do caulim lavado sendo beneficiado (b).**

Após o peneiramento, o material é levado, por gravidade, através de tubulações para um sistema de tanques onde se inicia a fase de decantação e

sedimentação, segunda lavagem do caulim. Este sistema é formado por seis tanques. O primeiro tanque recebe a mistura e é preenchido completamente

**Fig. 2.3 – Resíduo fino de caulim (borra) que fica retido na peneira ABNT nº. 200 acumulado nas proximidades da Indústria de Beneficiamento (a) e (b).**

com água destilada. Nele ocorre a separação de fração de maior granulometria através da sedimentação.

A fração mais fina que se posiciona na região superficial passa, por transbordamento, para o segundo tanque que apresenta um desnível de altura em relação ao primeiro, onde acontece a sedimentação da fração mais grossa. A parcela mais fina é transbordada para o terceiro tanque. Neste tanque repete-se o mesmo procedimento de sedimentação descrito, acontecendo o mesmo no quarto tanque (GUIMARÃES, 2004 apud LIMA, 2005).

**Fig. 2.4 – Tanques de decantação do caulim.**

A água superficial que não transborda é vazada para outro tanque de onde é reciclada para a fase inicial de dispersão do minério bruto. Um dos materiais sedimentados em cada um dos tanques é escolhido de acordo com a utilização final e destinado ao tanque de vazamento, de onde será retirado para a realização do segundo processo da cadeia produtiva, a filtração.

**Fig. 2.5 – Etapa do processo de beneficiamento onde o caulim é bombeado para o filtro-prensa.**

#### **2.2.3.2. Filtração**

No processo de filtração, é retirada, com o maior aproveitamento possível, a água misturada com o caulim proveniente do tanque de vazamento, reduzindo assim a umidade do material. Este processo é realizado através do método de prensagem, em que a mistura é recalçada para dentro de um filtro-prensa, por meio de uma bomba de recalque, de acordo com a Figura 2.5. A mistura é prensada, assim a água é eliminada da mistura, os vazios são compactados e o caulim fica armazenado em forma de blocos, conforme apresentado nas Figuras 2.6a, 2.6b, 2.6c e 2.6d.

**Fig. 2.6 – Caulim sendo passado no filtro-prensa (a) e (b), retirada dos blocos de caulim (c) e empilhamento para secagem (d).**

### **2.2.3.3. Secagem e moagem**

Para a perda total da umidade dos blocos de caulim, eles são encaminhados à fase de secagem. Na primeira etapa os blocos são expostos ao sol e as correntes de ar onde ficam parcialmente secos, como na Figura 2.7a. Posteriormente os blocos de caulim são dispostos no forno, para a completa secagem do material, Figura 2.7b.

A secagem do caulim pode ser feita, segundo Rocha (2005), pelo modo de flash dray, que é o mais economicamente viável, e que tem o maior grau de pureza, e também pelo modo de spray dray o qual não é muito viável.

Na etapa de secagem ocorre desagregação das partículas. Em seguida o material é destorroado para facilitar a técnica da moagem. Todo o caulim é colocado em um moinho, Figura 2.8a, e o material coletado corresponde ao caulim beneficiado, produto final de todos esses processos, sendo finalmente

**Fig. 2.7a - Secagem natural do caulim.**

**Fig. 2.7b - Secagem do caulim através de forno.**

ensacado, em sacos de 20 kg e “big bag’s” de 700, 1000, 1350 e 1500 kg, e destinado à comercialização, conforme apresentado nas Figuras 2.8b e 2.9.

**Fig. 2.8 – Moagem do caulim destorroado (a) e ensacamento do caulim (b).**

**Fig. 2.9 – Estocagem do caulim beneficiado – em sacos de 20 kg (a) e em “big bag” (b).**

#### **2.2.4. Impactos gerados pelo resíduo do caulim**

A complexa interação existente entre os recursos naturais (solo, água, ar, energia, bens minerais e as diversas fontes biológicas) e os diferentes processos de industrialização dificulta a realização e, também o correto controle dos impactos gerados no meio ambiente pelo desenvolvimento destes processos (ARAÚJO, 2002).

Para o IBRAM (1984) apud Araújo (2002), o termo meio ambiente deve ser entendido como sendo todos os aspectos relacionados à flora, à fauna e ao ser humano. Portanto, ele possui os aspectos ligados ao ambiente natural e à

sua interação com os ambientes construídos. Assim, esta descrição abrange todos os componentes da terra – o solo, a água, o ar, e todas as camadas da atmosfera; as construções (estradas, rodovias, casas, edifícios, etc.) e facilidades ligadas à recreação.

As inúmeras indústrias no Brasil, sejam de beneficiamento ou de transformação, em razão do elevado volumes de produção, são responsáveis pela geração de significativas quantidades de resíduos que são lançados e depositados no meio ambiente.

Essa prática constitui-se em um risco ambiental quando não são tomadas as devidas precauções por parte da empresa geradora do resíduo, além do desperdício de energia e matéria-prima, uma vez que muitos desses resíduos incorporam grande conteúdo energético e, normalmente, são ricos em compostos inorgânicos valiosos como óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio e sulfatos, que os habilitam a serem utilizados como matéria-prima pelas indústrias cerâmicas, de cimento, de gesso e para a fabricação de insumos destinados à construção civil.

Assim os efeitos que degradam o meio ambiente, em relação a um projeto industrial, devem ser considerados, assim como quaisquer alterações que o mesmo pode causar o meio ambiente, incluindo efeitos sobre a saúde, condições sócio-econômicas, patrimoniais, culturais ou físicos, devido ao corrente uso de recursos naturais ou processos de industrialização (FELLEMBERG, 1980).

No processo de beneficiamento do caulim são gerados dois tipos de resíduos que são lançados no meio ambiente. O primeiro resíduo é constituído basicamente por quartzo, proveniente da etapa de lavagem do caulim bruto, correspondente a cerca de 70% do caulim extraído, e é totalmente descartado pelas empresas, por não ter valor comercial, é este resíduo é que se configura como um problema de degradação ambiental. Entretanto, o segundo resíduo, procedente da etapa de separação em peneira ABNT nº. 200 (0,074mm), onde o rejeito é o que fica retido, é conhecido como o resíduo fino e possui valor de mercado, é também um problema para o meio ambiente, mas como é produzido em menor quantidade não impacta tanto como o resíduo grosso.

Estudos preliminares mostraram que o segundo resíduo, por ser finamente dividido e constituído basicamente por caulinita, caracteriza-se como

uma pozolana (BARATA, 1998), cujos mecanismos de ação em sistemas à base de cimento Portland são, de certa forma, semelhantes aos da sílica ativa. Ambas aceleram o processo de hidratação do cimento Portland porque são constituídas por partículas extremamente finas que atuam como pontos de nucleação para formação do hidróxido de cálcio, como também reagem rapidamente com este produto de hidratação. A diferença é que na metacaulinita, independente do teor de incorporação, a reação pozolânica alcança o seu período máximo entre 7 e 14 dias, enquanto que na sílica ativa, dependendo do percentual, os efeitos da sua reação pozolânica podem ser significativos por períodos posteriores (WILD et al., 1995 apud WILD et al. 1996).

Segundo Rocha (2005), durante o processamento do caulim, ocorre à produção de rejeitos líquidos (que são lançados nos rios) e sólidos (geralmente aterrados) esses rejeitos podem conter, além de outros contaminantes, concentração de metais como o ferro (Fe), alumínio (Al), zinco (Zn) e cádmio (Cd), acima do permitido pela legislação. Os reflexos dessa contaminação extravasam, frequentemente, os limites das áreas de trabalho, atingindo também a topografia, flora, fauna, sistema hídrico e morfofisiológico do solo. Na Figura 2.10 estão apresentados os impactos ambientais causado pelo resíduo de caulim.

**Fig. 2.10 – Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim**

É durante a fase de lavagem e classificação do tamanho das partículas da mistura que se tem a maior geração do resíduo da cadeia produtiva do caulim. Estima-se que é gerada uma grande quantidade de resíduos, pois 70% da matéria-prima bruta são rejeitadas durante o processo (BARATA, 2002). Todo o material rejeitado é depositado em céu aberto, pois as indústrias beneficiadoras não têm a preocupação de construir tanque de deposição, lançando a imensa quantidade de rejeito no meio ambiente, uma vez que o resíduo em si não é tóxico.

O que diferencia o resíduo do beneficiamento do caulim (RBC) dos depósitos naturais de argila caulinítica é justamente as características mencionadas no parágrafo anterior. Enquanto os depósitos naturais podem possuir quantidades elevadas de quartzo, que reduz a reatividade da pozolana em razão desse mineral ser uma fase inerte do ponto de vista pozolânico; o RBC depositado nas lagoas, além de ser extremamente fino, apresenta percentagens ínfimas de quartzo por causa do desareamento, etapa do beneficiamento que separa o quartzo da caulinita. Em outras palavras, o processo industrial de beneficiamento, que proporciona características especiais ao caulim para ser utilizado pela indústria de fabricação de papel, acabou também acarretando ao resíduo, de forma involuntária, qualidades excelentes para que possa vir a ser uma matéria-prima de primeira qualidade para a produção da metacaulinita de alta reatividade.

