



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



Suellen Lisboa Dias

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO PARA USO EM CONSTRUÇÃO
CIVIL- AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA**

Campina Grande- PB

2010

Suellen Lisboa Dias

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO PARA USO EM CONSTRUÇÃO
CIVIL – AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA**

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. Romualdo Rodrigues Menezes

Agência Financiadora: CNPq

Campina Grande-PB

2010

UFCG

| | |
|------------------------------|----------|
| UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I | |
| 689 | 30-04-06 |

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

D541i
2010

Dias, Suellen Lisboa.

Incorporação de resíduos de calium em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil – avaliação da atividade pozolânica /Suellen Lisboa Dias. – Campina Grande, 2010.

171 f.: il.

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

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves.

Referências.

1. Resíduo de Calium. 2. Atividade Pozolânica. 3. Argamassa. I. Título.

CDU 666.971 (043)

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO PARA USO EM CONSTRUÇÃO CIVIL
– AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA.**

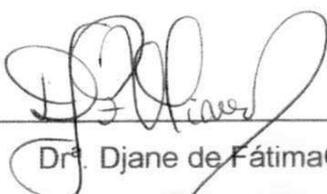
Suellen Lisboa Dias



Dissertação Aprovada em 05/03/2010 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:


Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
UAEMa – UFCG


Dr. Romualdo Rodrigues Menezes
Co-Orientador
DEMat – UFPB


Dr. Djane de Fátima Oliveira
Examinadora Externa
UEPB



A minha família, por sempre me apoiar em todos os momentos e que com carinho, força e compreensão sempre me acolhe. Família esta que me impulsiona a lutar sempre mais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo o que Ele tem feito em minha vida, pelas suas bênçãos derramadas sobre mim em todos os momentos.

A minha família, irmãos e irmãs queridas, que sempre se esforçaram para me ajudar, não deixando de me apoiar e incentivar no decorrer dos meus estudos, a eles todo meu carinho e gratidão.

A minha segunda família, meu sogro e minha sogra, pelas palavras de incentivo e força que dia-a-dia me dedicam, meu carinho de sempre.

Ao meu esposo, meu suporte, minha calma, meu incentivo de todas as horas, meu agradecimento carinhoso.

Ao professor Gelmires de Araújo Neves pelo apoio nos momentos que decorreram de toda a pesquisa, pelo apreço e carinho o qual me foi transmitido.

Ao professor amigo Romualdo Rodrigues Menezes, pela atenção e consideração que me foi dedicada, diante de sua simplicidade e humildade em me ajudar.

À UFCG junto ao Laboratório de Reciclagem pelo apoio estrutural na realização dos ensaios e pesquisas. Aos alunos de pós-graduação da UFCG, Juliana Melo, Andréa Lopes, Izabelle Marrie, Ana Maria, Lizandra Campos, Francisco Augusto, Francisco Kegenaldo e os funcionários dos laboratórios, pelo empenho no decorrer da realização dos ensaios e colaboração no desenvolvimento do presente estudo.

Aos amigos de sempre, e aos amigos que fiz durante esta etapa, conhecer vocês foi muito bom e gratificante para mim.

A agência financiadora CNPq, pelo consentimento da bolsa durante a realização deste trabalho.

A todos meus sinceros agradecimentos pelo apoio que me foi dado.

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO PARA USO EM CONSTRUÇÃO CIVIL- AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA

RESUMO

Nos últimos anos, questões relacionadas ao impacto ambiental, causado por diversas fontes poluidoras, têm sido discutidas em todo o mundo. Entre elas a grande geração de resíduos urbanos e industriais. Os resíduos provenientes das atividades mineradoras, em especial a do beneficiamento do caulim, apresentam intensa formação e acúmulo de rejeitos. Durante o beneficiamento são gerados dois tipos de rejeitos, denominados no meio mineiro por “grosso” e “fino”. Os quais não apresentam valor comercial, e por isso são descartados pelas empresas mineradoras indiscriminadamente no meio ambiente. Visando a preservação ambiental, assim como a reutilização deste resíduo, este trabalho tem por objetivo avaliar a atividade pozolânica do resíduo e a sua incorporação em argamassas de assentamento e revestimento para uso na construção civil. Foram utilizados o resíduo “grosso” e o resíduo “fino”. Como material alternativo para a obtenção de pozolanas na confecção de argamassas. Os resíduos foram caracterizados através da determinação de análise granulométrica, composição química, difração de raios X, análise térmica diferencial e gravimétrica. Os mesmos sofreram calcinação a 600°, 700° e 800° C e após esta etapa determinado os índices de atividade pozolânica de acordo com as normas da ABNT. Foram formuladas argamassas contendo proporções de 80%/20%, 70%/30%, 60%/40% e 50%/50% de resíduos “grosso/fino”. Foram estudados os índices de atividade pozolânica dos resíduos calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C por duas horas, incorporados às argamassas com proporções de RCG e RCF diferenciadas, sendo 80%RG+20%RF, 70%RG+30%RF, 60%RG+40%RF e 50%RG+50%RF. Os resultados evidenciaram que os resíduos de caulim quando calcinado em temperaturas superiores a 700° C apresenta elevada atividade pozolânica e que as argamassas alternativas quando incorporadas com resíduos de caulim calcinados apresentam desempenho mecânico superior as normas ABNT e ASTM.

Palavras – Chave: Resíduo de Caulim, Atividade Pozolânica, Argamassa.

**INCORPORATION OF KAOLIN PROCESSING WASTE IN BASED AND
COATING MORTARS FOR USE IN BUILDING CONSTRUCTION –
AVALIATION OF POZZOLANIC ACTIVITY**

ABSTRACT

In recent years, issues related to environmental impact, caused by various sources polluters have been discussed throughout the world. Among them the great generation of urban and industrial waste. The waste from companies activities, in particular the milling of China clay, featuring intense training and accumulation of tailings. During the processing phase are generated two types of tailings, denominated in mining by "thick" and "thin". Which do not have a commercial value, and therefore are dropped by the companies indiscriminately in the environment. Aimed at environmental conservation, as well as reuse this residue, this work aims to assess the activity pozolânica residue and their incorporation in factory and coating for use in construction. Were used the residue "wholesale" and the residue "fine". As alternate material for making pozzolana mortar. The waste was characterized by determining particle size analysis, chemical composition, x-ray diffraction, differential thermal analysis and gravimetric. The same suffered calcination 600 °, 700 ° and 800°C and after this step given the pozolânica activity indices in accordance with the standards of the ABNT. Were made mortars containing proportions of 80% / 20%, 70% / 30%, 60% / 40% / 50% / 50% of waste "thick / thin. We studied the rate of pozzolanic activity of waste burnt at temperatures of 600 ° C, 700 ° C and 800 ° C for two hours, entered the mortar with proportions of RCF RCG and differentiated, with 80% RF RG +20%, 70% RG +30% RF, 60% RG +40% RF and 50% +50% RF RG. The results showed that residues of kaolin when calcined at temperatures above 700 ° C has a high pozzolanic activity and mortar alternatives when incorporated with residue calcined kaolin have superior mechanical performance standards ASTM and ABNT.

Keywords: Waste of kaolin, pozzolanic activity, Mortar.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|------------------|----|
| Figura 2.1..... | 19 |
| Figura 2.2..... | 22 |
| Figura 2.3..... | 26 |
| Figura 2.4..... | 26 |
| Figura 2.5..... | 27 |
| Figura 2.6..... | 34 |
| Figura 2.7..... | 36 |
| Figura 3.1..... | 40 |
| Figura 3.2..... | 43 |
| Figura 3.3..... | 44 |
| Figura 4.1..... | 45 |
| Figura 4.2..... | 46 |
| Figura 4.3..... | 48 |
| Figura 4.4..... | 50 |
| Figura 4.5..... | 51 |
| Figura 4.6..... | 52 |
| Figura 4.7..... | 53 |
| Figura 4.8..... | 54 |
| Figura 4.9..... | 57 |
| Figura 4.10..... | 58 |
| Figura 4.11..... | 59 |
| Figura 4.12..... | 60 |
| Figura 4.13..... | 60 |

| | |
|------------------|----|
| Figura 4.14..... | 60 |
| Figura 4.15..... | 62 |
| Figura 4.16..... | 63 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|-----------------|----|
| Tabela 1..... | 20 |
| Tabela 2..... | 31 |
| Tabela 4.1..... | 47 |
| Tabela 4.2..... | 47 |
| Tabela 4.3..... | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 13 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 14 |
| 2.1 CAULIM..... | 14 |
| 2.1.1 Principais Características do Caulim | 17 |
| 2.1.2 Caulim Usado na Indústria Cerâmica e na Construção Civil | 18 |
| 2.1.3 Reservas de Caulim | 19 |
| 2.2 BENEFICIAMENTO DO CAULIM..... | 21 |
| 2.3 IMPACTO AMBIENTAL DO RESÍDUO DE CAULIM..... | 24 |
| 2.4 UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM COMO MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS | 28 |
| 2.5 POZOLANA..... | 29 |
| 2.6 ARGAMASSAS | 35 |
| 2.6.1 Tipos de Argamassa | 35 |
| 2.7 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 37 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 39 |
| 3.1 MATERIAIS | 39 |
| 3.2 METÓDOS | 39 |
| 3.2.1 Caracterização | 40 |
| 3.2.2 Ensaios Tecnológicos..... | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 45 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 65 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 67 |
| REFERENCIAS..... | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Em meio ao grande aumento da poluição ambiental provocada pela ação descontrolada do homem na busca do crescimento econômico, observa-se que no setor mineral é preponderante e crescente a geração e acúmulo de enormes quantidade de resíduos, que, via de regra, são indiscriminadamente descartados no meio ambiente. Esse cenário também é observado no Estado da Paraíba, particularmente na indústria da produção e beneficiamento de caulim.

Segundo o inventário dos resíduos sólidos industriais do Estado da Paraíba realizado pela SUDEMA (Superintendência de Administração do Meio Ambiente), em 2004 três municípios concentram as empresas que beneficiam caulim e geram resíduos de beneficiamento no Estado: Juazeirinho, Junco do Seridó e Tenório. A estimativa de produção de resíduos destas empresas é de 6820 toneladas/mês. Todo o resíduo é lançado no ecossistema sem nenhum processo para controle e/ou discriminação desses resíduos no meio ambiente, sendo depositados em grandes pilhas a céu aberto.

Durante o processamento do caulim, dois tipos de resíduo são gerados um oriundo da etapa de separação do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido e é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração, sendo comumente chamado resíduo grosso, nessa etapa já se verifica a grande quantidade de rejeito produzido na obtenção do mineral; o outro resíduo se origina na segunda fase do beneficiamento, que objetiva separar a fração fina do minério, purificando o caulim e gerando um resíduo denominado, em geral, resíduo fino. Esses resíduos são geralmente constituídos por mica, quartzo e caulinita (MENEZES et al.,2009a).

Segundo Castro (2008) os resíduos de caulim apresentam na sua constituição sílica e alumina que poderá propiciar o desenvolvimento de atividade pozolânica nos resíduos. Nesse sentido, as pozolanas são materiais de composição silicosa ou silico-aluminosa que não sendo por si só cimentícias, reagem com hidróxido de cálcio na presença de umidade e a

temperatura ambiente, resultando em compostos com propriedades cimentícias.

Os materiais pozolânicos são 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 de modificações químicas e mineralógicas que acentuaram o potencial pozolânico. Existem também materiais com sílica amorfa obtidos por processamento. Um deles é a metacaulinita, obtido pela calcinação da argila caulínica (caulim), pura ou refinada, a temperaturas entre 650 °C e 850 °C, e que, quando moída até a finura de 700 m²/kg ou 900 m²/kg, resulta em um material de grande pozolanidade (MENEZES, et al., 2009b).

Os estudos sobre a reciclagem de resíduos para uso como pozolanas tem sido intensificados nos últimos anos em todo mundo, com destaque para os resíduos de construções e demolição, resíduos cerâmicos, resíduos de escória granulada de fundição, resíduos da cinza de casca de arroz, resíduos de termoelétrica, resíduos da serragem de granito, etc, por serem uma alternativa cimentícia de baixo custo e ecologicamente correta, vindo ao encontro da necessidade de desenvolvimento sustentável. Esses resíduos quando incorporados em argamassas podem substituir parte da cal ou do cimento Portland e propiciar elevadas propriedades mecânicas (FARIAS FILHO et al., 2000), bem como, contribuir para diminuição dos custos das edificações, preservação ambiental e o aperfeiçoamento da política social.

Portanto, as motivações para o desenvolvimento deste trabalho foram impulsionadas por dois fatores: o primeiro fator é a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas sobre reciclagem de resíduos, que objetivem soluções alternativas para os problemas dos resíduos gerados pelas indústrias de mineração, já que essas empresas são consideradas como grandes poluidoras; particularmente no que se refere as empresas de

beneficiamento de caulim, que por falta de conscientização geram enormes quantidades de resíduos há vários anos provocando um sério problema ambiental e social na região onde estão situadas. O segundo fator se dá pela carência de estudos que envolvam de forma detalhada o uso desses resíduos como matéria prima alternativa para uso como pozolanas na aplicação em argamassas de assentamento e revestimento de alvenaria em substituição a cal para construção civil.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho se dá no estudo da incorporação de resíduos de caulim em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil, avaliação da atividade pozolânica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de caulim;
- caracterizar física, química e mineralógicamente as matérias primas convencionais e alternativas (rejeitos de caulim);
- avaliar a influência da temperatura de calcinação na atividade pozolânica dos resíduos;
- avaliar a influência do uso da mistura dos resíduos grosso e fino no comportamento das argamassas;
- caracterizar tecnologicamente as argamassas obtidas com a incorporação dos resíduos do beneficiamento do caulim.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CAULIM

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha que contém a caulinita e também o produto resultante de seu beneficiamento. No passado, o caulim, conhecido como china clay, foi descoberto na região montanhosa de Jauchou Fu, na China. Apresenta normalmente cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro. O nome caulim deriva da palavra chinesa *Kauling*, que significa cume alto. Nome dado à argila branca, encontrada a 45 km da cidade de Ching-teh-chien (CHEN et al ., 1997).

A caulinita é um silicato hidratato de alumínio, constituído por uma folha de coordenação tetraédrica, composta por silício e oxigênio, unida a uma folha de coordenação octaédrica, composta por alumínio, oxigênio e hidroxilas (SOUZA SANTOS, 1992). Sua célula unitária é expressa pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$, e sua composição química aproxima-se de $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, contendo outros elementos como impureza. A sua composição química apesar de composta basicamente por SiO_2 e Al_2O_3 , no entanto apresenta uma grande gama de outros óxidos em pequenas quantidade oriundos de contaminações, substituições isomórficas e presença de cátions de compensação (LIMA, 2005).

Os argilo-minerais podem ser classificados em grupos, sendo o da caulinita constituído por: caulinita; haloisita- $4H_2O$; haloisita- $2H_2O$ ou metahaloisita; nacrita, diquita e outras. Elas são variedades polimorfas da caulinita com sistemas diferentes de cristalização. A haloisita poderá estar associada à caulinita, sendo possível a sua identificação através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) ou de transmissão, possui a mesma composição química da caulinita, todavia, contém uma camada adicional de moléculas de água de fácil desidratação (CASTRO, 2008).

O caulim é um dos seis minerais mais encontrados na superfície terrestre. Ele se encontra, sobretudo em profundidades que geralmente não ultrapassam os dez metros (ROSKILL, 1996, LUZ e CHAVES, 2001 *in*

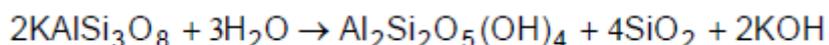
NASCIMENTO 2008). Trata-se de um material argiloso com baixo teor de ferro, daí sua cor branca ou quase branca característica.