Hoje, com os avanços tecnológicos, de mercado, de competitividade, as empresas do mundo inteiro têm buscado modernizar seus sistemas de produção, para poder assim garantir produtos e serviços tecnologicamente modernos e ecologicamente corretos, sendo imprescindível para o Brasil uma completa adequação ao mercado exterior. Para isso existem as normas do Sistema de Gestão da Qualidade ISO 9000 e de Sistemas de Gestão Ambiental ISO 14000, que possibilitam uma correta organização das indústrias nacionais aos parâmetros internacionais.

Todo tipo de resíduo deve ser avaliado quanto a sua periculosidade ao meio ambiente, uma das normas para tal avaliação é a norma da ABNT NBR 10004/2004. Esta norma tem como objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, com isso fornecendo subsídios a um gerenciamento adequado. A classificação de



resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (NRB 10004; 2004 – ABNT). As Figuras 2.11a, 2.11b, 2.11c e 2.11d mostram os locais onde os resíduos de caulim são coletados e depositados.

Segundo Rocha (2005), no beneficiamento do caulim os trabalhos de lavra iniciam-se com a pesquisa para a caracterização do corpo e qualidade no minério e se estendem até o beneficiamento e transporte dos resíduos. A extração de um volume expressivo de argila e de materiais rochosos, em todas as suas fases, envolve atividades que provocam impactos para o meio físico e biótico e acarretam problemas sócio-econômicos. Alguns desses impactos dependem de fatores como tipo de minério, técnicas de extração e beneficiamento, o que requer diferentes medidas para a recuperação ambiental.

Os resíduos provenientes das indústrias beneficiadoras de caulim, são distribuídos, numa quantidade considerável, diretamente ao meio ambiente sem critérios de proteção, sendo causadores de impactos ambientais, conforme Figuras 2.12a e 2.12b. O resíduo do caulim, argila caulinita, causa

**Fig. 2.11 – Local de coleta (a) e depósito dos resíduos de caulim (b).**

alterações significativas na qualidade dos recursos hídricos, sendo responsável pela contaminação das águas dos rios, deixando-a esbranquiçada e turva. O material altera quimicamente a água, diminuindo a quantidade de plâncton e

provocando a morte de peixes. Além disso, também é responsável pela desfiguração da paisagem.

**Fig. 2.12 – Resíduos de caulim depositados sobre vegetação, próximos a corpos d'água e às margens de estradas.**

Embora exista uma preocupação ambiental, por parte das empresas e dos órgãos ambientais, a indústria do caulim ainda causa transtornos, tais como a produção excessiva de particulados, gerados durante o transporte de caulim (matéria-prima bruta) e produção de rejeitos (resíduos). Esses resíduos, quando secos, transformam-se em pó e, pela ação dos ventos, esse pó espalha-se pelas ruas e avenidas, poluindo o ar e comprometendo o aspecto visual do local onde a empresa atua (ROCHA, 2005).

Visando mitigar tais impactos, algumas empresas do ramo, juntamente com os órgãos competentes, têm elaborado os Estudos de Impactos Ambientais e Relatórios de Impactos Ambientais (EIAs/RIMAs).

Na Paraíba, a indústria do beneficiamento do caulim, atividade que ocupa grande importância para o Estado e municípios, é geradora de grandes quantidades de resíduos, que são depositados em aterros, com impacto ao meio ambiente. Como resultado do beneficiamento do caulim, a indústria produz uma quantidade de resíduo muito elevado. Esses resíduos de caulim em si não têm valor econômico algum, por isso tenta-se reduzir os custos de manejo com seu transporte, pelo descarte mais próximo possível da usina de beneficiamento que acaba ficando cercada de grandes montes de material não aproveitado.

Atualmente os resíduos do caulim constituem um problema para os municípios produtores. Os volumes de resíduos são consideráveis e depositados aleatoriamente na natureza, causando inconvenientes às populações locais. Além de precisar de grandes áreas para seu depósito, o vento leva seus finos a grandes distâncias contaminando as populações vizinhas. Portanto há a necessidade de se estudar seu real potencial para aproveitamento no ramo da construção.

## **2.3. ARMAMASSA**

### **2.3.1. Definição**

A argamassa é um material de construção que consiste numa mistura homogênea e íntima de água, agregado miúdo (areia) e de um aglomerante, substância que lhe dê consistência, como cimento, cal ou gesso. O agregado mais comum é a areia, embora possa ser utilizado o pó de pedra. Normalmente, a argamassa é utilizada em assentamento de alvenaria e em revestimento.

Segundo a NBR-7200 (1998) a argamassa é definida como sendo a mistura de aglomerantes e agregados miúdos com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência, cuja dosagem varia de acordo com a utilização.

Segundo Rocha (2005), as argamassas são constituídas por material ativo, a pasta, e material inerte, o agregado miúdo. A pasta é uma mistura do(s) aglomerante(s) com a água e é responsável pela ligação dos grãos de areia entre si, a fim de formar um todo homogêneo. A presença do material inerte à pasta, além de oferecer um barateamento do produto, elimina em parte a retração por secagem.

As argamassas mais comuns são constituídas por cimento, areia e água. Em alguns casos, costuma-se adicionar outro material como cal, saibro, argila, caulim, e outros para a obtenção de propriedades especiais.

Uma argamassa com qualidade deve ter todos os grãos do material inertes (o agregado miúdo) envolvidos e aderidos pelo material ativo (a pasta) e os espaços entre os grãos do agregado miúdo devem ser preenchidos pela pasta. Para uma boa aderência entre o agregado e o aglomerante, é necessário que o primeiro esteja limpo e molhado pela água. As argamassas, assim como o concreto, também são moles nas primeiras horas e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade.

Segundo Azeredo (1987), a resistência de uma argamassa é função da quantidade de aglomerante adicionado, isto nas argamassas simples; nas mistas é o adicionamento do cimento nas argamassas de base, cal e areia em quantidades crescentes, de maneira que se obtenha do produto uma resistência equivalente aos elementos a serem unidos.

É bastante comum o uso de mais de um aglomerante na composição de uma argamassa, sendo denominadas de argamassa mista. Segundo Cincotto et al. (1985), as argamassas mistas de revestimento, pela presença de cal hidratada, oferecem elevada vantagem devido à exigência da elevada finura do aglomerante, que se prende às questões de boa trabalhabilidade e aderência adequada ao revestimento; e ao grau de reatividade, que se relaciona com o crescimento e valor final da resistência à tração da argamassa no estado endurecido.

As argamassas são classificadas em: a) argamassa de aderência (chapisco); b) argamassa de junta (assentamento); c) argamassa de regularização (emboço); d) argamassa de acabamento (reboco); e) argamassas especiais (AZEREDO, 1987).

**Fig. 2.13 – Classificação das argamassas.**

Empregada no assentamento de alvenarias e na execução de revestimentos, a argamassa deve ter, basicamente, as seguintes características: economia, poder de incorporação de areia, 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 correlatas aos materiais empregados.

### **2.3.2. Argamassas Utilizando Resíduos**

Atualmente as questões de cunho ambiental estão em evidência. Os governos, as empresas e até a sociedade civil está se questionando sobre o que fazer para garantir a sustentabilidade das gerações futuras. A comunidade acadêmica também tem se preocupado bastante com esse enfoque e um dos temas bastante estudado pelos pesquisadores é a reutilização e reciclagem de resíduos.

Nesse enfoque, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de se reutilizar resíduos, sejam eles de indústrias química, cerâmica, siderúrgicas, de extração etc., como também de estações de tratamento de água e de usinas resíduos de construção e demolição.

Kangue et al. (2007) estudou as propriedades físicas e mecânicas de concretos e argamassas com a adição exclusiva e conjunta de resíduos de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Carlos, seco e moído, substituindo parcialmente o agregado miúdo (areia grossa) e o entulho de concreto da Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição de São Carlos, substituindo o agregado graúdo (pedra britada). A argamassa de assentamento produzida com agregado miúdo natural e 2% de lodo da ETA apresentou menor resistência à compressão axial que a argamassa de assentamento reciclada com o agregado miúdo de entulho do concreto com 2% de lodo da ETA.

Já Faria et al. (2006) trabalhou com a reutilização de resíduos de argila gerados no processo de dimerização de ésteres, de indústria química, diminuindo o impacto ambiental e os custos com a disposição destes em aterros industriais. Os autores propuseram o emprego da argila montmorilonítica em substituição ao agregado mais fino da areia na produção de argamassas. Os resultados mostraram que a utilização do resíduo em substituição ao agregado fino em teores de até 5%, é perfeitamente viável quanto à resistência mecânica.

A pesquisa realizada por Souza et al. (2007) utilizou a substituição, nas argamassas, de aglomerante e agregado miúdo por cinza e casca de arroz, objetivando melhorias nas argamassas no que diz respeito à resistência a compressão simples, trabalhabilidade, índice de vazios e absorção por imersão

em água, como também uma melhor compactação de sua microestrutura. As argamassas alternativas, com cinza e casca de arroz, nos traços 1:4 e 1:6, apresentaram comportamento mecânico superior às convencionais e às no traço 1:6, sendo o melhor resultado para as argamassas incorporadas com 20% de casca de arroz e 9% de cinza de casca de arroz.

A utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa foi desenvolvida por Armange et al. (2005). Os resíduos estudados são materiais cerâmicos a base de sílica e foram incorporados em argamassas, em substituição ao agregado fino, em porcentagens que variam de 0% a 100%.