Para Luz et al., (2000) caulins são produtos de alterações de silicatos de alumínio, principalmente dos feldspatos (caulinita e haloisita) e podem ocorrer em dois tipos de depósito: primário ou residual (aluvial) e secundário. O primeiro é encontrado no local de formação pela ação do intemperismo ou hidrotermal, apresentando baixa plasticidade, baixa resistência mecânica a cru. Já o sedimentário, resulta do transporte e deposição de caulins residuais ou argilas caulínicas por meio de correntes de água e matéria orgânica, SANTOS (1975).

Os depósitos primários, resultantes das alterações de rochas in situ, são divididos em três grupos

a) Intemperizados

Esses depósitos ocorrem em regiões de clima tropical (quente e úmido), onde as condições favorecem a decomposição dos feldspatos e de outros aluminossilicatos contidos em granitos, pegmatitos e rochas metamórficas. Outras argilas e folhelhos podem também ser alterados dando origem a uma mistura constituída de caulinita e quartzo. A reação do feldspato potássico com a água, em determinadas condições, resulta na formação da caulinita, sílica e hidróxido de potássio, segundo a reação descrita pela equação que segue.



b) Hidrotermal

Formado pela alteração da rocha granítica, devido à circulação de fluidos quentes provenientes do interior da crosta terrestre. Neste caso é necessário que a rocha apresente porosidade e permeabilidade adequadas. Os granitos são as "rochas-mãe" mais comuns na formação de depósitos hidrotermais de caulins primários.

As principais ocorrências hidrotermais estão localizadas em Saint Austell e Cornwall, na Inglaterra, Maungaparerua (Nova Zelândia), Suzhou e Shangai (China), entre outros (Murray e Keller, 1993).

c) Solfataras

São rochas alteradas pela ação de emanções vulcânicas ácidas, constituídas de vapor d'água rico em enxofre.

O principal uso do caulim solfataras se dá na fabricação do cimento branco, no qual o conteúdo de sílica e sulfato, mesmo com teores elevados, não afetam as características do produto final.

Segundo Santos e Sousa Santos (1959), os caulins secundários são resultantes da deposição de materiais transportados por corrente de água doce, as diferentes origens geológicas dos caulins resultam em diferenças significativas na composição mineralógica, principalmente nos componentes não argilosos. Os teores de quartzo e mica neste tipo são menores.

Os caulins secundários, segundo Bristow (1987) *in* Castro 2008 e Silva 2007, são classificados em três grupos: caulins sedimentares, areias caulínicas e argilas plásticas, refratárias e silicosas.

Caulim sedimentar

Possui uma elevada percentagem de caulinita após o beneficiamento (superior a 60% em peso); cujo produto resultante é adequado à indústria de papel.

Areia caulínica

Contém menos de 20% de caulinita. Seu beneficiamento gera como subproduto areia para a construção civil, desde que a mina seja próxima a um centro urbano, pois o produto possui baixo valor agregado.

Argilas plásticas (ball clays), refratárias e silicosas (flint clays)

As argilas plásticas são constituídas essencialmente de caulinita e possuem illita ou montmorilonita finamente dispersa, matéria orgânica e baixo teor de ferro. Essas argilas são bastante usadas na indústria cerâmica. As argilas refratárias segundo Nascimento (2008) apresentam uma composição química similar às argilas plásticas, no entanto ocorrem associadas à gibsita e a haloisita. As argilas silicosas são constituídas de caulinita, contendo ferro e

outros componentes escorificantes. 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.

O caulim do Morro do Felipe (Caulim da Amazônia S/A - CADAM) é um exemplo típico de caulim de origem sedimentar. Outro exemplo também brasileiro é o caulim do Rio Capim (Rio Capim Caulim S/A), que faz parte da Formação Ipixuma do Terciário (SILVA e DANTAS, 1997). O Caulim encontrado na Paraíba, como nos municípios de Juco do Seridó, Tenório e Juazeirinho é um caulim primário, o que faz com que se apresente normalmente contaminado com uma grande quantidade de constituintes como quartzo e feldspato. O que, por conseguinte, faz com que a separação da fração fina (caulim propriamente dito) durante o seu beneficiamento gere elevadas quantidades de resíduos.

2.1.1 Principais Características do Caulim

Segundo Silva (2007) o caulim é um bem mineral extremamente versátil em função de suas características tecnológicas, das quais se pode destacar:

- (i) é quimicamente inerte em uma grande faixa de pH (3 a 9);
- (ii) é de coloração branca ou quase branca, isto é, possui alvura elevada;
- (iii) é macio e pouco abrasivo;
- (iv) tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento e reforçador para as aplicações de carga;
- (v) é de fácil dispersão;
- (vi) possui baixa condutividade térmica e elétrica;
- (vii) possui compatibilidade com praticamente todos os adesivos (proteína, caseína), devido à dispersão e inércia química;
- (viii) é um produto de preço competitivo em relação aos materiais alternativos.

Bundy (1993) classifica essas aplicações em sete categorias, de acordo com suas funções primárias:

- (i) para formação de filmes;
- (ii) como carga ou matéria-prima;
- (iii) na indústria cerâmica e na construção civil;
- (iv) para extensão e reforço de polímeros;
- (v) para suporte de catalisadores e fibra de vidro;
- (vi) como veículo, adsorvente, diluente;
- (vii) como agente polidor.

2.1.2 Caulim Usado na Indústria Cerâmica e na Construção Civil

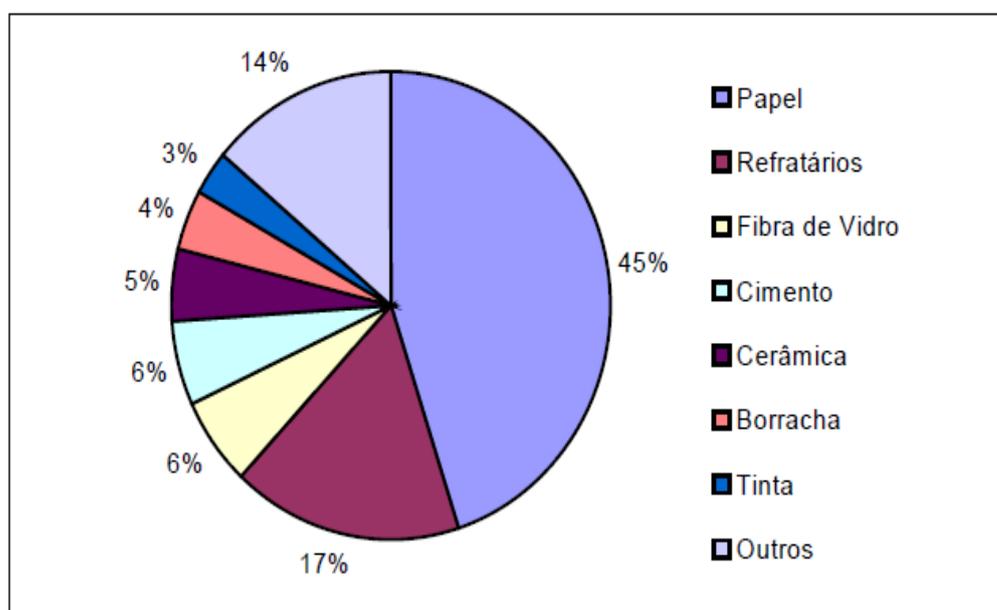
Para aplicação em cerâmica, necessitam-se especificações relacionadas à: plasticidade, cor após a queima, temperatura de vitrificação, retração linear e resistência mecânica à deformação. O caulim, além de conferir coloração clara à massa cerâmica, é um fornecedor fundamental de óxido de alumínio (Al_2O_3), na etapa de vitrificação da peça. Nas temperaturas superiores a 1000°C , o caulim se transforma em mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), cuja microestrutura acicular atua como esqueleto que acomoda as fases líquidas formadas durante a queima e confere ao produto uma elevada resistência mecânica e uma baixa taxa de deformação da peça. O caulim também é utilizado na produção de cerâmicas brancas (louças sanitárias e louças de mesa), peças de revestimento (pisos e azulejos), porcelana para isolamento e refratários (TANNO e MOTTA, 2000).

Para aplicações em concreto de alto desempenho, o caulim é calcinado a temperaturas em torno de 700°C para sua desidroxilação e formação da metacaulinita. A razão do concreto utilizar a metacaulinita é devido a sua resistência mecânica e sua durabilidade requerida, para obras especiais da construção civil. Esse concreto está gradualmente substituindo o de resistência normal, principalmente, em estruturas expostas a ambientes agressivos (LUZ et al., 2005). O Caulim proporciona:

- (i) aumento na densidade de empacotamento;
- (ii) reduz a quantidade de água necessária para o processamento;

(iii) causa melhor fluidez com o preenchimento, por meio de partículas ultrafinas de caulinita, dos espaços vazios existentes entre as partículas de maior tamanho do concreto (SILVA, 2007).

A Figura 2.1 apresenta um diagrama ilustrativo dos principais usos industriais do caulim. Podendo-se observar que a indústria do papel é uma das principais indústrias consumidoras desse material. Onde ele é usado como agente de cobertura, para melhorar as características de impressão, brilho, lisura, alvura, ou como carga, melhorando a opacidade, flexibilidade, etc.



Fonte: ROSKIL, 1996 *apud* LUZ e CHAVES, 2000.

Figura 2.1- Diagrama ilustrativo dos principais usos industriais do caulim. Fonte LUZ, A.B e CHAVES, A.P (2000)

2.1.3 Reservas de Caulim

Segundo Nascimento (2008), no Brasil os depósitos de caulim nos Estados do Amazonas, Pará e Amapá são do tipo sedimentar, caracterizando-se por grandes reservas com propriedades físicas e químicas para diversas aplicações industriais, principalmente, revestimento de papel (*coating*). Nas demais unidades da federação verificam-se uma predominância de caulim primário, originado tanto da alteração de pegmatitos como do intemperismo

de granitos, destacando-se os Estados de Minas Gerais, Paraíba, São Paulo, Goiás, Santa Catarina e Paraná.

Os principais depósitos brasileiros segundo o Anuário Mineral Brasileiro (AMB) de 2006 estão nos estados do Amapá, Pará, Amazonas, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Norte. Os estados do Pará, Amapá e Amazonas detêm cerca de 97% das reservas nacionais 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. Quanto às reservas mundiais, os EUA ocupam o primeiro lugar com 58% e o Brasil situa-se em segundo lugar com 28% (SILVA, 2007). A Tabela 1 apresenta um sumário dos depósitos de caulins do país.

Tabela 1 – Reservas de Caulim – 2005

| UF | Minério | | | Total |
|-----------|---------------|---------------|-------------|----------------------|
| | Medida* | Indicada** | Inferida*** | |
| AM | 1.924.282.431 | 1.218.157.624 | 263.406.700 | 3.405.846.755 |
| PA | 304.867.267 | 312.101.899 | 217.473.178 | 834.442.344 |
| AP | 272.187.823 | 130.124.000 | - | 402.311.823 |
| SC | 62.327.870 | 8.562.387 | 5.858.867 | 76.749.124 |
| GO | 8.513.520 | 11.048.871 | 41.838.500 | 61.400.891 |
| PR | 22.872.487 | 11.560.302 | 19.602.496 | 54.035.285 |
| SP | 31.629.817 | 16.227.012 | 6.118.736 | 53.975.565 |
| RS | 22.850.316 | 17.335.287 | 8.902.642 | 49.088.245 |
| MG | 16.169.460 | 10.087.208 | 2.104.215 | 28.360.883 |
| BA | 6.814.516 | 2.649.550 | 2.651.598 | 12.115.664 |
| ES | 25.000 | 6.818.013 | - | 6.843.013 |
| PE | 1.761.467 | - | - | 1.761.467 |
| PI | 754.292 | 337.907 | 448.256 | 1.540.455 |
| MA | 364.901 | 252.800 | - | 617.701 |
| PB | 190.924 | 166.037 | 64.673 | 421.634 |
| RN | 271.389 | 19.676 | - | 291.065 |
| RJ | 229.436 | 28.762 | - | 258.198 |

Fonte: DNPM – DIRIN (Balanço Mineral Brasileiro / 2006)

***Reserva medida:** a tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e [sondagens], e na qual o teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estar tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos.

****Reserva indicada:** a tonelagem e o teor do minério são computados parcialmente de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção, e parcialmente por extrapolação até distância razoável com base em evidências geológicas.

*****Reserva inferida:** estimativa feita com base no conhecimento das características geológicas do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa.

De acordo com o AMB (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%.

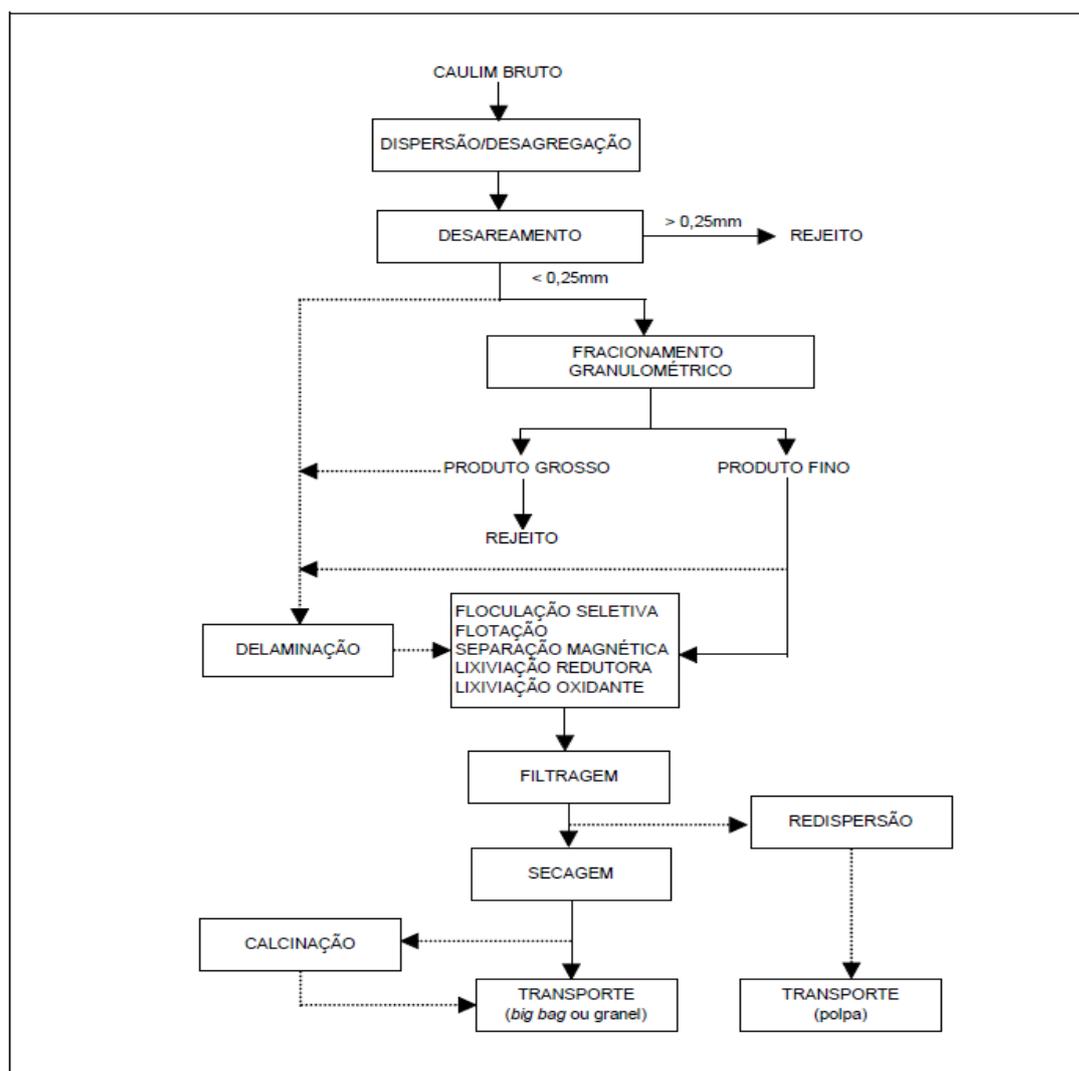
De acordo com Castro (2008) o Brasil é hoje um grande produtor de caulim, quer para consumo interno, quer para exportação. Os depósitos sedimentares da Bacia Amazônica contêm grandes quantidades de caulins de alta qualidade, os quais com desenvolvimentos e infra-estrutura adequados irão desempenhar um 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 BENEFICIAMENTO DO CAULIM

Os caulins ocorrem associados a várias impurezas, não atendendo, dessa forma, às especificações das indústrias consumidoras. Impurezas, como óxidos de ferro e titânio, mica e feldspato, influenciam diretamente na cor e alvura do caulim comprometendo sua qualidade (LUZ e DAMASCENO, 1993). Para promover o seu melhor aproveitamento é necessário realizar operações de beneficiamento, as quais vão depender do uso a que se destina. Existem dois processos de beneficiamento que ocorrem por duas vias, seca e úmida.

O processo de beneficiamento a seco é mais simples, sendo realizado quando o caulim já apresenta alvura e distribuição granulométrica adequadas, bem como baixo teor de quartzo. Nesse processo, o caulim bruto é inicialmente fragmentado (britador) abaixo de 2,54 cm (1”), sendo em seguida conduzido para secagem em secadores rotativos. Após seco, o caulim é pulverizado em moinhos de rolos, para então ser classificado, por tamanho,

através de um processo denominado flotação com ar (*air flotation*), onde as partículas mais finas são conduzidas para o topo do aero-separador por uma corrente de ar quente, havendo assim a separação de partículas por tamanho. No entanto, dificilmente se encontra-se caulins, no estado natural, com esses pré-requisitos, predominando, assim, o beneficiamento realizado a úmido (CETEM, 2008). O beneficiamento a úmido envolve as etapas de dispersão, desareamento, fracionamento em hidrociclone ou centrífuga, separação magnética, floculação seletiva, alveamento químico, filtragem e secagem (LUZ et al., 2005, MONTE et al., 2001). O fluxograma abaixo, Figura 2.2, demonstra as etapas simplificadas do beneficiamento do caulim por via úmida.



Fonte: MONTE et al., 2001

Figura 2.2. Fluxograma simplificado do beneficiamento do caulim. Fonte: Monte et al, 2001.

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 com umidade entre 30 e 40%. A torta é seca ao ar ou em fornos-de-teto-quente no período chuvoso, ou quando se quer um produto de maior qualidade (CASTRO, 2008).

Caso o processo de secagem seja feito em secadores do tipo *spray dryer*, a filtragem é conduzida em filtros do tipo tambor. A “torta” proveniente dos filtros de tambor, com cerca de 35% de umidade, é redispersa, utilizando reagentes químicos necessários para a dispersão e ajuste de pH da polpa. Esta é encaminhada para o *spray dryer*, onde é atomizada em pequenas partículas dentro de uma câmara de secagem por onde passa um fluxo de ar quente, a 300°C, reduzindo a umidade do caulim de 3 a 6% (CETEM, 2005)

Segundo Rocha (2005), no processo de beneficiamento do caulim, o minério pode ser 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 resultante é bombeada para um tanque e posteriormente neutralizada com hidróxido de cálcio.

Dois tipos de resíduo são gerados durante o processamento do caulim primário, um oriundo da etapa de separação do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido e é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração, sendo comumente chamado resíduo grosso, nessa etapa já se verifica a grande quantidade de rejeito produzido na obtenção do mineral; o outro resíduo se origina na segunda fase do beneficiamento, que objetiva separar a fração fina do minério, purificando o caulim e gerando um resíduo denominado, em geral, resíduo fino (MENEZES et al., 2007a; 2007b).

2.3 IMPACTO AMBIENTAL DO RESÍDUO DE CAULIM

A complexa interação existente entre os recursos naturais 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).

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. 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 (IBRAM, 1984). Assim, o impacto ambiental pode ser definido como qualquer alteração nas características físicas, químicas e/ou naturais do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que, direta ou indiretamente, afetem: a saúde, segurança e bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; o conjunto de plantas e animais de uma determinada área; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais. Assim, em virtude da forma que é descartado, observa-se que o resíduo do processamento do caulim provoca uma série de impactos ambientais ao meio físico e biótico

Cerca de 70% do caulim extraído no processo de beneficiamento, é desperdiçado, por não ser aproveitado pela indústria ou qualquer outro segmento. A indústria de beneficiamento de caulim gera um vasto volume de resíduo contendo caulim, mica e quartzo, devido à grande utilidade do caulim nos diversos setores industriais.

Como mencionado anteriormente, são gerados dois tipos de resíduos o primeiro resíduo (resíduo grosso) é constituído majoritariamente por quartzo, proveniente da etapa de lavagem do caulim bruto, sendo totalmente descartado pelas empresas, por não ter valor comercial, é este resíduo que se configura como o maior problema de degradação ambiental. Entretanto, o segundo resíduo (resíduo fino), procedente da etapa de separação em

peneira ABNT nº. 200 (0,074mm), onde o rejeito é o que fica retido, também é um problema para o meio ambiente, no entanto, por ser produzido em menor quantidade e possuir algum valor comercial não impacta tanto o meio ambiente como o resíduo grosso.

Não há um controle nem processamento adequado para os resíduos gerados pelas empresas mineradoras desprezando-se as exigências de utilização de aterros e provocando uma série de danos ao meio ambiente, ao meio físico e biótico e à saúde da população residente nas regiões circunvizinhas aos “depósitos” de resíduos; isso faz com que os moradores rurais, pequenos agricultores em geral, sejam os mais afetados pelo inadequado gerenciamento de resíduos da indústria de beneficiamento do caulim. (CASTRO, 2008).

Os resíduos são depositados a céu aberto, ocupando uma grande área. Quando secos, suas partículas finas são espalhadas pela ação do vento, ocasionando poluição do ar (COSTA, 2006). A deposição deste rejeito constitui uma tarefa delicada, quer por questões econômicas, quer por questões ambientais. Em alguns casos, os rejeitos são utilizados para preenchimento de cavas, na recuperação ambiental de áreas já lavradas (DUTRA, 2005), no entanto, a absoluta maioria do resíduo continua exposta e contaminando o meio ambiente circunvizinho.

Frente a este cenário, se evidencia que as alternativas de reciclagem e/ou reutilização devem ser investigadas e, sempre que possível, implementadas. A abordagem ambiental mais recente, objetiva, exatamente, o desenvolvimento sustentável, com a minimização do descarte dos materiais oriundos das atividades industriais (SOUSA, 2004 in MENEZES, 2009a). A inserção dos resíduos num ciclo produtivo deve representar uma opção de recuperação alternativa desses materiais, que é interessante tanto no aspecto ambiental, como no econômico (MENEZES, 2007).

As Figuras 2.3 e 2.4 destacam pilhas de resíduos de uma indústria de beneficiamento de caulim no Estado da Paraíba e Rio Grande do Norte. A Figura 2.5 evidencia impactos ambientais causados pelos resíduos do

beneficiamento do caulim, tanto no assoreamento e contaminação de reservatórios de água, como na disseminação em um largo raio de contaminação quando seco e espalhado pelo vento.



Figura 2.3. Pilha de resíduo a céu aberto



Figura 2.4. Pilha de resíduo no pátio da empresa geradora

A



B



Figura 2.5 A e B - Impactos ambientais provocados pelo resíduo do beneficiamento do caulim

Visando mitigar os impactos produzidos no beneficiamento de caulim, no que se refere á quantidade de resíduo, as empresas responsáveis por essa atividade têm investido em pesquisas que visam proporcionar a valorização e a redução dos impactos ambientais provocados pelos mesmos. No entanto, esses esforços ainda se mostram pequenos frente ao volume de produção e graves problemas gerados pelos resíduos.

Segundo Lima (2005), o resíduo de mineração de caulim na região da Paraíba e Rio Grande do Norte não são tóxicos, pois durante o beneficiamento não ocorre adição química ao processo, restando um material formado por pedaços de rocha decomposta e britada durante a extração do caulim. O que evidencia um enorme potencial de aplicação na construção civil sem restrições ambientais.

2.4 UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM COMO MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com os resíduos de caulim provenientes dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, visando sua aplicação em argamassas, tijolos e blocos de concreto, blocos cerâmicos e pavimentação (COSTA, 2006).

Dentre estas pesquisas, podemos destacar: Rocha (2005), que estudou a incorporação do resíduo de caulim nos traços de argamassas em substituição a cal. Os teores de resíduos incorporados foram de 5%, 10%, 15% e 30%. Os resultados evidenciaram comportamento mecânico superiores aos convencionais e as normas da ABNT.

Lima e Dantas (2005) utilizaram os resíduos grosso e fino na produção de blocos de concretos sem função estrutural, para uso na construção civil. Os melhores resultados do comportamento mecânico foram para o traço 1: 1: 3:7 com cimento:cal: resíduo fino: resíduo grosso. O valor da resistência a compressão foi de 4,58 MPa para 07 dias, superior aos valores especificados pela norma da ABNT para blocos de vedação.

Lima (2005) estudou a potencialidade do resíduo de caulim para uso em blocos de concreto simples sem função estrutural. Foram utilizados traços convencionais 1:2:2, 1:3:3 e 1:4:4 (cimento: areia-resíduo: brita). Os traços foram incorporação com de resíduo de caulim grosso nas proporções de 15% e 20%, em substituição a parte de areia. As propriedades físico-mecânicas estudadas foram resistência á compressão simples e absorção de água. Os blocos moldados com o traço 1:2:2, foram os que obtiveram menores

resistência á compressão simples, e maior valores de absorção de água, se comparados aos convencionais de mesmo traço. Os resultados evidenciaram que valores das propriedades físico-mecânicas dos blocos incorporados com resíduo de caulim estão de acordo com especificações das normas da ABNT.

Varela et al., (2005) estudaram a incorporação do resíduo do caulim e da construção civil na fabricação de revestimentos cerâmicos. As massas estudadas foram compostas pelos dois resíduos e sinterizadas em diferentes temperaturas. Os resultados obtidos mostraram que e possível produzir produtos com boas propriedades físico-mecânicas. O resíduo de caulim apresentou-se como a matéria-prima alternativa mais indicada para a obtenção de revestimentos de base clara do tipo semi-grês. Os valores das propriedades físico-mecânicas variaram de 65 MPa a 75 MPa, e absorção de água de 3,5% a 4,5%, quando sinterizada na temperatura a 1250° C.

Segundo Menezes et al., 2002, as maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção são: a sua abundância, particularmente nas regiões que concentram empresas mineradoras e de beneficiamento mineral; a diversificação de matérias-primas e a possibilidade de redução dos custos de produção.

Segundo Andreola et al., 2002, a inserção dos resíduos em um ciclo produtivo representa não apenas uma alternativa de barateamento da produção, mas também, uma opção de reciclagem e reutilização desses materiais, sendo interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico. A reciclagem e a reutilização estão entre as principais alternativas na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a economia de matérias-primas não renováveis e de energia, reduzindo os impactos ambientais dos resíduos à sociedade moderna.

2.5 POZOLANA

Pozolana é o material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio. O emprego de

pozolana como material cimentício remonta à antiguidade. Registros históricos indicam que, há cerca de 2000 anos, os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli (antiga Puteoli do Império Romano), Itália, o que conferiu a denominação “pozolana” ao material (SOUZA SANTOS, 1989).

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 (CASTRO, 2008).

Para Lea, 1971 *in* Nita, 2007, materiais pozolânicos são definidos como aqueles que possuem em sua composição silicatos ou sílico-aluminatos amorfos com nenhuma ou pouca atividade aglomerante, mas que quando em contato com a água e em temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades cimentantes.

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 618C (1992) 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.

A área específica é uma propriedade importante na determinação da atividade pozolânica, pois, quanto maior a área superficial de um material, maior será a facilidade deste material reagir com o hidróxido de cálcio, isto pode ser justificado pelo fato do material possuir uma área de contato maior entre os reagentes, principalmente nas primeiras idades. Como exemplo, temos o metacaulim, onde o tamanho de partículas varia de 0,2 a 15 μm (DOMONE, 2001) e sua área específica encontra-se em valores maiores que 12 m^2/g (KHATIB e WILD, 1996).

As pozolanas, quanto à origem, são classificadas em dois grupos, naturais e artificiais (LEA, 1971). As pozolanas naturais são aquelas encontradas na natureza, fazendo parte desse grupo alguns materiais de origem vulcânica e também terras diatomáceas. Estas não são exploradas comercialmente no Brasil. Já as artificiais são as que sofreram algum tratamento térmico como argilas e determinadas rochas que contêm sílica, ou as provenientes dos subprodutos de atividades industriais e agroindustriais, sendo exemplificada pela cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e bauxita. A Tabela 2 apresenta um sumário dos tipos de pozzolanas.

Tabela 2. Classificação das pozolânicas

| 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 as pozolanas mais ativas 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: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 23 (1), 13-24, 2002.

Segundo a norma da ABNT NBR 12653 os materiais pozolânicos podem ser classificados em três classes: classe N para as pozolanas naturais e artificiais, contemplando as argilas calcinadas em que inclui a metaculinita (metacaulim); classe C para a cinza volante e materiais resultantes da combustão do carvão mineral e classe E para aquelas que não se enquadram na classe N ou C. As propriedades exigidas das pozolanas para um determinado propósito são prescritas pela ASTM 618 (1992) e ABNT 12653 (1992). Para pozolanas são necessárias as seguintes propriedades: um conteúdo mínimo de SiO_2 mais Al_2O_3 e mais F_2O_3 de 70%, um máximo conteúdo de 5% de SO_3 , uma máxima perda ao fogo de 10%, e um conteúdo máximo de álcalis (expresso como Na_2O) de 1,5%. O último valor só é aplicável quando as cinzas volantes forem usadas com agregados reativos

Atualmente, diversos materiais pozolânicos, como cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz, são utilizados em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos. O emprego de pozolanas possibilita a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland em concreto, como a grande quantidade requerida de matéria-prima natural (argila e calcário) e o elevado montante de gases intensificadores do efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono, emitidos para a atmosfera durante sua produção (ACI, 2001).

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.

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.

Menezes et al., 2009a, estudou a viabilidade de utilização do resíduo da serragem do granito e de resíduos da construção civil como materiais alternativos para a produção de argamassas e avaliou-se sua atividade pozolânica. Os resíduos foram caracterizados física e mineralogicamente por meio da determinação de distribuição e tamanho de partículas, massa e área

específica, composição química, difração de raios X e análise térmica diferencial. Foi determinado o índice de atividade pozolânica com cal dos resíduos da construção. Foram formuladas composições de argamassas substituindo parcialmente a cal pelos resíduos, e moldados corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram curados por 7, 14, 28 e 60 dias e, em seguida, foi determinada a resistência à compressão simples. Os resíduos apresentam elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e possuem as fases cristalinas quartzo, mica, feldspato, carbonato de cálcio e óxido de ferro. A substituição do aglomerante por resíduos na produção de argamassas pode ser efetuada com sucesso em teores de até 50% e os resíduos com atividade pozolânica propiciam aumentos significativos na resistência à compressão simples das argamassas.