Coimbra et al. (2004), em sua pesquisa, trabalhou com a recuperação do resíduo proveniente de pilhas do tipo zinco-carvão para ser utilizado como aditivo em argamassas e concretos, dando assim, uma solução para as pilhas e ao mesmo tempo ajudando a resolver a questão ambiental, incluindo-as na indústria brasileira de reciclagem. Os resultados mostraram que a utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão produziu concretos com diferentes características.

Na busca de oferecer alternativas de uso para os pneus inservíveis, os pesquisadores Trigo et al. (2005) propuseram a utilização de borracha de pneus na incorporação em concretos e argamassas. Na confecção da argamassa com este resíduo foi utilizado o traço 1:3:0,5 em massa e uma quantidade de 12% em volume de substituição do agregado miúdo por borracha e estes foram ensaiados aos 30 dias de idade depois submetidos à 600°C. Os resultados obtidos mostram queda na resistência à compressão dos corpos de prova aquecidos, quando comparada à resistência dos que permanecem em temperatura ambiente.

Como o vidro contém uma composição favorável ao desenvolvimento da reação pozolânica, Fragata et al. (2007) verificaram a viabilidade da incorporação destes resíduos industriais em argamassa com ligante de cal aérea, em substituição de parte do ligante. O resultado obtido foi o aumento das resistências à flexão e à compressão com condições de cura em ambiente seco.

Ribeiro et al. (2007) em seu trabalho de pesquisa visaram contribuir para o reaproveitamento dos resíduos de escória cristalizada, das indústrias siderúrgicas e dos cortes de pedras ornamentais, no preparo de argamassa na

construção civil, dando uma solução ao problema de destinação das indústrias, que descartam esses resíduos, e evitando o desperdício, já que desta forma pode-se gerar outros bens de produção. No ensaio de Resistência à compressão, a argamassa produzida com o resíduo apresentou menor número de poros interligados; com a escória funcionando como um “filler”, diminuindo os poros existentes na argamassa, aumentando a resistência à compressão nos corpos de prova de argamassa.

A recuperação de resíduos inorgânicos da indústria cerâmica para serem utilizados como aditivos em argamassas de construção civil foi a base da pesquisa realizada por Coimbra et al. (2002). Segundo os pesquisadores, as argamassas com adição de resíduos com características cementantes representam uma atraente classe de materiais para o desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas, dado o grande número de aplicações na construção civil.



## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram:

- **Resíduos de caulim grosso (RCG).** Resultantes do primeiro processo de beneficiamento do caulim, extraídos das minerações da Planície Pegmatítica da Borborema, localizada no município de Juazeirinho - PB e cedidos pela CAULISA Indústria S/A.
- **Resíduos de caulim fino (RCF).** Resultantes do segundo processo de beneficiamento do caulim denominado de borra, que fica retido na peneira ABNT nº 200 (0,074mm). Estes resíduos foram cedidos pela CAULISA Indústria S/A, localizada no município de Juazeirinho - PB.
- **Cal Carbomil** – Foi utilizada uma cal calcítica hidratada fabricada pela indústria de Limoeiro do Norte, na cidade de Limoeiro do Norte - CE. A cal foi adquirida na indústria e acondicionada em sacos plásticos, para evitar sua hidratação. A cal foi caracterizada em trabalhos anteriores [Farias Filho et al., 2000], sendo observado que a cal é composta por hidróxido de cálcio e pequenas quantidades de sílica, carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio. Na sua composição química foi verificada percentagens de CaO de 69%, MgO de 2,42%, SiO<sub>2</sub> de 0,69%, perda ao fogo de 27,27% e 0,62% de K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O.
- **Areia** - Agregado miúdo – O agregado miúdo utilizado foi uma areia oriunda do Rio Paraíba, armazenada de acordo com sua identificação. Esta areia foi passada na peneira ABNT nº 4 (4,8 mm), sendo desprezado o material retido, com a finalidade de diminuir a influência da zona de transição entre o agregado e a pasta. Para ser utilizada a areia foi seca em estufa a uma temperatura de 100° C, segundo normas da ABNT.
- **Cimento** – Foi utilizado um cimento Portland composto com filler - CPII-F, da marca NASSAU, fabricado pela Companhia de Cimento NASSAU, na cidade de Recife - PE. Este cimento apresenta características compatíveis para a elaboração de argamassas, devido à presença de filler calcário. O

cimento foi adquirido na indústria e acondicionado em sacos plásticos, para evitar hidratação. O cimento foi caracterizado em trabalhos anteriores (Souza, 2007), sendo observado que as propriedades físicas - mecânicas do cimento estão de acordo com os valores das especificações da ABNT, sendo esses valores de: módulo de finura em malha de número 200 (0,074 mm) de 4,38%, massa específica real de 3,04 g/cm<sup>3</sup> e a superfície específica de 4.866,42 cm<sup>2</sup>/g.

### **3.2. Métodos**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram coletadas amostras representativas de resíduos de caulins provenientes de uma indústria beneficiadora existente no município de Juazeirinho no Estado da Paraíba. A partir das amostras coletadas os ensaios de caracterização foram: análise granulométrica em peneiras e através do granulômetro por difração a laser; análise química e difração de raios-X, com a finalidade de determinar o seu estado de cominuição, componentes químicos, fases mineralógicas presentes e ensaios de lixiviação e solubilização para classificar o resíduo de acordo com a norma NBR 10004 (2004) da ABNT. Para caracterização tecnológica das argamassas convencionais e alternativas foram determinadas as atividades pozolânicas, como também os traços para assentamento e revestimento de acordo com as normas NBR 5751 (1992) e 5752 (1992) da ABNT. A Figura 3.1 mostra o fluxograma com as etapas da pesquisa.

#### **3.2.1. Caracterização físico-mineralógica**

- **Análise granulométrica por difração de laser**

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

Para realização desta caracterização, os resíduos foram passados em peneira ABNT n<sup>o</sup> 200 (0,074mm), e dispersa em 250mL de água destilada em agitador Hamilton Beach N5000 a velocidade de 17.000 rpm por 10 min, em seguida esta dispersão foi colocada em um equipamento CILAS modelo 1064,

em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

**Figura 3.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.**

- **Análise Química**

As determinações usuais são: perda ao fogo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . Inicialmente as matérias-primas foram

beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm) e posteriormente caracterizadas quanto à composição química através do Equipamento EDX-900 da marca Shimadzu, pelo método de Espectrofotometria Fluorescente de Raio-X. Os ensaios foram realizados no Centro de Tecnologia em Materiais em Criciúma-SC.

- **Difração de Raios X**

As amostras foram acondicionadas em porta amostra de alumínio para análise por difração de raios X, em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi  $K\alpha$  do Cu (40,0 KV/30,0 mA). A Velocidade do goniômetro:  $0,02^\circ$  para  $2\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões no PDF 02 (ICDD, 2003). Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG.

### **3.2.2. Caracterização ambiental**

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, identificação dos seus constituintes através de análise dos extratos lixiviados e solubilizados, sendo estes constituintes comparados com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde pública e ao meio ambiente é conhecido. Esta classificação ocorre para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados, e constam na norma ABNT NBR-10004 (2004). De acordo com esta norma, os resíduos sólidos são os resíduos no estado sólidos ou semi-sólidos que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A amostra do resíduo de caulim para análise ambiental foi determinada através da mistura de 50% do resíduo grosso e 50% do resíduo fino de caulim. Para os ensaios de lixiviação e solubilização, o resíduo de caulim foi passado em peneira ABNT nº. 3/8" (9,5 mm), sendo separadas duas amostras de aproximadamente 200 gramas. Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Caracterização da CETREL S/A - Empresa de Proteção Ambiental do município de Camaçari no Estado da Bahia.

- **Análise do extrato lixiviado**

Segundo a norma ABNT NBR 10005 (2004), lixiviação é o processo utilizado para determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Os resultados obtidos são utilizados para diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 (2004) como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos. Para a realização desse ensaio foram utilizados os seguintes itens: agitador rotatório de frascos, medidor de pH, frascos de lixiviação (material inerte), aparelho de filtração pressurizado, peneira ABNT n°. 3/8” (9,5mm), balança com resolução de  $\pm 0,01g$ , agitador magnético, béquer de 500ml, etc.

- **Análise do extrato solubilizado**

A obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos foi realizada segundo norma ABNT NBR 10006 (2004). A análise desse extrato visa diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR 10004 (2004) como classe II A – não inertes – e classe II B – inertes. Como requisitos para esse ensaio foram utilizados: agitador, aparelho de filtração, estufa de circulação de ar forçado e exaustão, medidor de pH, balança com resolução de  $\pm 0,01g$ , frasco de 1500ml, peneira ABNT n°. 3/8” (9,5mm), etc.