Menezes et al., 2009b, estudou atividade pozolânica dos resíduos do caulim. Os resíduos foram caracterizados através da determinação de sua distribuição granulométrica e composição química, difração de raios X e análise térmica diferencial e gravimétrica; em seguida, determinou-se o índice de atividade pozolânica dos resíduos de caulim com a cal e o cimento Portland. Argamassas de cimento: cal, areia foram preparadas e o resíduo, na condição natural e após queima a $600\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 h, substituindo parcialmente o cimento nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em massa. Os resultados evidenciaram que os resíduos são constituídos de caulinita, mica e quartzo e que a utilização do resíduo calcinado aumenta a resistência das argamassas após 28 dias de cura em até 150%.

A temperatura influenciará diretamente na velocidade da reação pozolânica, afetando a cinética, a formação e a estabilidade dos produtos da hidratação. No estudo de Rojas e Cabrera (2002) em pastas de cal com metacaulim na proporção de 1:1, a velocidade do consumo de cal para pastas curadas a 60°C ocorre rapidamente se comparadas com pastas curadas em 20°C conforme ilustrado na Figura 2.6.

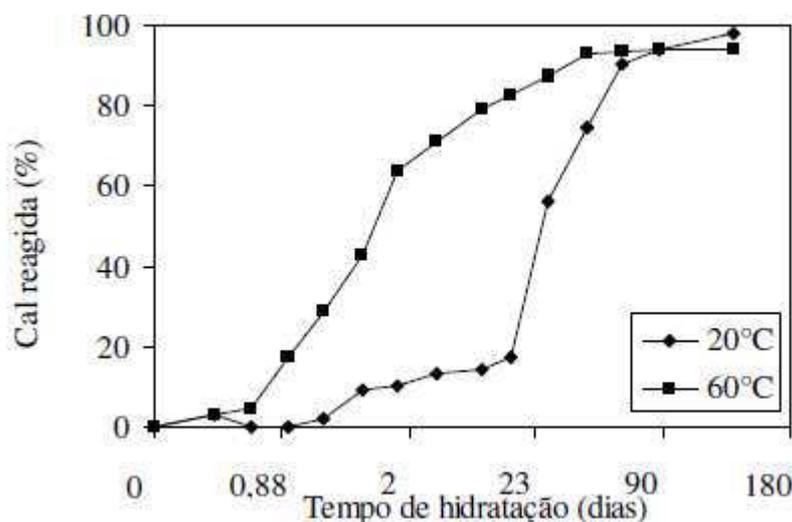


Figura 2.6. Influência da Temperatura e do Tempo de Hidratação na Atividade Pozolânica. Fonte: Rojas e Cabrera 2002.

Além da temperatura, a presença de contaminantes pode alterar a cinética da reação. Shi e Day (2000) avaliando a influência da presença de contaminantes utilizaram aditivos CaCl_2 e Na_2SO_4 como fonte de Ca, Na e SO_4 . O Na_2SO_4 combina-se com o hidróxido de cálcio e a água segundo a equação $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \downarrow + 2\text{NaOH}$, onde ocorre precipitação de gipsita e formação de hidróxido de sódio seguido do aumento do pH. Quanto maior for o pH da solução, maior será a facilidade da pozolana em se dissolver em meio aquoso, principalmente para valores maiores que 12,5. A ação do CaCl_2 consiste na aceleração da dissolução do hidróxido de cálcio, tendo como consequência o aumento da disponibilidade de hidróxido de cálcio para a reação pozolânica.

Nesse caso existe uma diminuição do pH da solução reduzindo assim a dissolução da pozolana. Ambos os aditivos aceleram a reação pozolânica podendo ser mensurado pelo ganho da resistência à compressão das pastas se comparadas com uma amostra padrão sem aditivo. O ganho da resistência com CaCl_2 é maior do que o do Na_2SO_4 mostrando-se mais efetivo, mas deve ser evitado quando utilizado em componentes com reforço de aço devido ao perigo de corrosão.

2.6 ARGAMASSAS

As primeiras misturas de sucesso na junção de blocos de alvenaria foram batizadas com o nome de argamassas: mistura de cal, areia e água para construção. Dá-se o nome de pasta a mistura de um aglomerante mais água. Quando se coloca água em excesso na pasta, tem-se um produto denominado nata. Misturando-se agregado miúdo á pasta obtém-se uma argamassa, podendo eventualmente conter adições que melhorem suas propriedades. A adição de areia se faz por vários motivos, e dentre eles destacam-se a diminuição da retração e o barateamento do produto (GUIMARÃES, 1997; SILVA, 1991 in LOURENCI, 2003).

Quanto maior a plasticidade das argamassas na hora do uso, maior será a sua aderência, o que é uma grande vantagem em certas aplicações. Para aumentar a plasticidade é adicionado um quarto componente à mistura, que pode ser cal, saibro, barro, caulim ou outros, dependendo da disponibilidade e uso na região (SILVA, 2006).

De todos esses materiais, chamados de plastificantes, o mais recomendado é a cal, também conhecida como cal hidratada, cuja fabricação e uso, modernamente são regidos por Normas Técnicas em cada país. Assim como o concreto, as argamassas também se apresentam moles nas primeiras horas de confecção, e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade (SILVA, 2006).

As argamassas podem ser utilizadas como revestimentos de pisos, tetos e paredes (emboço e reboco), ou no assentamento de tijolos, blocos, azulejos e ladrilhos, reparos de obras de concreto, injeções (SILVA, 1991).

2.6.1 Tipos de Argamassa

As argamassas podem ser classificadas, segundo a sua finalidade, em argamassas para assentamento e argamassas para revestimento. As argamassas para assentamento são usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Servem também para a colocação de azulejos e afins. A principal finalidade da argamassa de revestimento é regularizar as superfícies de

paredes e também de tetos, muros e fachadas, resguardando-as das intempéries e desgaste de maneira geral. Como qualidades essenciais de um revestimento podem ser citadas a resistência ao choque, a esforços de abrasão, a durabilidade e a impermeabilidade, quando necessária.

A norma da ABNT NBR 13529 (1995), define a argamassa para revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”; por outro lado, define argamassa colante como sendo uma “mistura constituída de aglomerante(s) hidráulico(s), agregados minerais e aditivo(s), que possibilita, quando preparada em obra com adição exclusiva de água, a formação de uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de peças cerâmicas e de pedras de revestimento.”

Para Azeredo, (1987) 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. A Figura 2.7 ilustra os tipos de argamassas aplicadas em uma alvenaria.

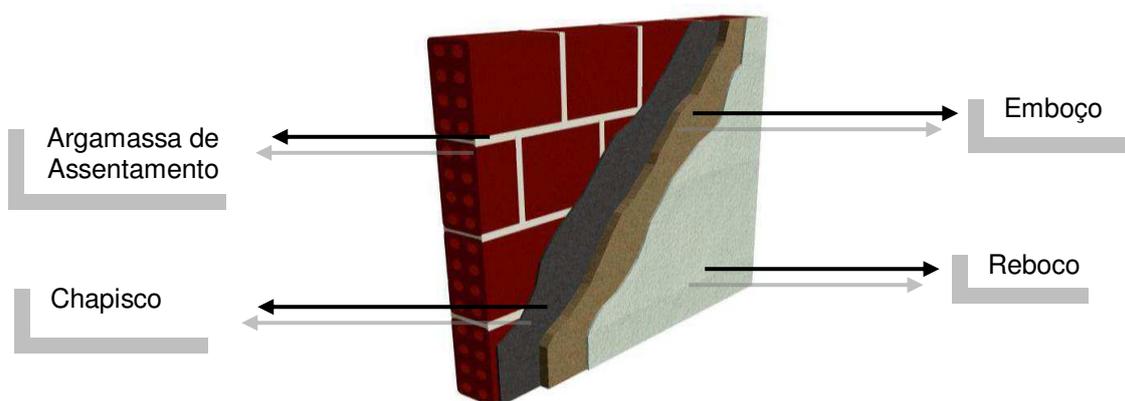


Figura 2.7. Argamassas utilizadas em alvenaria. Fonte Azeredo 1987.

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 (CASTRO, 2008).

As propriedades das argamassas estão diretamente ligadas a diversos fatores, tais como: qualidade e quantidade do aglomerante; qualidade e quantidade de água. Variando estas condições, tem-se a qualificação do produto final, de acordo com as condições de envolvimento dos grãos pela pasta, quantidade de vazios e aderência dos grãos com a pasta (SILVA, 1991 in LORENCI, 2003).

A qualidade da argamassa é tão importante para a durabilidade das construções como é a epiderme para a proteção do corpo humano, tanto que às vezes é possível assemelhar algumas funções de ambas, principalmente do ponto de vista de proteção da armadura. Como se sabe, os agentes agressivos do meio ambiente não são apenas os mecânicos – que deformam, rompe e desgastam – mais também os físico-químicos que provocam, sobretudo a corrosão das armaduras, contra os quais a argamassa desempenha um papel importante. A argamassa é sempre, por menos que seja, um material permeável a líquidos e gases, sujeitos a diferenças de potencial elétrico e outros fatores, em permanente equilíbrio com o meio ambiente, e, além disso, sujeito a limitações de execução (HANAI, 1992).

2.7 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As empresas mineradoras principalmente as do beneficiamento do caulim geram um elevado volume de resíduos causando grande impacto ambiental. Esses resíduos geralmente são depositados em locais inadequados tais como: rios, lagos, córregos e rodovias causando grandes prejuízos a fauna e a flora como também a saúde humana, já que esses resíduos geralmente apresentam-se em forma de pó e são constituídos de partículas finas de sílica e outros elementos químicos.

As pesquisas até aqui demonstram que os resíduos de mineração poderão ser uma alternativa para uso como matérias-primas em diversas

aplicações dentre elas, podemos destacar: argamassas para assentamento e revestimento de alvenarias substituindo parte dos aglomerantes e dos agregados para uso em construção civil; blocos de concreto com e sem função estrutural; tijolos solo-cimento; matérias-primas cerâmicas para uso em blocos, telhas, revestimento, grés sanitário; tintas, etc.

Esta revisão mostrou que à reciclagem de resíduos de mineração principalmente a do beneficiamento do caulim é uma alternativa de contribuir para a diminuição do impacto ambiental, o emprego de resíduo na produção de argamassas pode se tornar uma atividade de bastante importância, e mais freqüente devido a quantidade disponível desse resíduo, podendo oferecer uma maior variedade de materiais para construção sendo uma alternativa de produto de baixo custo ao setor da construção civil, barateando as despesas com edificações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os materiais descritos a seguir:

Resíduos - Os resíduos provenientes do beneficiamento do caulim, cedido pela CAULISA/SA, do município de Juazeirinho – PB, região que concentra o pólo produtor de caulim do Estado, foram o resíduo de caulim grosso (RCG), oriundo da primeira etapa de separação do quartzo do minério caulim, e o resíduo caulim fino (RCF), originário da segunda etapa do beneficiamento do caulim, que objetiva separar a fração fina do minério.

Areia - Agregado miúdo utilizado, de origem do rio Paraíba, seca na temperatura ambiente, passada em peneiras ABNT nº16, 30, 50 e 100 considerando-se o retido das mesmas. As frações de areia foram utilizadas segundo NBR 5751 (1992).

Hidróxido de Cálcio - $(Ca(OH)_2)$ Fornecido pela empresa Vetec Química Fina Ltda, RJ. Utilizado como ativador da reação entre a pozolana e a água.

Água - água potável fornecida pela concessionária de abastecimento do Estado da Paraíba.

3.2 METÓDOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa consiste nas etapas apresentadas no fluxograma da Figura 3.1.

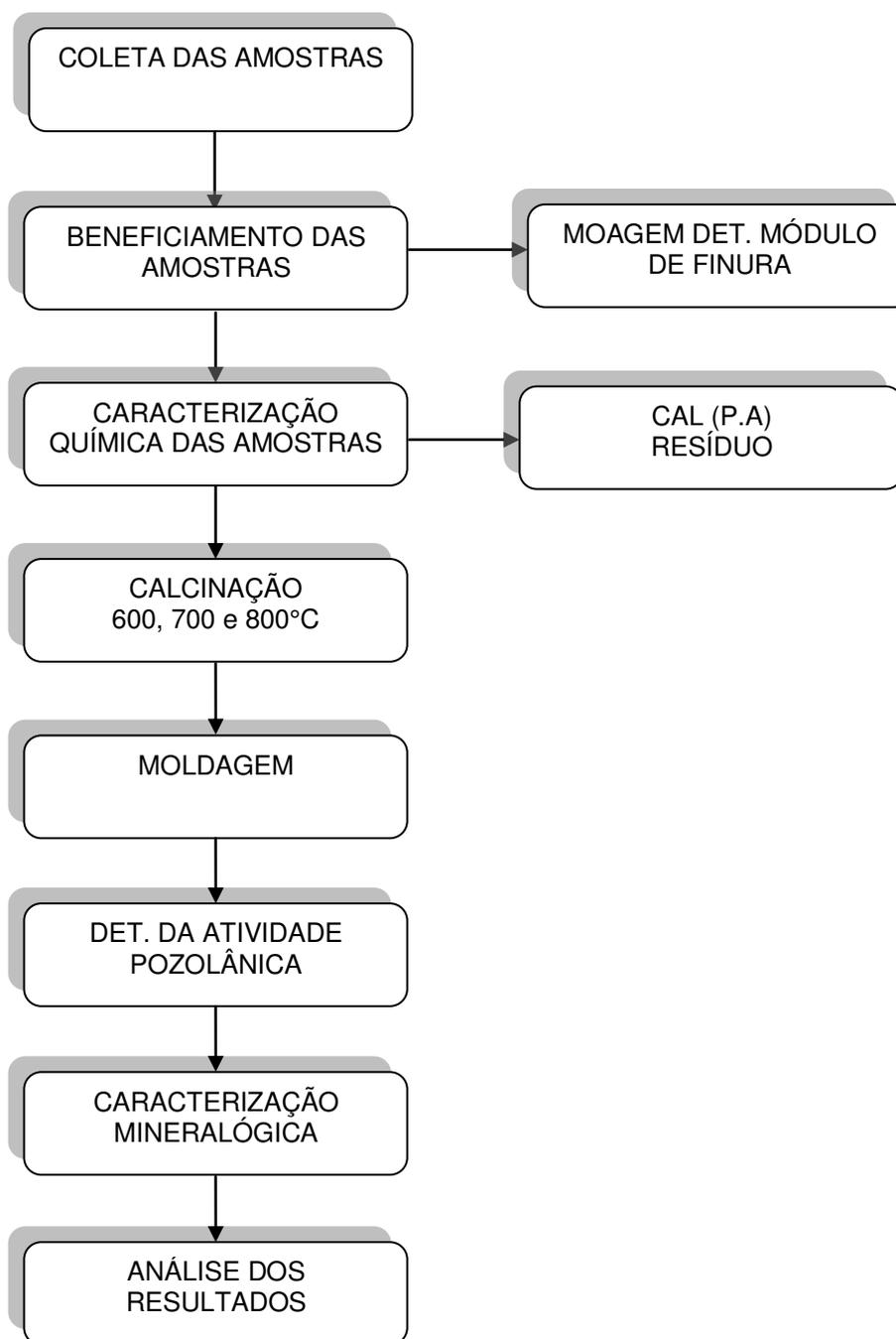


Figura 3.1 Fluxograma das etapas do desenvolvimento da pesquisa

3.2.1 Caracterização

A caracterização dos resíduos foi efetuada através dos seguintes métodos: análise granulométrica por difração a laser, determinação da composição química, difração de raios X e análise termogravimétrica e térmica diferencial.

Inicialmente foram coletadas as amostras, e em seguida passado em peneira ABNT nº 8 (2.4 mm) para a retirada dos fragmentos de resíduos maiores, e também com o intuito de não danificar o moinho, para o qual as mesmas foram submetidas no processo de moagem. Posteriormente os resíduos foram submetidos a uma moagem em moinho de bolas durante 06 (seis horas), em seguida passado em peneira ABNT nº200 (0,074mm).

✓ **Análise Granulométrica por Difração de Laser**

Para realização deste ensaio, os resíduos de caulim fino e grosso foram passados em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), e dispersos em 250mL de água destilada em agitador Hamilton Beach modelo 936 na velocidade de 17.000 rpm por 20 min, utilizando como defloculante o hexametáfosfato de sódio. Em seguida 15 mL são separados e colocados em dispersor ultra sônico por 10 min; em seguida esta dispersão será 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.

✓ **Análise Química**

A caracterização química das matérias primas tanto da cal como do resíduo foram feitas no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade de Campina Grande – PB. As determinações usuais são: perda ao fogo, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , Na_2O e K_2O . As mesmas foram beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm) e posteriormente caracterizadas quanto à composição química através do Equipamento EDX-720 da marca Shimadzu, pelo método de Espectrofotometria Fluorescente de Raio-X.

✓ **Difração de Raio X**

As análises foram realizadas em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. As amostras foram acondicionadas em porta amostra de alumínio a radiação utilizada foi $\text{K}\alpha$ do Cu (40,0 KV/30,0 mA). A Velocidade do goniômetro: $0,02^\circ$ para 2θ 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).

✓ **Análise Térmica Diferencial**

As análises ATD das amostras foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. Cujo ensaio consiste em aquecer simultaneamente uma amostra e uma substância termicamente inerte. São medidas continuamente as diferenças de temperatura entre a amostra e o material inerte. Essas diferenças de temperaturas refletem as reações na amostra provocada pelo aquecimento. As transformações endotérmicas e exotérmicas são apresentadas como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial.

✓ **Análise Termogravimétrica**

Seguindo os mesmos parâmetros da ATD, para este ensaio foram realizadas periodicamente medidas de peso na amostra, permitindo assim o registro das variações da massa em função da temperatura de queima. Essas mudanças de peso são devidas á perda de água ou CO_2 ou ganho de oxigênio.

3.2.2 Ensaio Tecnológicos

✓ **Atividade pozolânica**

Para o estudo da atividade pozolânica os resíduos em suas diferentes proporções foram submetidos ao processo de queima em forno elétrico Flyever FE50RP por duas horas nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para obter a metacaulinita. Em seguida foram identificados e acondicionados em sacos plásticos em local seco para posteriormente serem utilizados no processo de moldagem. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas da ABNT NBR 5751(1992) e NBR 5752(1992).Foram avaliadas as atividade pozolânicas de misturas com diferentes teores de resíduos grosso (RG) e fino (RF): 80%RG+20%RF, 70%RG+30%RF, 60%RG+40%RF e

50%RG+50%RF, após a calcinação dos resíduos nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C.

A trabalhabilidade das argamassas foi determinada através do índice de consistência, segundo método da norma da NBR 7215 (1996).

A Figura 3.2 apresenta o acondicionamento dos corpos-de-prova para cura por período de 07 e 28 dias. O índice de atividade pozolânica foi determinado através da resistência à compressão simples após 7 e 28 dias de cura em temperatura entre 23° e 25°C, de acordo com a norma da ABNT NBR 5751(1992) modificada.



Figura 3.2 – **A** moldagem das argamassas. **B e C** acondicionamento dos corpos de prova para cura por período de 07 e 28 dias.

Foram confeccionados 6 corpos-de-prova, moldados em moldes cilíndricos de 10 cm x 5 cm de acordo com a norma da ABNT NBR 5751 (1992). Os corpos-de-prova das argamassas foram moldados em quatro camadas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes com a utilização

de um soquete, permitindo uma distribuição homogênea da massa. Após moldagem, os corpos-de-prova foram submetidos a cura, onde nas primeiras 24 horas permaneceram nos moldes, e em seguida foram retirados e acondicionados em sacos plásticos vedados para completar a cura de 7 dias e 28 dias, sendo três corpos para cada tempo de cura.

✓ **Argamassas para Alvenarias**

Com os melhores resultados obtidos nos ensaios da atividade pozolânicas das misturas dos resíduos e da temperatura de calcinação, foram confeccionados traços de argamassas mistas (Cimento:Cal:Areia) de acordo com as normas da ABNT. O material pozolânico obtido com calcinação dos resíduos substituíram a cal nas proporções de 5%,10%,15% e 20%. Foram utilizados os traços de 1:4:28 e 1:2:9 para argamassas para assentamento e reboco de alvenarias, respectivamente, para uso em construção civil. Os corpos-de-prova foram moldados em forma cilíndrica com dimensões de 5cm X 10cm, de acordo com a norma da ABNT NBR 7215 (1996), em seguida foram curados em câmara úmida por períodos de 28, 60 e 90 dias.

✓ **Resistência a Compressão Simples**

A resistência a compressão simples das argamassas incorporadas com resíduos foram determinadas de acordo com a norma da ABNT NBR 7215 (1996). Foi utilizado um equipamento da Marca Shimadzu, equipamento Autograph AG-IS, com célula de carga de 100KN. A Figura 3.3 apresenta a máquina universal onde foram realizados os ensaios de resistência a compressão simples (RCS).



Figura 3.3 - Máquina Universal da Marca Autograph da Shimadzu AG-IS 100KN

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

✓ Caracterização dos Resíduos

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas de distribuição de partículas para os resíduos de caulim grosso e resíduo de caulim fino. Com base nas curvas apresentadas observa-se que os resíduos apresentam após cominuição largas e semelhantes distribuições granulométricas, com uma grande concentração das partículas em torno dos 50-60 μm . O RG possui tamanho médio de partícula de 35,36 μm e D_{10} , D_{50} e D_{90} de 3,54, 32,26 e 71,29 μm , respectivamente; enquanto o RF apresenta um tamanho médio de 31,71 μm e D_{10} , D_{50} e D_{90} de 2,43, 28,21 e 67,47 μm , respectivamente.

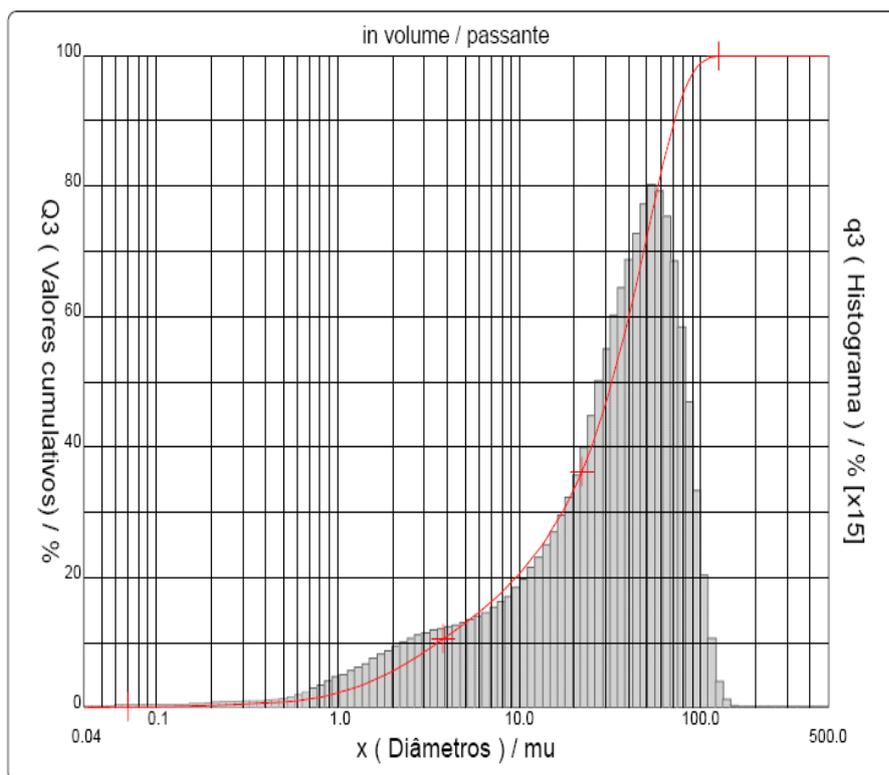


Figura 4.1 Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de caulim grosso (RG)

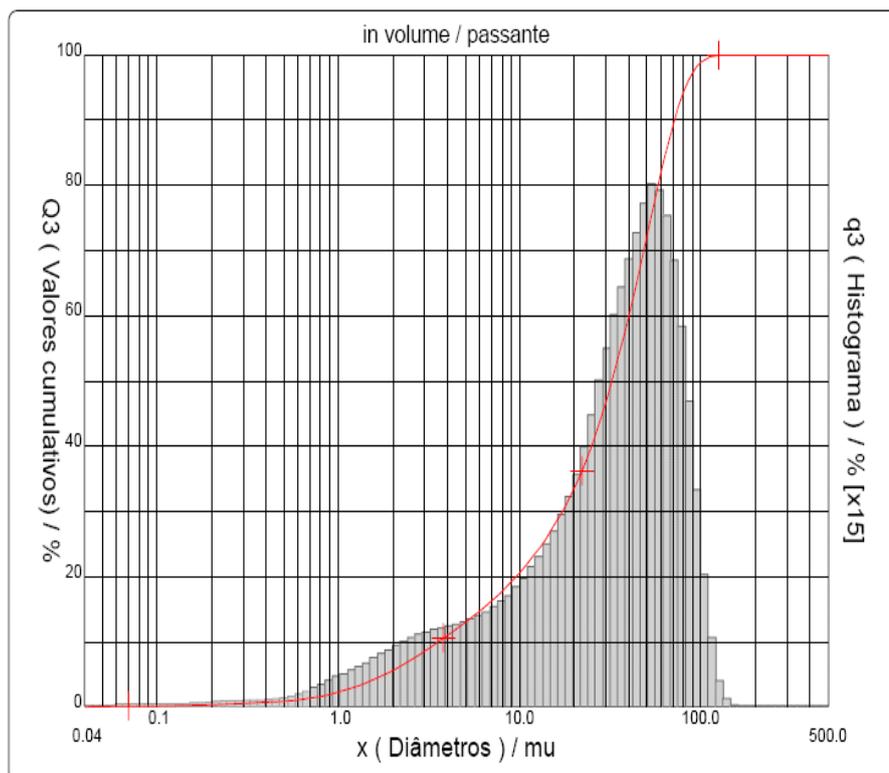


Figura 4.2 - Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de caulim fino (RF)

Apesar do alto teor de partículas com dimensão inferior a $45\ \mu\text{m}$ nos dois resíduos, (cerca de 68-70%), verifica-se, que quando comparados aos dados do cimento Portland CII-F presentes na literatura (FARIAS FILHO et al., 2000; LIMA JÚNIOR et al., 2003; ROCHA, 2005), observa-se que os resíduos apresentam distribuição mais grosseira que a dos cimentos Portland. Em geral, os resíduos apresentam teores de aproximadamente 95% das partículas com dimensões inferiores a $45\ \mu\text{m}$. Por outro lado e de acordo com a norma ABNT NBR 12653 (1992) e a ASTM 618C (1992), um material para ser considerado pozolânico deve apresentar um máximo de 34% retidos na peneira ABNT nº 325, que apresenta abertura de $45\ \mu\text{m}$; assim, apesar de ser mais grosso que os cimentos comerciais observados, os resíduos apresentam características granulométricas de acordo com a normalização para uso como pozolanas

Na Tabela 4.1 estão apresentadas às composições químicas dos resíduos analisados. Verifica-se que os resíduos apresentam soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , superando o valor mínimo de 70% requerido na ABNT NBR 12653 (1992) e na ASTM 618C (1992). Observa-se também perda ao

fogo inferior a 10%, teor de MgO, inferior a 3% e teor de álcalis em Na₂O, inferior a 1,5%, atendendo as exigências químicas da normalização (ABNT NBR 12653, 1992; ASTM 618C, 1992) para materiais pozolânicos.

Tabela 4.1. Composição química dos resíduos (% em massa)

| Resíduos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | TiO ₂ | CaO | MgO | Na ₂ O |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------|--------|-------------------|
| RG | 76,01 | 16,38 | 0,70 | 6,61 | traços | traços | traços | 0,30 |
| RF | 56,5 | 36,0 | 1,00 | 6,14 | 0,13 | traços | traços | traços |

Observa-se que os resíduos apresentam elevado teor de K₂O, o que, devido à formação geológica de onde é extraído o caulim, pode está associado a micas e feldspatos presentes no material. Como esse elevado valor de K₂O é observado tanto no resíduo grosso como no resíduo fino, que já sofreu uma separação da fração mais grosseira previamente (o próprio resíduo grosso), é provável que ele esteja associado a mica (finamente dividida). No entanto, independentemente do elevado teor de K₂O ser oriundo de mica ou feldspatos, isso não deverá haver interferência na sua aplicação em argamassas.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores obtidos das características físicas e químicas dos resíduos estudados, e as exigências prescritas pelas normas americana (ASTM C 618), indiana (IS 1344) e brasileira (NBR 12653).

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

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

^a Parâmetro não legislado pela norma em referência; ^b Resíduo Grosso; ^c Resíduo Fino

Analisando os valores contidos na Tabela 4.2 e comparando os valores apresentados pelos resíduos com as exigências normativas, verifica-se que todos os valores obtidos estão dentro dos resultados especificados.

A Tabela 4.3 apresenta a composição química da cal utilizada na pesquisa para produção das argamassas.

Analisando os resultados, verifica-se que a cal utilizada neste trabalho é do tipo calcítica, e apresenta elevada pureza por apresentar teor de CaO superior a 96%.

Tabela 4.3 Composição Química da Cal

| Composição | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | MgO | Demais Óxidos |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|------|---------------|
| Cal | 1,10 | 0,93 | 0,05 | 0,06 | 96,38 | 1,21 | 0,27 |

A Figura 4.3 apresenta os difratogramas de raios X dos resíduos de caulim grosso e fino no estado natural (sem calcinação). Analisando os resultados da Figura 4.3, verifica-se que os resíduos são constituídos por mica, caulinita e quartzo. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Castro (2008) ao estudar resíduos de caulins da Província Pegmatítica da Borborema.

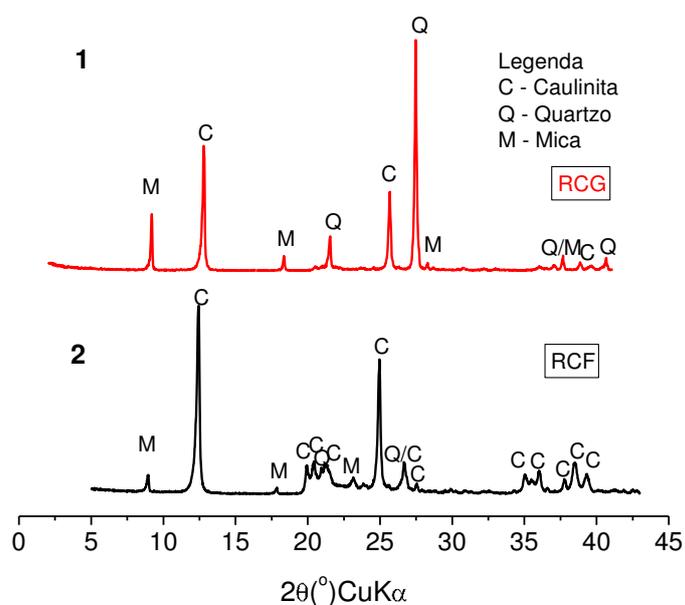


Figura 4.3. Apresenta os difratogramas dos resíduos de caulim 1 (grosso) e 2 (fino)

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, e que o RCG é constituído predominantemente por quartzo, caulinita e mica, enquanto o RCF é constituído predominantemente por caulinita e pequeno teor de mica. Equivalentes aos da composição química apresentados na Tabela 4.1, que mostra que o RCG possui um teor de SiO_2 superior e um teor de Al_2O_3 significativamente inferior ao do RCF

✓ **Avaliação da Atividade Pozolânica com a Cal**

Os índices de atividade pozolânica (IAP) foram determinados com a mistura dos resíduos (grosso e fino) após sua calcinação. O ensaio para determinar o índice de atividade pozolânica é uma medida direta do grau de pozolanidade através da determinação da resistência à compressão simples (RCS), segundo a norma da ABNT NBR 7215 (1996) de corpos-de-prova de argamassa preparada com o material em estudo, cal, areia e água, após 7 dias de cura.