### **3.2.3. Ensaio Tecnológicos**

#### **3.2.3.1. Atividade Pozolânica**

As amostras coletadas, através da técnica de quarteamento, foram beneficiada através de moagem em moinho tipo galga, em seguida passada em peneira ABNT n° 200 (0,074mm). Atividades pozolânicas dos resíduos estudados foram avaliadas de acordo com as normas da ABNT NBR 5751(1992) e NBR 5752(1992). Os índices de atividade pozolânica foram determinados com os resíduos no estado natural e queimados na temperatura de 600° C durante 2h. As argamassas foram preparadas com cal + resíduo grosso, cal + resíduo fino e cal + 50% de resíduo fino e 50% de grosso. O índice de atividade pozolânica (IAP) é dado pela relação entre a resistência à

compressão da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência. No ensaio de atividade pozolânica com a cal, o resultado é dado através da resistência à compressão simples após 7 d de cura em ambiente com temperatura controlada. Nessa pesquisa adotou-se também o período de cura de 28 d, com o intuito de obter melhores resultados.

### 3.2.3.2. Preparação das argamassas

Na preparação das argamassas convencionais e alternativas foram escolhidos traços usuais para assentamento e revestimento de acordo com a CIGRA - Cia. Industrial Gramame. Nas argamassas alternativas foram incorporados teores de resíduos de caulim nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em peso em substituição ao cimento. Os traços em volume são mostrados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Traços para argamassas alternativas, recomendados pela CIGRA, feitas a partir de traços para argamassas convencionais.**

Traços em volume				
Finalidade	Indicação	Proporção	Resíduo	Materiais
Assentamento de tijolos	CIGRA	1:4:28	0%	cim:cal:areia
			5% resíduo	cim.: cal: areia média: resíduo
			10% resíduo	cim.: cal: areia média: resíduo
			15% resíduo	cim.: cal: areia média: resíduo
			20% resíduo	cim.: cal: areia média: resíduo
Reboco	CIGRA	1:2:9	0%	cim:cal:areia
			5% resíduo	cim.: cal: areia fina: resíduo
			10% resíduo	cim.: cal: areia fina: resíduo
			15% resíduo	cim.: cal: areia fina: resíduo
			20% resíduo	cim.: cal: areia fina: resíduo

### 3.2.3.3. Moldagem dos Corpos de Prova

Após as determinações da atividade pozolânica dos resíduos, foram moldados corpos de prova nos traços 1:4:28 (assentamento de alvenaria) e 1:2:9 (reboco de alvenaria), representados na Figura 3.2, para argamassas convencionais e alternativas incorporados com resíduos de caulim. Os corpos de prova foram moldados em forma cilíndrica com dimensões de 5 cm x 10 cm,

de acordo com a norma da ABNT NBR 7215 (1996), em seguida foram curados em câmara úmida por períodos de 28, 63 e 91 d.

**Figura 3.2 – Ilustração representando as proporções das matérias-primas na preparação dos corpos de prova.**

Após a cura, foi determinada a resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova de acordo com a norma NBR 7215 (1996) da ABNT.

#### **3.2.3.4. Ensaio de resistência à compressão simples**

Para o ensaio de resistência à compressão simples foram moldados corpos de prova para cada composição (traço), sendo 05 para cada período de cura. Após cada período de cura, os corpos de prova foram rompidos de acordo com a NBR 7215 (1996), em prensa de fabricação da Contenco, própria para argamassas, calibrada periodicamente pela Norma da ABNT NBR 6674 (1999) conforme mostra a Figura 3.3.

**Figura 3.3 – Prensa para corpos de prova de argamassa.**

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Caracterização física**

As distribuições do tamanho de partículas dos resíduos estudados estão presentes nas Figuras 4.1 e 4.2.



dados de cimentos Portland CII-F presentes na literatura (Farias Filho et al., 2000; Lima Júnior et al., 2003; Rocha, 2005), que os resíduos apresentam distribuição mais grosseira que a dos cimentos Portland, que em geral, apresentam teor de aproximadamente 95% das partículas com dimensões inferiores a 45 µm. Por outro lado, de acordo com a ABNT NBR 12653 (1992) e a ASTM 618C (1991), um material para ser considerado pozolânico deve apresentar um máximo de 34% retido na peneira ABNT n° 325 (0,044mm), que apresenta abertura de 45 µm. Assim, apesar de ser mais grosso que os cimentos Portland comerciais, os resíduos apresentam características granulométricas de acordo com a normalização para uso como pozolanas.

#### 4.2 Caracterização químico-mineralógica

Na Tabela 4.1 estão apresentadas às composições químicas dos resíduos analisados. Verifica-se que os resíduos apresentam soma dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, superando o valor mínimo de 70% requerido na ABNT NBR 12653 (1992) e na ASTM 618C (1991). Observa-se também que a perda ao fogo, inferior a 10%, o teor de MgO, inferior a 3% e o teor de álcalis em Na<sub>2</sub>O, inferior a 1,5%, também atendem as exigências da normalização (ABNT NBR 12653, 1992; ASTM 618C, 1991).

**Tabela 4.1 – Composição química dos resíduos.**

Resíduos	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
<b>RCG</b>	76,01	16,38	0,70	6,61	traços	traços	traços	0,30
<b>RCF</b>	56,5	36,0	1,00	6,14	0,13	traços	traços	traços

Observa-se que os resíduos apresentam elevado teor de K<sub>2</sub>O, o que, devido à formação geológica de onde é extraído o caulim, pode estar associado a micas e feldspatos presentes no material. Esse elevado teor de K<sub>2</sub>O, caso provenha realmente de mica ou feldspatos, não deve interferir na sua aplicação em argamassas.

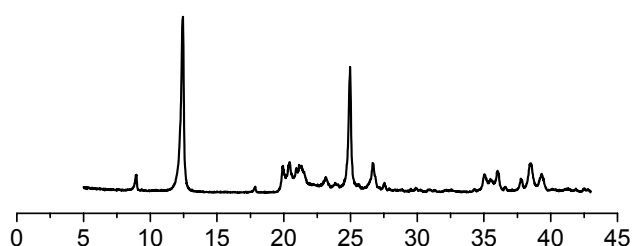
Analisando os valores contidos na Tabela 4.2 com as comparações das características físicas e químicas dos resíduos estudados com as exigências normativas, verifica-se que todos os valores obtidos estão dentro dos resultados especificados.

**Tabela 4.2 – Comparação das características físicas e químicas dos materiais produzidos, com as exigências normativas.**

Determinações	IS 1344 (1968)	ASTM C 618 (1991)	NBR 12653 (ABNT, 1992)	RCG	RCF
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -min	70%	70%	70%	93%	93,5%
SiO <sub>2</sub> - min.	40%	NL	NL	76%	56%
Diâmetro Médio (µm)	NL	NL	NL	35	32
Partículas>45µm-máx	12%	34%	34%	32%	30%
Perda ao Fogo - máx.	5%	10%	10%	8,0%	9,6%

NL: Parâmetro não legislado pela norma em referência

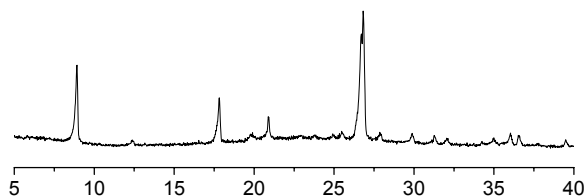
Nas Figuras 4.3 e 4.4 estão apresentadas os padrões de raios x dos resíduos de caulim RCG e RCF no estado natural e após calcinação na temperatura de 600° C por duas horas.



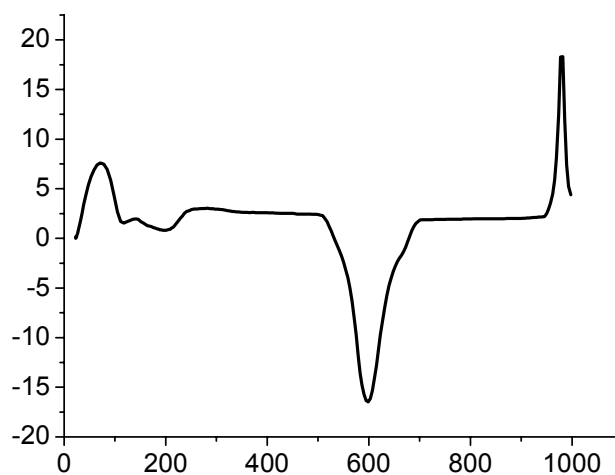
Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Almeida (2006) ao estudar resíduos de caulins da Província Pegmatítica da Borborema.

Com base nos resultados obtidos com a difração de raios X observa-se que o elevado teor de  $K_2O$  nos resíduos é oriundo da mica presente nesses materiais. Os dados da difração de raios X juntamente com a composição química dos resíduos, Tabela 4.1, indicam que o RCG é constituído predominantemente por quartzo e pequenos teores de caulinita e mica, enquanto o RCF é constituído predominantemente por caulinita.

Os padrões de difração de raios X dos resíduos após calcinação a  $600^\circ\text{C}$  por 2h, Figura 4.4, evidenciam que a estrutura cristalina da caulinita presente no RCG foi totalmente destruída com a queima e no RCF restou apenas uma pequena quantidade de caulinita. Assim, observa-se que a queima produziu metacaulinita com a desidroxilação da caulinita, o que provavelmente aumentará em muito a atividade pozolânica dos resíduos.



As curvas da análise térmica gravimétrica dos resíduos evidenciam uma perda de massa distinta entre os dois resíduos, com o RCF apresentando uma perda de massa muito mais acentuada na região relacionada à desidroxilação dos argilominerais. O que indica que o teor de argilominerais é maior no RCF, tal como já observado anteriormente.