A Figura 4.4 apresenta a curva de resistência à compressão simples das argamassas (a base de cal) incorporadas com resíduos na proporção de 80%RCG e 20%RCF calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28 dias. Pode-se observar que segundo a norma ABNT NBR 12652 (1992), que especifica um valor mínimo de 6,0 MPa aos 7 dias de cura, a mistura composta por 80% de RCG e 20% de RCF não apresenta atividade pozolânica, independentemente da temperatura de calcinação. No entanto, segundo a ASTM C1707 (2009), que prescreve valor de resistência mínimo de 2,4MPa aos 28 dias de cura, as misturas calcinadas a 700 e 800°C apresentam atividade pozolânica.

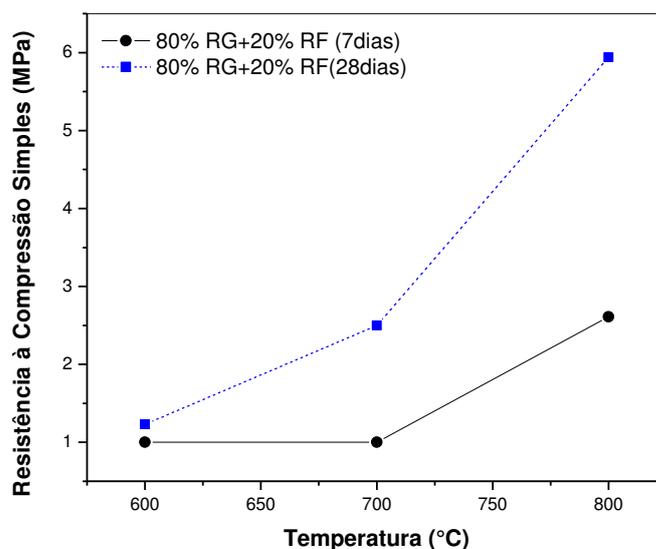


Figura 4.4. Resistência à compressão simples das argamassas com 80%RCG+20%RCF calcinado na temperatura de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28dias

Nesse sentido, pode-se observar que o aumento de resistência de 7 dias para 28 dias de cura na argamassa contendo resíduo calcinado a 600°C é muito pequena, entretanto, quando a mistura de resíduos é calcinada a 700 e 800°C essa elevação na resistência é muito mais intensa, atingindo valores superiores a 100% de aumento. Isso indica que pode está ocorrendo algum tipo de reação pozolânica, já que em maiores temperaturas o aumento é mais pronunciado, mesmo com o índice da ABNT indicando que a mistura não apresenta características pozolânicas. O aumento da resistência pode estar associado a um efeito de preenchimento (“filler”), o qual de 7 para 28 dias deveria ser aproximadamente igual em todas as temperaturas de calcinação, o que não foi observado.

A Figura 4.5 apresenta as curvas de resistência à compressão simples das argamassas incorporadas com resíduos na proporção de 70%RCG e 30%RCF calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28 dias.

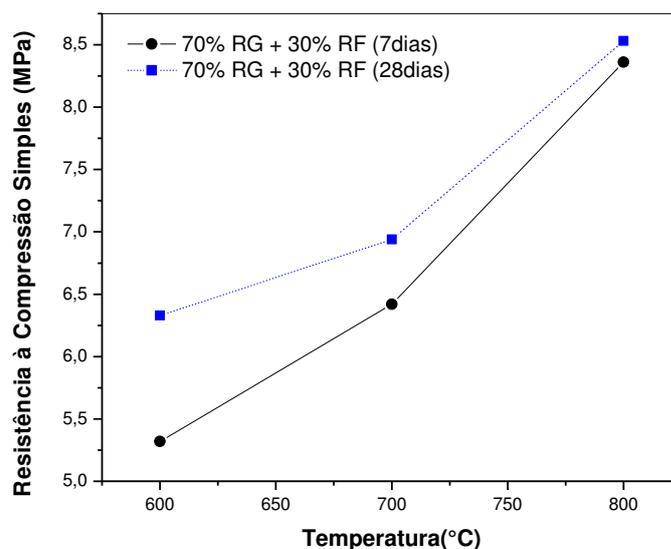


Figura 4.5. Resistência à compressão simples das argamassas com 70%RCG+30%RCF calcinado na temperatura de 600°C, 700°C, 800°C para período de cura de 07 e 28dias

Através da Figura 4.5 pode-se observar que os corpos-de-prova contendo resíduos na proporção 70% de RCG e 30% RCF apresentaram resistência aos 7 dias de cura superiores aos corpos contendo 80%RCG+20% de RCF na mistura, independentemente da temperatura de calcinação. O que pode está associado ao maior teor de RCF, que, segundo Menezes (2009b), apresenta uma atividade pozolânica significativamente superior ao RCG, em virtude desse último apresentar elevada fração de quartzo o que diminui sua atividade pozolânica. Enquanto o RCF é composto predominantemente por material argiloso, caulinita e mica que após dexidroxilação tornam-se reativos com o hidróxido de cálcio.

A Figura 4.6 apresenta as curvas de resistência à compressão simples das argamassas incorporadas com resíduos na proporção de 60%RCG e 40%RCF calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28 dias.

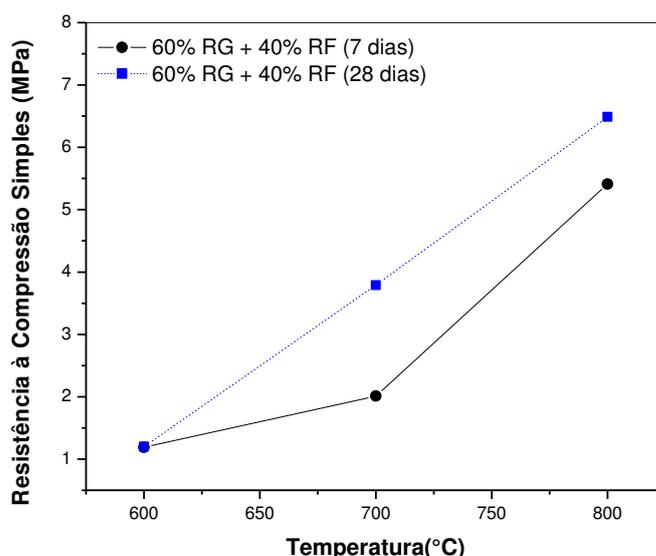


Figura 4.6 Resistência à compressão simples das argamassas com 60%RCG+40%RCF calcinado na temperatura de 600°C, 700°C, 800°C para período de cura de 07 e 28dias

Pode-se observar que segundo a norma ABNT NBR 12652 (1992), que especifica um valor mínimo de 6,0 MPa aos 7 dias de cura, a mistura composta por 60% de RCG e 40% de RCF não apresenta atividade pozolânica com a cal após calcinação, independentemente da temperatura utilizada. Por outro lado, segundo a ASTM C1707 (2009), que prescreve valor de resistência mínimo de 2,4MPa aos 28 dias de cura, a mistura apresenta comportamento pozolânico após calcinação a 700 e 800°C.

A mistura contendo 40% de RCF apresentou um comportamento que aparentemente vem de encontro ao observado para as misturas com 20 e 30% de RCF, que apresentaram um aumento do índice de atividade pozolânica (por conseguinte da pozolanicidade) com o aumento do teor de resíduo fino, por apresentar valores de resistência (índice de atividade pozolânica) inferior ao da mistura contendo 30% de resíduo fino.

Esse comportamento pode indicar que ao se utilizar e analisar as misturas dos resíduos deve-se levar em conta a evolução ou diminuição do empacotamento do sistema e não apenas o seu efeito pozolânico. Baronio e Binda (1997) e Faria Filho et al. (2000) ressaltam que além da ação química, as pozolanas finamente pulverizadas possuem ação física (tal como vários

resíduos), uma vez que atuam nos concretos e argamassas como material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (filler effect). Tal fato é particularmente importante na densificação do sistema e no conseqüente aumento de resistência do material final, em virtude de um arranjo mais eficiente na interface agregado-agente aglomerante, densificando esta zona e, conseqüentemente, aumentando a resistência da argamassa

Assim, acredita-se que a mistura 60% RCG mais 40% RCF apesar do maior teor do material com melhores características pozolânicas, deve ter conduzido ao sistema a um mal empacotamento e por conseqüência menor resistência mecânica.

A Figura 4.7 apresenta a curva de resistência à compressão simples das argamassas incorporadas com resíduos na proporção de 50%RCG e 50%RCF calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28 dias.

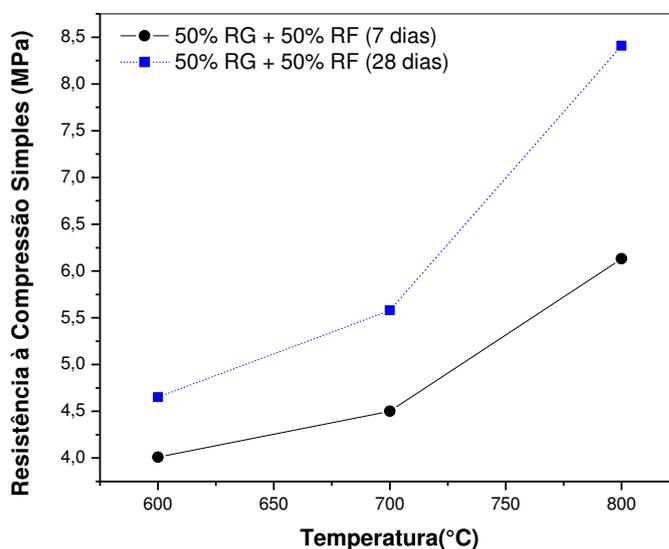
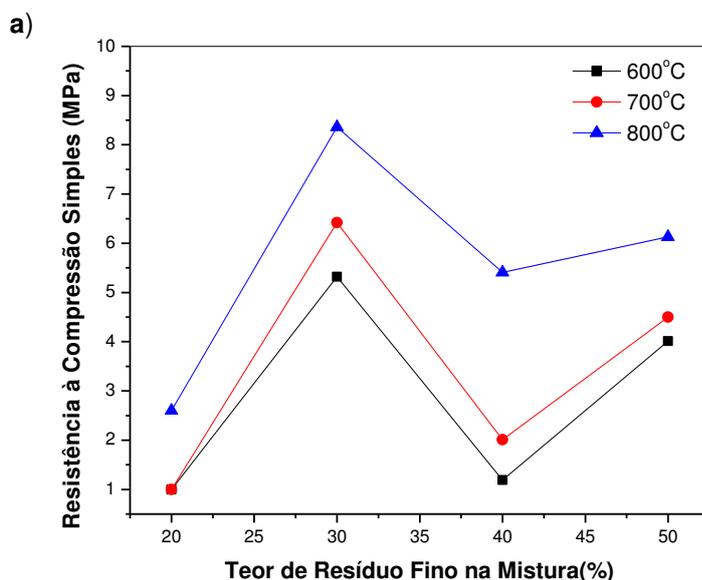


Figura 4.7. Resistência à compressão simples das argamassas com 50%RCG+50RCF calcinado na temperatura de 600°C, 700°C, 800°C para período de cura de 07 e 28dias

Analisando os resultados da Figura 4.7, verifica-se que segundo a norma ABNT NBR 12652 (1992), a mistura composta por 50% de RCG e 50% apresenta atividade pozolânica com a cal apenas após calcinação a 800°C, apresentando um valor de resistência de 6,13MPa. Conforme a ASTM C1707 (2009), no entanto, a mistura apresenta comportamento pozolânico em todas as temperaturas de calcinação.

A mistura com 50% de resíduo fino e 50% de resíduo grosso apresenta um comportamento mecânico mais acentuado que a mistura contendo 40% de resíduo fino, no entanto, levemente inferior ao da mistura contendo 30% de resíduo fino. O que possivelmente está relacionado a uma melhora no empacotamento do sistema com o aumento da quantidade de resíduo fino, relativamente ao sistema com 40% de resíduo fino, mas, que, entretanto, ainda não é tão eficiente quanto ao observado na composição com 30% de resíduo fino.

A Figura 4.8a e 4.8b apresenta um resumo dos valores de resistência à compressão simples de todos os corpos-de-prova das argamassas incorporadas com resíduos de caulim calcinados na temperatura de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de 07 e 28 dias, respectivamente.



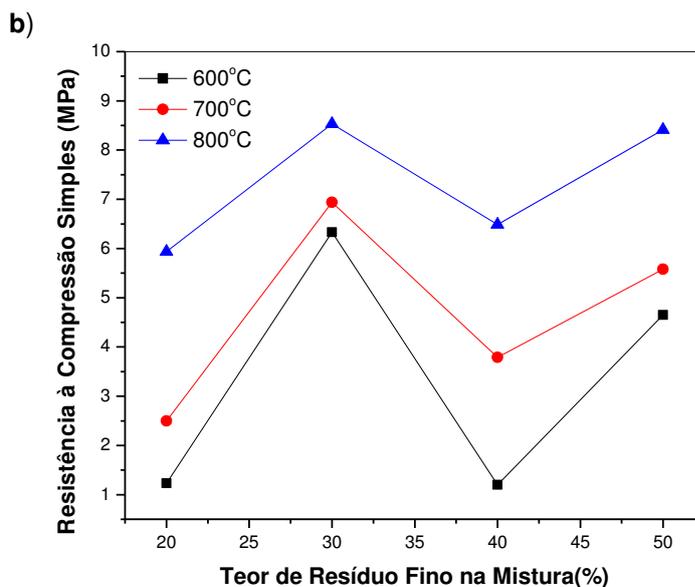


Figura 4.8. Resistência à compressão simples de todos os corpos de provas das argamassas incorporadas com resíduos de caulim calcinados nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C para período de cura de a) 07 e b) 28 dias

Analisando conjuntamente todos os resultados contidos na Figura 4.8a, verifica-se que os traços incorporados com misturas com 70 % de RCG + 30 % de RCF e com 50% de RCG + 50% de RCF foram as que apresentaram maiores índices de atividade pozolânica (maiores resistências), independentemente da temperatura de queima. Verifica-se também que há uma evolução na resistência conforme se aumenta a temperatura de queima, sendo mais acentuado quando da queima a 800°C em todas as misturas analisadas. Esse comportamento está provavelmente relacionado a dexidroxilação da caulinita a 600 e 700°C, havendo a total destruição da estrutura da caulinita, e a redistribuição da estrutura da mica por volta de 800°C. A mica dexidroxila em temperaturas da ordem de 600 a 700°C, mas, no entanto, sua estrutura só é destruída em temperaturas mais elevadas. A aparente necessidade de elevada temperatura, a 700°C, para a dexidroxilação da caulinita, conforme a literatura (SOUZA SANTOS, 1992) dexidroxilar-se-ia em menores temperaturas, pode estar associado a heterogeneidades de temperaturas no forno utilizado.

Analisando a Figura 4.8b pode-se observar que as misturas com 70 % de RCG + 30 % de RCF e com 50% de RCG + 50% de RCF também foram as que apresentaram maiores índices de atividade pozolânica (maiores resistências), independentemente da temperatura de queima. Verifica-se também que há um aumento da resistência conforme se aumenta a temperatura de queima, tal como observado para os valores de resistência aos 7 dias de cura (Figura 4.8a). No entanto, a resistência da argamassa contendo a mistura com 50% de RCG e 50% de RCF é similar a da argamassa com resíduos na proporção de 70/30 de RCG/RCF aos 28 dias de cura, o que não foi observado para os 7 dias de cura. O que indica que a evolução da reação pozolânica pode ter favorecido a evolução da resistência, sobrepondo-se ao efeito físico de preenchimento e densificação da interface agregado/aglomerante mais pronunciado nos primeiros dias de cura e aparentemente mais pronunciado na mistura com 70% de RCG e 30% de RCF.

Com base nos resultados observados verifica-se que as misturas que apresentam maior potencial tecnológico para incorporação e confecção de argamassas de alvenaria são as com proporções de 70/30 e 50/50 de resíduo grosso/resíduo fino. Assim, por uma questão de custos energéticos acredita-se que é tecnologicamente mais favorável o uso da mistura com 50% de ambos os resíduos para o desenvolvimento das argamassas.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 estão apresentados os difratogramas das argamassas incorporadas com a mistura de resíduos na proporção de 50% de RCG e 50% de RCF após calcinação nas temperaturas de 700° C e 800° C, respectivamente.

Analisando a Figura 4.9 verifica-se que as argamassas incorporadas com 50%RCG + 50%RCF calcinados na temperatura de 700°C apresentou as seguintes fases mineralógicas após cura aos sete dias: carbonato de cálcio (calcita magnesiana), mica, quartzo, feldspato, silicato de alumínio e cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (cal) e caulinita. Através desse difratograma pode-se concluir que o resíduo apresenta atividade pozolânica com o desenvolvimento de CSH, mas que, aparentemente a reatividade do resíduo não foi suficiente para reagir com todo o hidróxido de cálcio, sendo observado resíduo de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio. Nesse

sentido, observa-se a presença de mica e caulinita mesmo após a calcinação, o que indica que a temperatura de calcinação foi insuficiente para a destruição da estrutura de todos os argilominerais e, por conseguinte, se atingir a total capacidade de reação pozolânica (pozolanicidade) do resíduo. O que poderia justificar a presença residual dos hidróxidos e carbonato de cálcio.

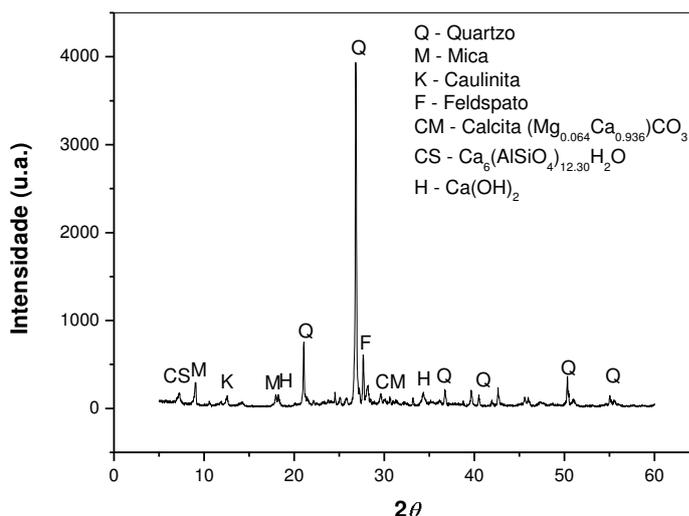


Figura 4.9. Difratograma da argamassa com 50%RCG + 50RCF calcinado na temperatura de 700°C

Analisando a Figura 4.10 verifica-se que as argamassas incorporadas com 50%RCG + 50%RCF calcinados na temperatura de 800°C apresentou as seguintes fases mineralógicas após cura aos sete dias: carbonato de cálcio (calcita magnesiana), mica, quartzo, feldspato, silicato de alumínio e cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (cal) e a um sulfato hidratado de ferro. Com base no difratograma verifica-se que a presença de hidróxido de cálcio na argamassa constituída por resíduo após calcinação a 800°C é muito pequena (há apenas um pequeno pico, relativamente bem menor do que o observado na Figura 4.9), evidenciando a não observação de picos relativos a caulinita, indicando sua total destruição e por conseguinte aumento da capacidade pozolânica (capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio) do resíduo.

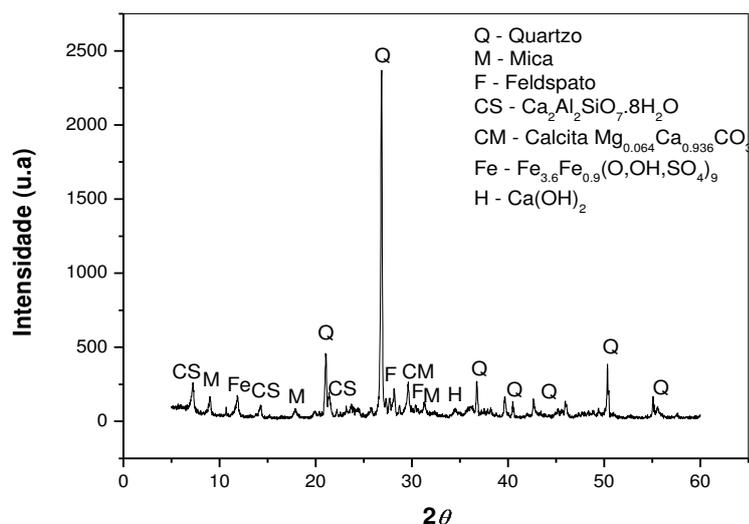


Figura 4.10. Difratoograma da argamassa com 50%RCG + 50%RCF calcinado na temperatura de 800°C.

Observa-se que os picos associados a mica ainda estão presentes no material, o que pode indicar que a temperatura de calcinação de 800°C não foi suficiente para a total destruição da estrutura cristalina desse material. Dados da literatura (GRIM, 1968) indicam temperaturas em torno de 780 a 860°C para a distribuição da estrutura da mica, o que está de acordo com os resultados obtidos nesse trabalho.

Foi observada a presença de um sulfato hidratado de ferro quando da calcinação a 800°C na amostra analisada. Esse material pode ser oriundo de contaminação do resíduo durante a calcinação pelo suporte de cerâmica vermelha usado durante a queima. Caracterizando a coloração levemente rosada-avermelhada do resíduo após a calcinação nessa temperatura.

Os resultados de difração de raios X vêm ao encontro dos dados observados com a determinação do índice de atividade pozolânica, onde se observou que a mistura de resíduos quando calcinado a 800°C apresentavam um maior índice de atividade que quando queimado a 700°C. O que está relacionado a destruição da estrutura de toda a caulinita presente no resíduo e maior formação de CSH durante a cura.

A Figura 4.11 apresenta a curva da análise térmica da argamassa incorporada com 50%RCG e 50%RCF, calcinado a temperatura de 700°C.

Avaliando a curva verifica-se que argamassa incorporada com resíduo de caulim calcinado a 700°C apresenta as seguintes transformações térmicas: pequeno pico endotérmico com máximo em 120°C característico da presença de água livre; pequeno pico a 230°C característico da presença de água adsorvida e coordenada; pico de média intensidade a 520°C característico da presença do hidróxido de cálcio; pico endotérmico de pequena intensidade referente a transformação do quartzo alfa em quartzo beta; pico de grande intensidade por volta de 810°C característico da presença de carbonato de cálcio.

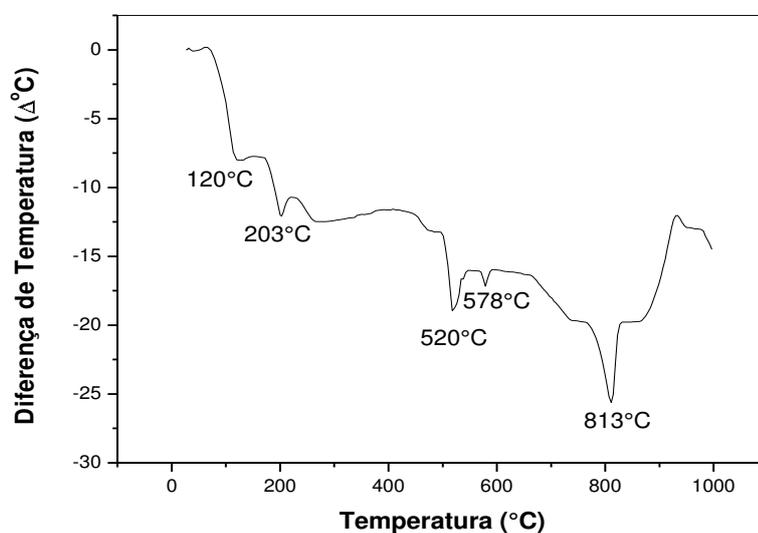


Figura 4.11. Análise térmica diferencial da argamassa contendo 50%RCG+50%RCF calcinado na de 700°C

A Figura 4.12 apresenta a curva da análise térmica gravimétrica (TG) das argamassas incorporadas com 50%RCG+50RCF para temperatura de 700°C.

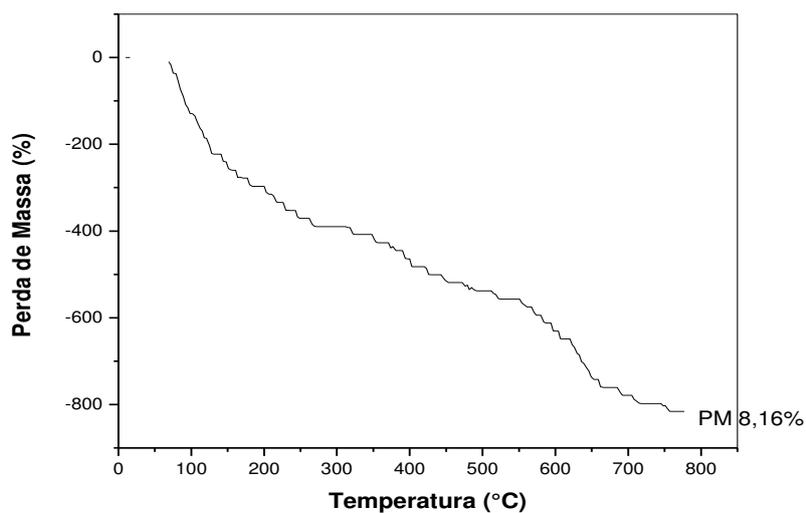


Figura 4.12. Análise térmica gravimétrica da argamassa contendo 50%RCG+50%RCF calcinado na temperatura de 700°C

Analisando a Figura 4.12, verifica-se que a argamassa incorporada com 50%RCG + 50%RCF na temperatura de calcinação de 700° C apresenta uma perda de massas de 8,16% correspondente a água livre e adsorvida, hidróxido de cálcio e carbonato cálcio.

A Figura 4.13 apresenta a curva da análise térmica diferencial da argamassa incorporada com 50%RCG + 50%RCF calcinado na temperatura de 800°C.

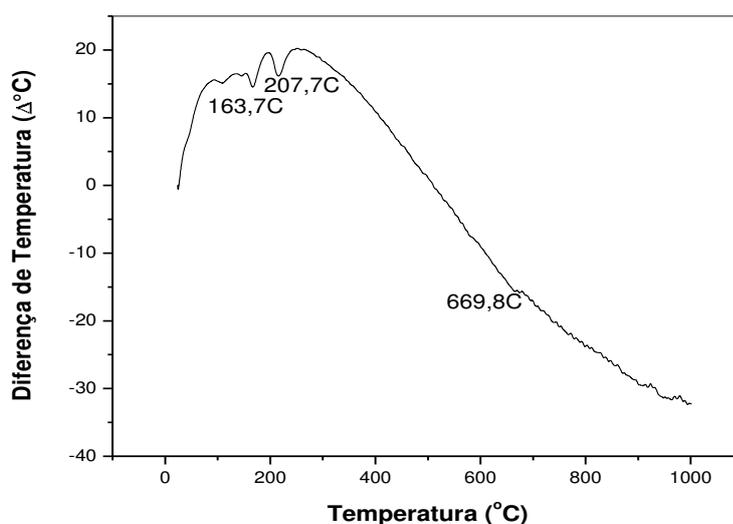


Figura 4.13. Análise térmica diferencial da argamassa contendo 50%RCG+50%RCF calcinado na de 800°

Avaliando a curva da Figura 4.13 verifica-se que argamassa incorporada com resíduo de caulim a 800°C apresenta as seguintes transformações térmicas: pequeno pico endotérmico com máximo em 163°C característico da presença de água livre; pequeno pico a 207°C característico da presença de água adsorvida e coordenada; pico de pequena intensidade a 669°C. Esse pico pode está associado a desidroxilação do silicato de alumínio e cálcio hidratado observado na difração de raios X ou a desidroxilação da mica. Na Figura 4.11 não foi observado esse pico, no entanto isso pode está associado a grande intensidade dos picos presentes naquela curva o que pode ter sobreposto esses pequenos picos.

Verifica-se que não há picos relativos a desidroxilação de hidróxido de cálcio ou descarbonatação do carbonato de cálcio, o que indica que a reação pozolânica foi muito mais intensa quando da calcinação do resíduo a 800°C. Na difração de raios X foram observados picos muito pequenos de hidróxido e carbonato de cálcio quando da calcinação da mistura de resíduos, afirmando os dados observados na análise térmica, que apenas por uma questão de maior ou menor precisão não detectou esses materiais por estarem presentes em pouca quantidade na argamassa.

A Figura 4.14 apresenta a curva da análise térmica gravimétrica das argamassas incorporadas com 50%RCG e 50%RCF calcinado na temperatura de 800°C.

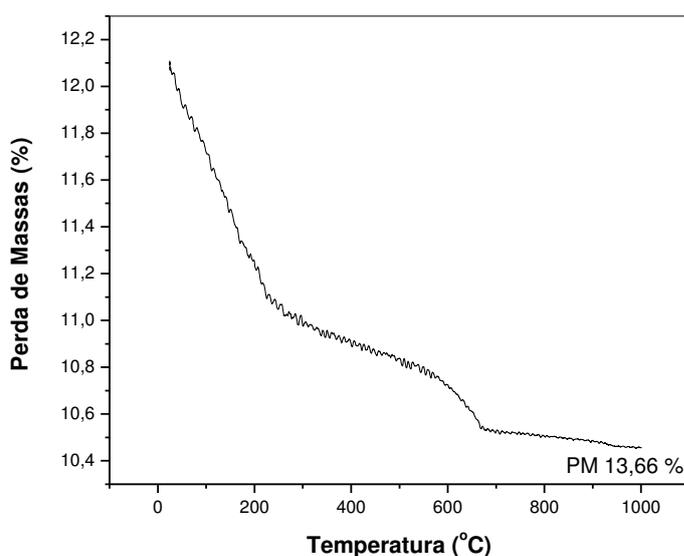


Figura 4.14. Análise térmica gravimétrica da argamassa contendo 50%RCG+50%RCF calcinado na temperatura de 800°C

Analisando a Figura 4.14 verifica-se que a argamassa incorporada com 50%RCG+50%RCF calcinado a 800° C apresenta uma perda de massa de 13,66%.