### 4.3 Caracterização ambiental

Observando os resultados de lixiviação e solubilização com indicação dos valores obtidos e limite aceitável nas Tabelas 4.3 e 4.4, verifica-se que comparados aos limites máximos definidos nos anexos F e G da norma NBR 10004/04, observa-se que todos os parâmetros no material lixiviado e solubilizado do resíduo grosso e fino do beneficiamento de caulim (50% fino + 50% grosso), estão abaixo do valor legislado o que enquadra este resíduo como Resíduo Classe II B - Resíduo Inerte.

**Tabela 4.3 – Análise do extrato lixiviado.**

Parâmetros analisados	Lixiviado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004
	INORGÂNICOS	
Arsênio	<0,5	1
Bário	0,62	70
Cádmio	<0,01	0,5
Chumbo	<0,05	1
Cromo total	<0,01	5
Fluoreto	0,08	150
Mercúrio	<0,05	0,1
Prata	<0,03	5
Selênio	<0,5	1

**Tabela 4.4 – Análise do extrato solubilizado.**

Parâmetros analisados	Solubilizado (mg/L)		Parâmetros analisados	Solubilizado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004		Amostra	NBR 10004
	INORGÂNICOS			INORGÂNICOS	
Arsênio	<0,01	0,01	Cloreto	114	250
Bário	0,07	0,7	Cobre	0,01	2
Cádmio	<0,005	0,005	Índice de fenóis	<0,01	0,01
Chumbo	<0,01	0,01	Ferro	0,02	0,3
Cromo total	<0,01	0,05	Manganês	0,08	0,1
Fluoreto	<0,05	1,5	Nitrato	<0,1	10
Mercúrio	<0,001	0,001	Sódio	48	200
Prata	<0,005	0,05	Sulfato	24	250
Selênio	<0,5	0,01	Surfactantes	<0,05	0,5
Alumínio	0,07	0,2	Zinco	0,09	5
Cianeto	<0,012	0,07	-	-	-

Segundo a NBR 10004 (2004) da ABNT, quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, são considerados como resíduos classe II B – inertes.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados adicionais dos ensaios de caracterização ambiental do resíduo onde se pode concluir que o resíduo de caulim não é corrosivo (item 4.2.1.2 da NBR 10.004/2004), conforme evidencia os dados da tabela.

**Tabela 4.5 – Resultados adicionais da caracterização ambiental.**

<b>Informações adicionais</b>	<b>Resultado</b>	
<b>Determinação da solução extratora</b>	Solução n°. 1 (conforme item 5.1.3 da NBR 10.005/04)	
<b>Teor de resíduo seco</b>	100%	
<b>pH do extrato</b>	Inicial	Final
	4,43	5
<b>Tempo total de lixiviação</b>	18h00min horas	
<b>Teste de Corrosividade (pH 1:1)</b>	4,4	

De acordo com a norma ABNT NBR 10004 (2004), um resíduo é caracterizado como corrosivo se uma amostra representativa dele, obtida segundo a ABNT NBR 10007 (2004), apresentar uma das seguintes propriedades:

- a) ser aquosa e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5, ou sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5;
- b) ser líquida ou, quando misturada em peso equivalente de água, produzir um líquido e corroer o aço (COPANT 1020) a uma razão maior que 6,35 mm ao ano, a uma temperatura de 55°C, de acordo com USEPA SW 846 ou equivalente.

#### **4.4 Atividade pozolânica**

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 estão apresentados os valores do índice de atividade pozolânica das argamassas alternativas incorporadas com resíduos de caulim no estado natural de acordo com as normas da ABNT NBR 5751(1992) e NBR 5752 (1992) para cal e cimento respectivamente, e com resíduos de caulim calcinados. Analisando os resultados da Tabela 4.6, verifica-se que as argamassas com cal incorporadas com resíduos de caulim no estado natural apresentaram baixo índice de atividade pozolânica. Segundo a Norma da ABNT NBR-12653 (1992) um material pode ser considerado pozolânico quando sua resistência à compressão simples for superior ou igual a 6,0 MPa. Para os resíduos de caulim calcinados na temperatura de 600° C, durante 2h, verifica-se que os resultados de índice de atividade pozolânica foram superiores aos especificados pela norma da ABNT, isto pode ser justificado, pelo tratamento térmico, ou seja, quando o argilomineral caulinitico presente no resíduo de caulim está submetido a uma temperatura superior a 600°C, sua estrutura cristalina é modificada transformando em amorfa (metacaulinita) ou em silicatoaluminato com estrutura desordenada, estes dados são semelhantes aos obtidos por BENSTED & MUNN (2001).

Analisando os resultados da Tabela 4.7, verifica-se que as argamassas com cimento, contendo resíduos de caulim no estado natural e calcinado na temperatura de 600° C apresentam índices de atividade pozolânica. Segundo a Norma da ABNT NBR-5251 (1992) um material pode ser considerado pozolânico quando a diferença entre resistência à compressão simples da argamassa convencional e a incorporada com resíduo for superior ou igual a 75,0%. Esta elevação do índice de atividade pozolânica, pode ser justificada, pelo fato de que na hidratação do cimento Portland o hidróxido de cálcio é produzido, sendo, este consumido pela reação pozolânica formando um silicato de cálcio hidratado (MONTANHEIRO, et al. (2003)). Estes resultados são similares aos obtidos por SOUZA (2002) com argilas calcinadas incorporada ao cimento Portland.

**Tabela 4.6 – Índice de atividade pozolânica com cal.**

Resíduos	Índice de Atividade Pozolânica (MPa)	
	7 d	28 d
RCG	0,60	2,45
RCF	0,47	2,90
50%RCG+50%RCF	0,46	2,55
50%RCG+50%RCF Calcinado 600° C	15,63	18,68

**Tabela 4.7 – Índice de atividade pozolânica com cimento.**

Resíduos	Índice de Atividade Pozolânica (%)
	28 d
RCG	79,43
RCF	87,52
50%RCG+50%RCF	78,07
50%RCG+50%RCF Calcinado 600° C	98,80

#### 4.5 Resistência à compressão simples (RCS)

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF, para o traço 1:4:28 utilizado em assentamento de tijolos de alvenarias, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.

Analisando os valores das RCS contidos na Tabela 4.8, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim foram superiores aos convencionais, sendo os valores máximos de 0,90 MPa (argamassas incorporadas com 5% de RCG) e 1,20 MPa (argamassas incorporadas com 15% de RCF) para períodos de cura de 91 d. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28d de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

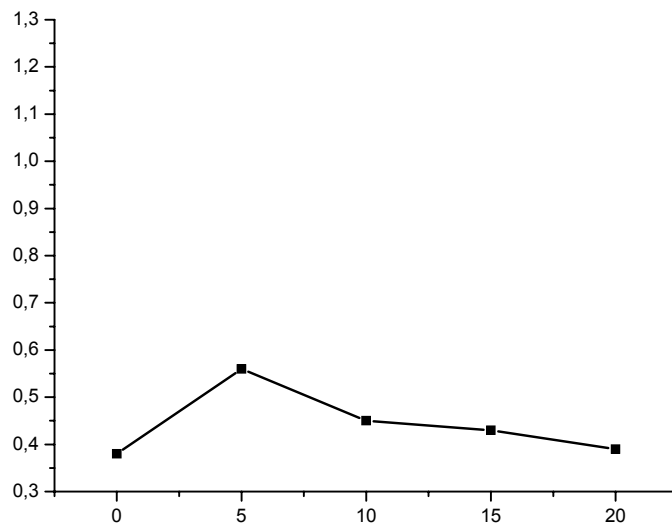


**Tabela 4.8 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, para o traço 1:4:28, em estado natural, utilizados em assentamento de tijolos de alvenarias.**

Amostra	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (MPa)		
		Tempo de Cura		
		28 d	63 d	91 d
Referência	0	0,38	0,40	0,40
RCG	5	0,56	0,68	0,90
	10	0,45	0,56	0,70
	15	0,43	0,49	0,74
	20	0,39	0,43	0,79
RCF	5	0,60	0,71	0,98
	10	0,56	0,74	1,02
	15	0,55	0,95	1,20
	20	0,56	0,72	1,10

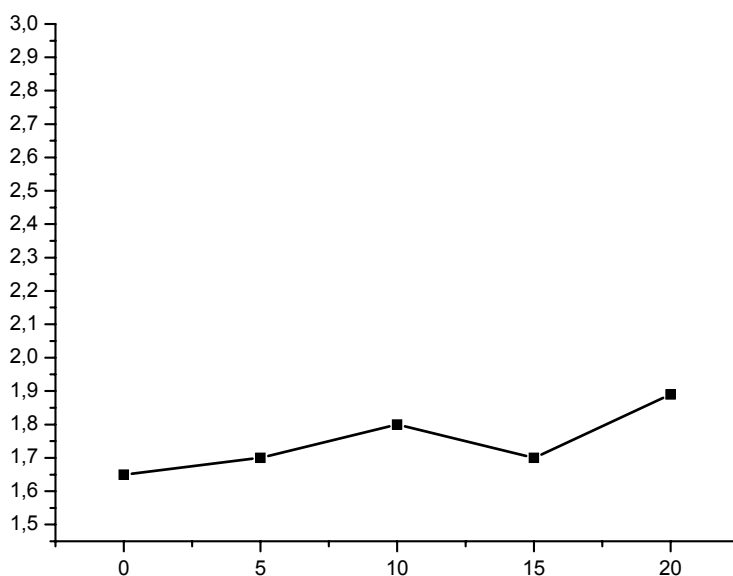
Na Figura 4.7 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF, para o traço 1:4:28 utilizado em assentamento de tijolos de alvenarias, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.

Analisando as curvas da Figura 4.7 verifica-se de maneira geral que, os corpos-de-prova incorporados com 5% de resíduos de caulim foram os que obtiveram melhor comportamento mecânico em relação aos convencionais, sendo o aumento máximo da RCS na ordem de 58% (RCF), o que corresponde a 0,22 MPa, para 28 d de cura. Os corpos de prova incorporados com RCF foram os que obtiveram melhor comportamento mecânico em relação ao RCG, sendo os melhores resultados para os corpos de prova incorporados com 15% de resíduos para 91 d de cura, estes acréscimos, provavelmente poderão ser atribuídos às características físicas dos resíduos, quando incorporados às argamassas produzem um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, densificando essa zona e, conseqüentemente, aumentando a resistência da argamassa (Baronio & Binda, 1997), já que esse resíduo apresenta baixa atividade pozolânica. Os resultados de resistência obtidos são superiores aos apresentados por Rocha (2005), o que evidencia que a utilização de resíduos de caulim RCG ou RCF possibilita produzir argamassas com desempenho mecânico superior as convencionais.



Analisando os valores das RCS contidos na Tabela 4.9, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim foram superiores aos convencionais, sendo os valores máximos de 2,70 MPa (argamassas incorporadas com 10% de RCG) e 2,80 MPa (argamassas incorporadas com 10% de RCF) para período de cura de 91 d. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

Na Figura 4.8 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenarias, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.



MPa, para o período de cura de 28 d. Os corpos de prova incorporados com RCF obtiveram valores de RCS superiores aos RCG. O acréscimo pode ser provavelmente atribuído às características físicas dos resíduos, quando incorporados às argamassas produzem um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, densificando essa zona e, conseqüentemente, aumentando a resistência da argamassa (Baronio & Binda, 1997). Os resultados de resistência obtidos foram superiores aos apresentados por Rocha (2005), o que evidencia que a utilização de resíduos de caulim RCG ou RCF possibilita produzir argamassas com desempenho mecânico superior as convencionais.

Na Tabela 4.10 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF calcinado na temperatura de 600° C, para o traço 1:4:28 utilizado em assentamento de tijolos de alvenarias, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.

Analisando os valores das RCS contidos na Tabela 4.10, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim foram superiores aos convencionais, sendo os valores máximos de 1,46 MPa (argamassas incorporadas com 15% de RCG) e 1,85 MPa (argamassas incorporadas com 15% de RCF) para períodos de cura de 91 d. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28d de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

**Tabela 4.10 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, calcinado na temperatura de 600° C, para o traço 1:4:28 utilizados em assentamento de tijolos de alvenarias.**

Amostra	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (MPa)		
		Tempo de Cura		
		28 d	63 d	91 d
Referência	0	0,38	0,40	0,40
RCG	5	0,51	0,72	0,83
	10	0,83	1,04	1,32
	15	1,00	1,14	1,46
	20	0,66	0,92	1,13
	5	0,83	1,07	1,33
	10	1,15	1,33	1,55
	15	1,25	1,49	1,85

Analisando as curvas da Figura 4.9 verifica-se que os corpos-de-prova incorporados com 15% de resíduos de caulim foram os que obtiveram melhor comportamento mecânico em relação aos convencionais, sendo o aumento máximo da RCS na ordem de 228% (RCF), o que corresponde a 0,87 MPa, para 28 d de cura. O aumento na resistência das argamassas contendo resíduos calcinados em relação aos convencionais está relacionado tanto ao efeito de densificação como pela ação química dos resíduos, como também a elevada atividade pozolânica.

Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF calcinado na temperatura de 600° C, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.

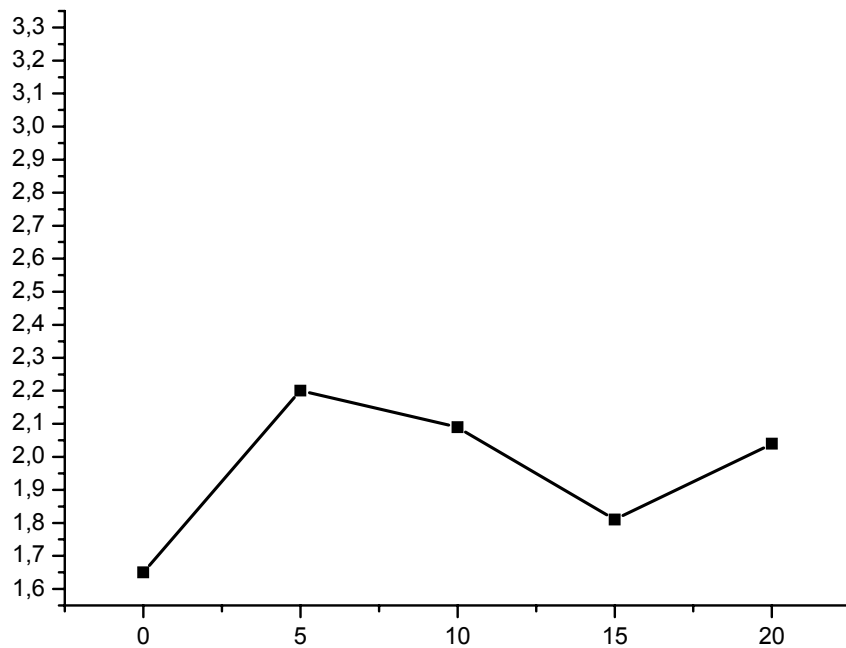
**Tabela 4.11 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com RCG e RCF, calcinado na temperatura de 600° C, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria.**

Amostra	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (MPa)		
		Tempo de Cura		
		28 d	63 d	91 d
Referência	0	1,65	2,22	2,35
RCG	5	2,20	2,64	3,21
	10	2,09	2,67	3,09
	15	1,81	2,08	2,69
	20	2,04	2,39	2,60
RCF	5	2,33	2,79	3,08
	10	2,20	2,90	3,24
	15	1,80	2,08	2,52
	20	2,02	2,49	2,86

Analisando os valores das RCS contidos na Tabela 4.11, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim foram superiores aos convencionais, sendo os valores máximos de 3,21 MPa (argamassas incorporadas com 5% de RCG) e 3,24 MPa (argamassas incorporadas com 10% de RCF) para período de cura de 91 d. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como

argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

Na Figura 4.10 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos de caulim RCG e RCF calcinado na temperatura de 600° C, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.



os corpos de provas incorporados com teores de resíduos superiores a 5%, os valores de RCS começaram a decrescer, com exceção dos corpos de prova incorporados com 10% de RCF, estes decréscimo pode ser atribuído ao elevado teor de resíduo presente na argamassa.

De forma geral, as argamassas contendo resíduos calcinados apresentam resistência superior àquelas contendo resíduos naturais, o que está relacionado à maior atividade pozolânica do resíduo calcinado. Nesse sentido, acredita-se, que pelas características físicas dos resíduos, o aumento na resistência das argamassas contendo resíduo natural está muito associado a uma ação física dos resíduos, que produzem um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, densificando essa zona e, conseqüentemente, aumentando a resistência da argamassa (BARONIO & BINDA, 1997). Por outro lado, o aumento na resistência das argamassas contendo resíduos calcinados está relacionado tanto ao efeito de densificação como pela ação química dos resíduos, já que apresentam elevada atividade pozolânica.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos RCG+RCF com e sem calcinação, para o traço 1:4:28 utilizado em assentamento de tijolos de alvenarias, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.

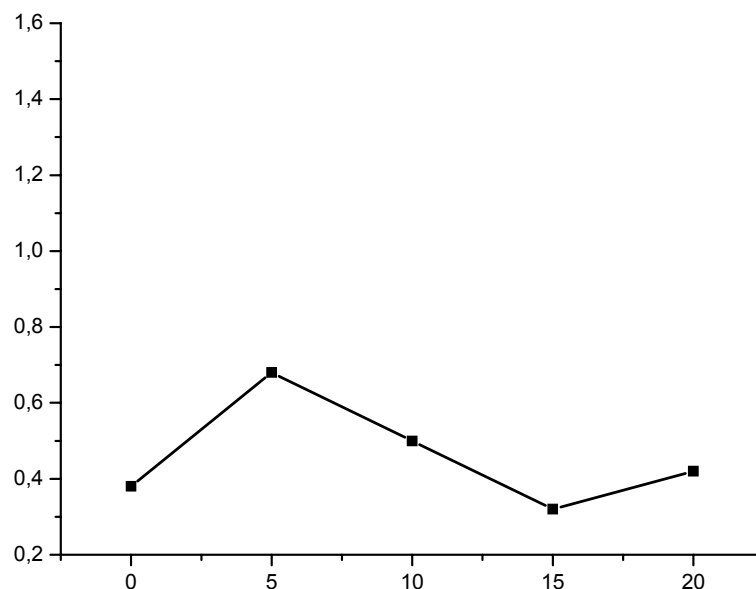
**Tabela 4.12 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com 50%RCG+50%RCF, com e sem calcinação, para o traço 1:4:28 de assentamento de tijolos de alvenarias.**

Amostra	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (MPa)		
		Tempo de Cura		
		28 d	63 d	91 d
Referência	0	0,38	0,40	0,40
50%RCG+50%RCF	5	0,68	0,74	1,00
	10	0,50	0,51	0,75
	15	0,32	0,33	0,64
	20	0,42	0,48	0,64
50%RCG+50%RCF Calcinado 600° C	5	0,67	0,73	0,89
	10	0,66	0,83	1,02
	15	0,97	1,18	1,45
	20	0,85	0,95	1,24



Analisando os valores das RCS contidos na Tabela 4.12, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova incorporados com resíduos RCG+RCF foram superiores aos convencionais, sendo os valores máximos de 1,00 MPa (5% de resíduos RCG+RCF sem calcinação) e 1,45 MPa (15% de resíduos RCG+RCF com calcinação) para período de cura de 91 d. Os valores de RCS dos resíduos de caulim com calcinação foram superiores aos sem calcinação. Isto pode ser justificado pelo fato de que os resíduos calcinados apresentaram elevado índice de atividade pozolânica (Tabelas 4.6 e 4.7). Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28 d de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

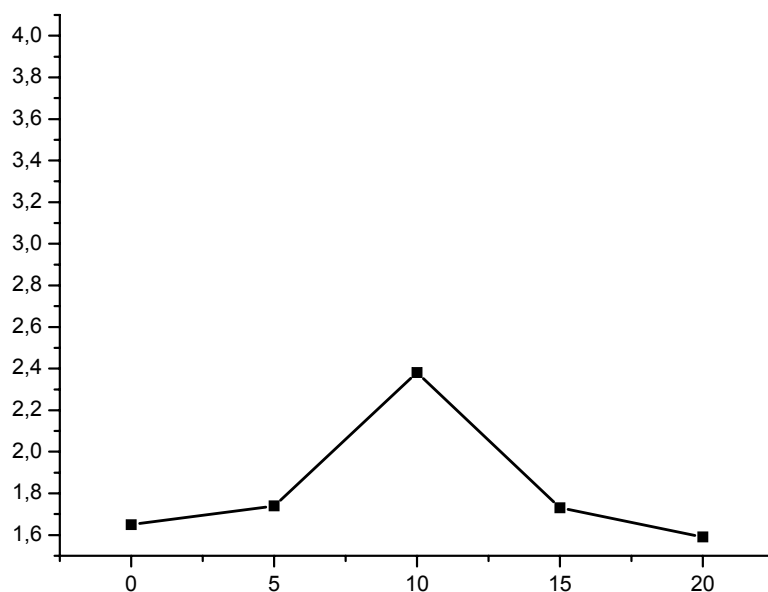
Na Figura 4.11 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos RCG+RCF com e sem calcinação, para o traço 1:4:28 utilizado em assentamento de tijolos de alvenaria, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.



Analisando as curvas da Figura 4.11 verifica-se que, para os corpos de prova incorporados com 5% de resíduos RCG+RCF sem calcinação obtiveram valores de RCS superiores em relação aos convencionais, sendo o aumento na ordem de 79%

3,44 MPa (15% de resíduos RCG+RCF sem calcinação) e 3,96 MPa (15% de resíduos RCG+RCF com calcinação) para período de cura de 91 d. Os valores de RCS dos resíduos de caulim com calcinação foram superiores aos sem calcinação. Isto pode ser justificado pelo fato de que os resíduos com calcinação apresentaram elevado índice de atividade pozolânica (Tabelas 4.6 e 4.7). Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28 d de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

Na Figura 4.12 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com resíduos RCG+RCF com e sem calcinação, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria, curado por períodos de 28 d, 63 d e 91 d.



ordem de 44%, o que corresponde a 0,73 MPa para 28 d de cura. Para os corpos de prova incorporados com 15% de resíduos RCG+RCF calcinado obtiveram melhor comportamento mecânico em relação aos alternativos sem calcinação e aos convencionais, sendo esse crescimento da ordem de 46% (1,09 MPa) e 68% (1,61 MPa) respectivamente, em relação à RCS obtida aos 91 d de cura. O acréscimo nos valores de RCS dos corpos de prova com resíduo de caulim calcinado pode ser atribuído ao índice de atividade pozolânica elevada (Tabelas 4.3 e 4.4).

Estudos (Farias Filho et al., 2000; Coimbra et al., 2002; Oliveira & Barbosa, 2006) observaram melhoras na resistência à compressão simples de argamassas cimento:areia quando da utilização de materiais pozolânicos a base de metacaulinita, (produzidos pela desidroxilação de caulinitas presentes em caulins ou em resíduos caulíníticos) em substituição parcial ao cimento. Verificou-se que o material pozolânico poderia substituir o cimento em teores de até 40%, representando uma grande economia energética, já que o material pozolânico requer temperaturas de queima da ordem de um terço das utilizadas para produzir clínquer. O que tem grandes implicações ecológicas e econômicas, favorecendo o desenvolvimento sustentável e possibilitando a redução dos custos dos materiais de construção. Assim, observa-se que a presente pesquisa vem ao encontro dos resultados da literatura, na busca por alternativas ecologicamente e energeticamente mais eficientes para produção de materiais de construção de baixo custo, evidenciando uma matéria-prima alternativa com elevada potencialidade para produção de pozolanas e utilização em argamassas.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

### **5.1. Conclusões parciais**

Após incorporação dos resíduos de caulim, para utilização em argamassas de alvenarias para uso em construção civil, pode-se concluir que:

- os resíduos do beneficiamento do caulim são constituídos por caulinita, quartzo e mica, apresentam larga distribuição granulométrica e composição química de acordo com os requisitos da normalização para materiais pozolânicos;
- os resíduos de caulim foram classificados como Resíduos Não Perigosos e Inertes, de acordo com as normas técnicas;
- os ensaios que determinam o índice de atividade pozolânica com a cal e com o cimento demonstraram que os resíduos no estado natural apresentam baixa atividade pozolânica, enquanto os resíduos após calcinação apresentam índices de atividade

## **5.2. Conclusões finais**

Através dos resultados obtidos no presente trabalho, constatou-se que a obtenção de pozolanas de alta reatividade oriundas dos resíduos de caulim calcinados, proporcionou às argamassas produzidas com até 20% de incorporação acréscimo na sua resistência mecânica em comparação com as argamassas convencionais e as normas da ABNT. Recomenda-se a substituição de parte do cimento Portland por resíduos de caulim para uso em argamassas para assentamento e revestimento de parede de alvenaria, concomitantemente estará contribuindo de maneira significativa para a redução do impacto ambiental.

## **CAPÍTULO 6 – POSSÍVEIS LINHAS DE PESQUISAS**

A partir deste trabalho propõem-se como futuras linhas de pesquisas:

- verificar a atividade pozolânica e durabilidade dos resíduos de caulim após queima nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C;
- avaliar a durabilidade dos materiais alternativos através de câmara climatizada em diversas temperaturas e umidade relativa;
- avaliar o efeito da penetração da carbonatação na durabilidade das argamassas alternativas incorporadas com esses resíduos;
- avaliar a incorporação dos resíduos de caulim misturados na proporção: 70% de resíduo grosso de caulim + 30% do resíduo fino de caulim, nas argamassas alternativas;
- avaliar a incorporação dos resíduos de caulim para outros tipos de argamassas; e
- avaliar o efeito da carbonatação e da atividade pozolânica das argamassas alternativas através da difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Lixiviação de Resíduos – Procedimento, **NBR-10005**, Rio de Janeiro, 2004.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solubilização de resíduos - Procedimento, **NBR-10006**, Rio de Janeiro, 2004.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Amostragem de Resíduos – Procedimento, **NBR-10007**, Rio de Janeiro, 2004.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland Comum, **NBR 5732**, Rio de Janeiro, 1991.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland Pozolânico, **NBR 5736**, Rio de Janeiro, 1991.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**



**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão, **NBR – 7215**, Rio de Janeiro, 1996.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Materiais pozolânicos, **NBR-12653**, Rio de Janeiro, 1992.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Argamassa Industrializada para Assentamento de Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos – Especificação e Métodos de Ensaio, **NBR-13281**. Rio de Janeiro, 1995.

**ALMEIDA, R. R.** Reciclagem de resíduo de caulim e granito para produção de blocos e telhas. Campina Grande: CCT/UFCG, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Dissertação de Mestrado, 2006.

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: ASTM C 618, 3p. In Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1991.

**AMORIM, L.V.** Influência da área específica na reatividade do sistema pozolana-cal visando a obtenção de aglomerantes alternativos, Dissertação de Mestrado, Campina Grande, PB, 1999.

**ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO**, DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2006.

**ARAÚJO, E. S. de.** Utilização dos resíduos de serragem de granitos na produção de tijolos sílica-cal para uso em construção civil. Campina Grande – PB, Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2002.

**ARMANGE, L. C.; NEPPEL, L. F.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A.** Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa, Revista matéria, v. 10, n. 1, pp. 51-62, 2005. Disponível em: [www.materia.coppe.ufri.br/sarra/artigos/artigo10631](http://www.materia.coppe.ufri.br/sarra/artigos/artigo10631). Acesso em 05/02/2008.

**AZEREDO, HÉLIO ALVES DE.** O Edifício e o seu acabamento. São Paulo: Edgard Blücher, 1987.

**BARATA, M.S.** Concreto de alto desempenho no Pará, estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego da adição de sílica-ativa e metacaulim, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

**BARATA, M. S.; MOLIN, D. C. C.** Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

**BARONIO, G. e BINDA, L.** Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, v.11, n.1, p.41-46, 1997.

**BAUER, R. J. B.** Falhas em revestimento, Anais do Encontro Argamassas Industrializadas – Usos e Desempenho, São Paulo, 1993.

**BENSTED, J.; MUNN, J.** A discussion of the paper “ the use of waste ceramic tile in cement production”. *Cement and Concrete Research*, n.31, pp. 161-162, 2001.

**BRISTOW, C. M.** Kaolin paper underpins current demand. *Industrial Minerals*, p.62-67, July, 1987.

**CALLEJA, J.** Las Pozolanas. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1958.

**CASTRO SOBRINHO, J. F.** Pozolana como Material de Construção – Sua fabricação especial em Urubupungá, Centrais Elétricas de São Paulo, São Paulo, 1970.

**CINCOTTO, M. A.; MARQUES, J.C.; HELENE, P.R. L.** Aproveitamento de Materiais Residuais na Produção de Cimento de Alvenaria – Metodologia, Seminário sobre Argamassas, Instituto Brasileiro de Concreto, São Paulo, 1985.

**COIMBRA, M. A.; SANTOS, W. N. dos; MORELLI, M. R.** Recuperação de resíduos inorgânicos para construção civil, *Cerâmica*, 48 (306), 2002.

**COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R.** Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland, Cerâmica, v. 50, n. 316, São Paulo, 2004. Disponível em: [www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttex&pid=50366-69132004000400004](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttex&pid=50366-69132004000400004), Acesso em 04/02/2008.

**DAVIS, R.** A review of pozzolanic material and their use in concrete, USA, 1949.

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN,** Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 35, 2006.

**FARIA, D. F.; OLIVEIRA, P. S. M. de; SANTOS, R. J. dos; ORTEGA, F. S.; ALBERTS, A. P. F.** Reaproveitamento de resíduos sólidos de indústria química para produção de argamassas, X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro latino Americano de Pós Graduação – Universidade do Vale da Paraíba, São José dos Campos – São Paulo, 2006.

**FARIAS FILHO, J.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D..** Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.3, p.437-444, 2000.

**FELLENBERG, G.** Introdução aos problemas da poluição ambiental. 2ª Edição. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 193p, 1980.

**FRAGATA, A.; VEIGA, M. do R.; VELOSO, A. L.; FERREIRA, V. M.** Incorporação de resíduos de vidro em argamassa de revestimento – avaliação de sua influência nas características das argamassas, 2º Congresso Nacional de Argamassa de Construção, Lisboa, 2007.

**GRIM, R.E.** Clay Mineralogy, New York, Macgraw – Hill, 1958.

**GUIMARÃES, L.C.** Utilização do resíduo proveniente da produção do caulim como “Filler” no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) Pesquisa PIBIC, CNPq, DEC/CCT/UFCG, 2004.

**HANSON, A.** European GCC. A fine, fine filler. Industrial Minerals, Jun, p.49-57, 1996.

**IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração.** Mineração e Meio Ambiente. Brasília, DF. Comissão técnica de meio ambiente, 1984.

**INDIAN STANDARDS INSTITUTION (IS).** Specification for burnt clay pozzolan. IS 1344, New Delhi, 1968.

**JOHN, V.M.** Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 102p, 2000.

**KAGUE, C. S. P.; RAMIRO, P. E. L.; SALES, A.; SOUZA, F. R.** Concretos e argamassas reciclados com lodo de estação de tratamento de água e entulho de concreto, Congresso de iniciação científica, 15, 2007, São Carlos, Anais de Eventos da UFSCar, v.3, p.336, 2007.

**KIHARA, Y.** Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil., Cerâmica 28 (145), 15, 1982.

**KIYOHARA, P. K.** Estudos ópticos, eletrônicos e tecnológicos de caulins brasileiros visando a sua utilização na indústria de papel. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1984.

**LIMA, J. B. M.** Cais Pozolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico, Dissertação de Mestrado, CCT/DEC/UFPB, 1993.

**LIMA, M. S.** Utilização de resíduo de caulim para uso em blocos de concreto sem função estrutural. Campina Grande – PB, Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

**LIMA, et al.** Utilização de resíduo de caulim para uso em blocos de concreto sem função estrutural.. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51, 2006. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau, SC, pp. 1-12, 2006.

**LUZ, A. B. da. e CHAVES, A. P.** Tecnologia do caulim: ênfase na indústria de papel. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

**LUZ, A. B.** Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 1995.

**MASSAZZA, F.** Chimica delle Aggiunte Pozzolaniche e dei Cementi di Miscela, Il Cement, 1976.

**MASSAZZA, F.** Chimica delle Aggiunte Pozzolaniche e dei Cementi di Miscela, Il Cement, 73 (1) 3-38, Roma, 1974.

**MASSAZZA, F.** Pozzolanic Cements, Cement & Concrete Composites, v.15, p. 185 – 214, 1993.

**MASTOKI, A.** Utilização de Pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira, Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

**METHA K.** Natural Pozzolans. Supplementary. Cementing Materials for Concrete, CANMET-SP- 86-8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa, v.1, p 1-33, 1987.

**METHA K.; MONTEIRO, J. P.** Concreto: Estrutura, propriedades e materiais, São Paulo, PINI, 1994.

**MIELLENZ, R. C.; GREENE, K. T.; SCHIELTZ, N. C.** Natural pozzolans for concrete. Economic Geology, 46: 311-328, 1951.

**MONTANHEIRO, et al.** Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri,SP. Revista do Instituto Geológico, São Paulo,V.23, nº1, p.13-24, 2002.

**MONTANHEIRO, et al.** Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: Difractometria de raios-X como método alternativo. Revista do Instituto Geológico, São Paulo,V.24, nº2, p.1-9, 2003.

**MOTA, N. M. B.** Cais pozolânicas para uso em argamassas de revestimento e alvenarias , Dissertação de Mestrado, Campina Grande – Paraíba, 1994.

**MURRAY, H. H.** Clays. In: Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 5. ed. Weinheim: VHC, Verlagsgesellschaft, v.A7, p.109-136, 1986.

**OLIVEIRA, et al.** Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT, 2004. Anais Conferência Brasileira de Materiais.

Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT 2004, Pirassununga, SP, pp. 337-378, 2004.

**OLIVEIRA, M. P.; 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.

**RIBEIRO, V. A. S.; SILVA, A. L. da; SILVA, M. R. da; DIAS, J. C.** Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassa, Revista matéria, v.12, n. 2, 2007. Disponível em: [www.materia.coppe.ufrj.br/sorra/artigos/artigo10902](http://www.materia.coppe.ufrj.br/sorra/artigos/artigo10902). Acesso em: 29/01/2008.

**ROCHA, A. K. A.** Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria. Campina Grande – PB, Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

**ROCHA, et al.** Incorporation of kaolin residue in masonry mortar. In: ANAIS International Conference on Energy, Environment and Disaster (INCEED 2005), Charlotte, NC, USA, pp. 1-12, 2005.

**ROSKIL INFORMATION SERVICE LIMITED**, The economic of Kaolin, 2 Clapham Road, London, SW9 OJA, UK, 9 ed., p. 7, 1996.

**RUAS, A. P. L.** Produção de Pozolana Artificial, 25ª Reunião de Técnicos da Indústria de Cimento, ABCP, São Paulo, 1977.

**SILVA, C. R.** Cais Aditivadas com Pozolana e Cimento Portland, Dissertação de Mestrado, CCT/DEQ/UFPB, Campina Grande – PB, 1982.

**SILVA, S. P. da.** Balanço Mineral Brasileiro, Distrito do DNPM-PA, 2001.

**SANTOS, P. S.; SOUSA SANTOS, H. L.** Estudos sobre a composição mineralógica de caulins primários e secundários do Brasil. Cerâmica , v. 15, n. 57/58, p.21-44, 1959.

**SOUZA SANTOS, P.** Ciência e Tecnologia de Argilas, 2a edição revisada e ampliada, v. 1, p 113; v, 2, p 468-505; Editora Edigar Blucher, 1989.

**SOUZA, et al.** Avaliação de argamassas com cinza e casca de arroz. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51, 2007. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, BA, pp. 1-12, 2007.

**SOUZA, P. S. L.** Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). Engenharia Civil, nº. 15, pp. 45-54, 2002.

**TRIGO, A. P. M.; MARQUES, A. C.; AKASAKI, J. L.; MARINHO, J. R. D.** Argamassa com adição de resíduos de borracha submetida à elevada temperatura, Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto, C3C2005, VIII, p. III 55-63, IBRACON, 2005.

**ZAMPIERI, V.A.** Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 1989.

**WILD, S.; SABIR, B. B., KHATIB, J. M.** Factors influencing strength development of concrete containing silica fume, Cement and concrete research New York, v. 25, n. 7, p. 1567-1580, 1995.

**WILD, S.; KHATIB, J. M., JONES, A.** Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and concrete research, New York, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.