✓ Argamassas de Alvenaria Contendo Resíduo

Com base nos resultados do índice de atividade pozolânica que demonstraram que os melhores índices foram obtidos com as misturas de resíduos nas proporções de 70% de RCG + 30% de RCF e de 50% de RCG + 50% de RCF, na constatação que após 28 dias de cura os valores de resistência das argamassas contendo resíduo calcinado a 800°C foram similares e na observação que o resíduo grosso tem um maior custo energético para sua moagem, utilizou-se a mistura de resíduos na proporção de 50% de RCG + 50% de RCF, calcinado a 800°C, para a confecção das argamassas de alvenaria contendo cimento, cal e areia.

A Figura 4.15 apresenta os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com resíduos 50%RCG + 50%RCF calcinado na temperatura de 800° C, para o traço 1:4:28 (cimento:cal:areia) utilizado em assentamento de tijolos de alvenaria, curado por períodos de 28, 60 e 90 dias.

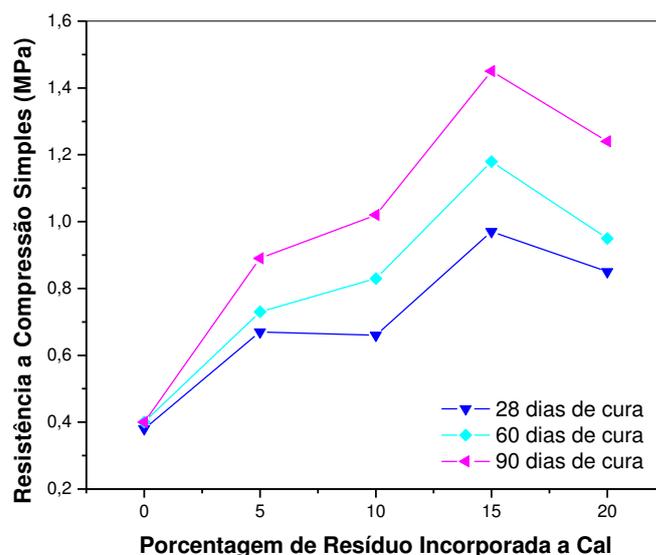


Figura 4.15 Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com resíduos, 50%RCG+50%RCF, calcinados na temperatura de 800° C para o traço 1:4:28, curados por períodos de 28dias, 60dias e 90 dias.

Analisando os valores das resistências à compressão simples (RCS) contidos na Figura 4.15, verifica-se que o comportamento mecânico dos corpos-de-prova incorporados com 15% de resíduo (50%RCG+50%RCF) foram superiores aos convencionais, sendo o valor máximo de 1,45 MPa obtido para o período de cura de 90 dias. Isto pode ser justificado pelo fato de que os resíduos calcinados na temperatura de 800°C apresentaram elevado índice de atividade pozolânica e capacidade de ação como “filler”, tal como evidenciado por Menezes (2009b) ao se analisar a reciclagem de resíduos do beneficiamento do caulim. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28 dias 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 4.16 estão apresentados os valores das resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com resíduos 50%RCG + 50%RCF calcinados na temperatura de 800° C, para o traço 1:2:9 utilizado em reboco de alvenaria, curados por períodos de 28, 63 e 91 dias.

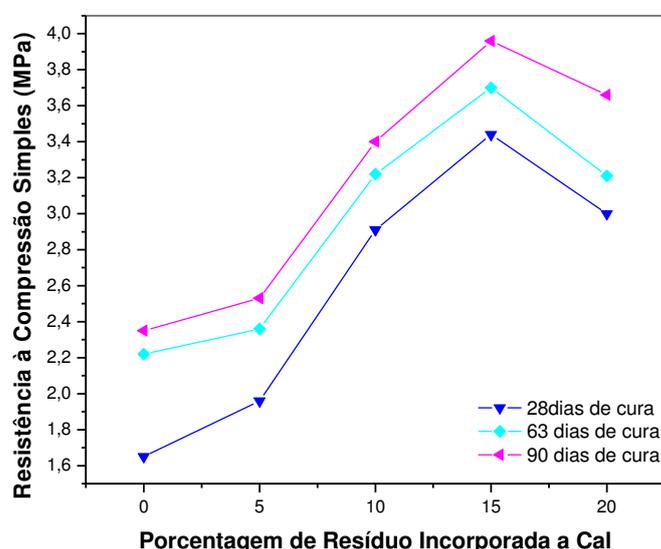


Figura 4.16. Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com resíduos 50%RCG + 50%RCF calcinados na temperatura de 800°C para traço 1:2:9, curados por períodos de 28, 63 e 91 dias.

Analisando as curvas da Figura 4.16 verifica-se que os corpos-de-prova incorporados com 15% de resíduos 50%RCG + 50%RCF calcinados na temperatura de 800°C obtiveram valores de RCS superiores em relação aos convencionais, sendo o aumento na ordem de 66% ao se considerar a cura por 90 dias (aumento de 2,33 para 3,96MPa). O acréscimo nos valores de RCS dos corpos-de-prova com misturas dos resíduos de caulim calcinado na temperatura de 800°C pode ser atribuído ao índice de atividade pozolânica elevada nesta temperatura e a possível capacidade do resíduo em melhorar o empacotamento do sistema.

Estudos (FARIAS FILHO et al., 2007; OLIVEIRA E BARBOSA, 2006 CASTRO, 2008), observaram melhoras nos resultados da resistência à compressão simples de argamassas cimento:cal:areia quando da utilização de materiais pozolânicos a base de metacaulinita, (produzidos pela desidroxilação de caulinitas presentes em caulins ou em resíduos cauliníticos) em substituição parcial ao cimento e a cal. Verificou-se que o material pozolânico poderia substituir o cimento em teores de até 20%, representando uma grande economia energética, já que o material pozolânico requer temperaturas de queima da ordem de um terço das utilizadas para produzir o clínquer. O que tem grande implicações ecológicas e econômicas, favorecendo o desenvolvimento sustentável e possibilitando a redução dos custos dos materiais de construção. Assim, observa-se que este trabalho apresenta resultados de acordo com a literatura, verificando-se que é possível a substituição do agente aglomerante em teores de até 20% com melhoras nas propriedades mecânicas das argamassas confeccionadas.

O presente trabalho também evidencia a 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. O que é de suma importância tecnológica e social em um país com um elevado déficit habitacional e que busca, juntamente com o restante do mundo, atingir o desenvolvimento sustentável, respeitando a evolução industrial e econômica, mas também o meio ambiente e as gerações futuras.

5 CONCLUSÃO

Após os estudos da atividade pozolânica dos resíduos de caulim, para utilização em argamassas de assentamento e revestimento 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 ensaios que determinam o índice de atividade pozolânica com a cal demonstraram que os resíduos calcinados incorporados as argamassas apresentam índices de atividade pozolânica acima do exigido pelas normas ABNT e ASTM;
- dentre as composições estudadas observou-se que a 80%RG+20%RF nas temperaturas de 600 °C os valores apresentados não se encontram dentro dos parâmetros exigidos pelas normas da ABNT;
- as composições estudadas em temperaturas acima de 700° C apresentam atividade pozolânica de acordo com as normas da ASTM e ABNT;
- os melhores resultados obtidos foram para as composições de 50%RG+50%RF e 70%RG+30%RF para todas as temperaturas de calcinação;
- as argamassas alternativas incorporadas com resíduos de caulim para assentamento e revestimento apresentaram resistências mecânicas superiores as convencionais;
- as argamassas alternativas incorporadas com os resíduos de caulim apresentaram resistências mecânicas compatíveis com as especificações das normas da ABNT e ASTM;
- As argamassas incorporadas com resíduos de caulim poderão ser utilizadas como argamassas de alvenarias para assentamento e revestimento de paredes.

Através dos resultados obtidos neste trabalho, constatou-se que a obtenção de pozolanas de alta reatividade oriundas dos resíduos de caulim calcinados, proporcionou às argamassas incorporadas com resíduos de caulim calcinado em temperaturas superiores a 700°C, elevadas atividades pozolânicas e comportamento mecânicos superiores as normas da ABNT e ASTM. Os resultados evidenciaram também que as argamassas alternativas utilizando resíduo calcinado poderá substituir parte da cal para uso em alvenarias de assentamento e revestimento para construção de edificações, e que dessa forma estará contribuindo significativamente para a redução do impacto ambiental causado pela deposição desordenada desses resíduos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o resíduo de caulim para uso em argamassas de elevação de alvenarias;
- Estudar a granulometria adequada para incorporação do resíduo em argamassas para elevação;
- Avaliar a patologia de argamassas com resíduos de caulim para elevação e revestimento de alvenarias;
- Melhorar e/ou avaliar a viabilidade da 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.

REFERENCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos NBR 13281 Rio de Janeiro: 2001 3 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da resistência à compressão NBR 7215. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 8p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: terminologia: NBR 13529/1995. Rio de Janeiro, 1995. 8p.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal, NBR 5751, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Pozolanas - Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland, NBR-5752, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas - Materiais pozolânicos, NBR 12653, 1992.

ACI- American Concrete Institute; Cementitious Materials for Concrete – ACI Education Bulletin E3-01, 2001.

ANDREOLA, F.; Barbieri, L.; Corradi, A.; Lancellotti, I.; Manfredini, T. Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing. Journal of the European Ceramic Society, v.22, p.1457-1462, 2002.

AMB- 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.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. Philadelphia: ASTM 618C, 1992. 3p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Specification for Pozzolanic Lime for Structural Purposes. Pennsylvania, ASTM C1707, 2009. 3p

AZEREDO, Hélio Alves de. O Edifício e o seu acabamento. São Paulo: Edgard Blücher, 1987.

BINDIGANAVILE, V.; Banthia, N. Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin. Cement & Concrete Composites, v.23, p.503-514, 2001.

BUNDY, W. M., “The Diverse Industrial Applications of Kaolin”. In: MURRAY, H. H., BUNDY, W. M., HARVEY, C. C. (eds), “Kaolin Genesis and Utilizations”, p. 43-75, Colorado, USA, The Clay Minerals Society 1993

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

CASTRO, Weyne Almeida de Melo Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil. Dissertação de Mestrado. UFCG- Campina Grande, 2008 89f.:

CETEM- Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Comunicação Técnica elaborada para o Livro Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações Capítulo 12 – pág. 255 – 294 Rio de Janeiro Dezembro/2008.

CHEN, P. Y., LIN, M. L., ZHENG, Z., “On the Original of the name Kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China”, *Applied Clay Science*, v. 12, p. 1 – 25. 1997.

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

COSTA, C.G. Incorporação do Resíduo de Caulim em Concreto Asfáltico. Dissertação de Mestrado .Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal-RN, 2006, 106f.

GRIM, R. E., *Clay mineralogy*, 2nd ed., New York, McGraw-Hill Book 565p, 1968

DOMONE, P. L. J. Concrete. *In: Construction Materials: Their Nature and Behaviour*.

DUTRA, R; Beneficiamento dos minerais industriais. 49^o Congresso brasileiro de cerâmica, São Pedro – SP, 2005 in *Souza, Harima e Leite 2007*.

DNPN - Departamento Nacional de Produção Mineral - Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 35, 2006.

J. M. ILLSTON and P. L. J. Domone. Third Edition. Edited by Spon Press, p. 119, 143-160, 2001. New York

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.

HANAI, JOÃO. B. construções de Argamassa Armada Editora PINI, p.19-98, 1992. São Paulo

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

IS - Indian Standards Institution. Specification for burnt clay pozzolan. IS 1344, New Delhi, 1968.

KHATIB, J. M.; WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, v.26, p.1545-1553, 1996.

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.

LEA, F. M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. Third Edition. Chemical Publishing Company Inc., 727p 1971.

LIMA, V.A, DANTAS, E.R, Construção de Tijolo Ecológico com Rejeito Oriundo do Beneficiamento do Caulim XVI Congresso de Iniciação Científica da UFRN Natal, 2005, Anais... XVI CIC 2005

LIMA JÚNIOR, H. C.; Willrich, F. L.; Barbosa, N. P. Structural behavior of load bearing brick walls of soil-cement with the addition of ground ceramic waste.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.3, p.552-558, 2003

LOURENCI, S. Caracterização de argamassas de revestimentos fabricadas com material alternativos. Dissertação de Mestrado 129p. Joinville CCT-UNDESC 129p 2003.

LUZ, A. B. e CHAVES, A. P.- Tecnologia do Caulim: ênfase na indústria de papel, 72p. Série Rochas e Minerais Industriais no 1, CETEM/MCT 2000.

LUZ, A. B., Campos, A. R., Carvalho, E. A., Bertolino, L. C., “Caulim - Usos e Especificações”. In: LUZ A. B. e LINS F. F (eds) *Rochas e Minerais Industriais* Centro de Tecnologia Mineral, 1 ed., cap. 11, Rio de Janeiro, Brasil 2005.

LUZ, A. B., DAMASCENO, E. C. “Caulim: Um mineral industrial importante”. In: *Tecnologia Mineral*, v. 65, 1993

MÁRTIRES, R. A. C. *Caulim*. In: Anuário Mineral Brasileiro - DNPM (Departamento Nacional de Processamento Mineral), Brasília 2000.

MASSAZZA, F. Em *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*; Hewlett, P. C., ed.; 4th ed., cap. 10. J. Wiley: New York, 1988,

MENEZES, R. R.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Lira, H. L. Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil. *Environmental Management and Health*, v.13, p.134-142, 2002

MENEZES, R.R; J. Farias Filho, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. C. Ferreira. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. *Revista Cerâmica* v.55, n.335, p.263-270, 2009

MENEZES, R.R Neves A.G, Souza J, Melo A. M, Heber S. Ferreira & Heber C. Ferreira Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.13, n.6, p.795–801, 2009

MENEZES, R. R.; de Almeida, R. R.; Santana, L. N. L.; Neves, G. A.; Lira, H. L.; Ferreira, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v.53, p.192-199, 2007.

NITA, Clovis. Vanderley M. J Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. EPUSP, 13 p São Paulo, 2007.

MONTE, M. B. M., Carvalho, e. A., Ferreira, O. Cabo, S. S., “Caulim CADAM”. In: SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B., LINS, F. F. (eds), *Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil*, 1 ed., cap. 01, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

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.

MURRAY, H. H., KOBEL, J. E Centro de Tecnologia Mineral “Engineered clay products for the paper industry”, *Applied Clay Science*, v. 28, p. 199-206, 2005.

MURRAY, H.H. e Keller W. Kaolins, kaolins, and kaolins. In *Kaolin Genesis and Utilization*, H. Murray, W. Bundy, and C. Harvey, Editors, The Clay Minerals Society: Boulder, p. 1-24. 1993

NASCIMENTO, M.C. Argamassa Térmica Produzida com Resíduo da Exploração e Processamento Mineral de Caulim e Vermiculita Expandida. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. UFPE- CTG, Pernambuco, 2008 129f.

- PEREIRA**, da Silva, Sebastião. Anuário Brasileiro de Minérios. Geólogo do 5º Distrito do DNPM-PA. 2001.
- 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), USA, p. 1-12, Charlotte, NC, USA 2005.
- ROJAS**, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of hydration phases of metakaolin – lime – water systems. Cement and Concrete Research, v. 32, 133-138, 2002
- SANTOS**, P. S.; Ciência e Tecnologia de Argilas. vol. 2, p. 393-398, Edição da universidade de São Paulo, 1975.
- 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.
- SHI**, C.; DAY, R. L. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism. Cement and Concrete Research, v.30, p.607-613, 2000.
- SILVA** A. L, Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassas. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Universidade Federal de Itajubá, 2006, 81f.
- SILVA**, F. A. N. GOMES. Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó (RN), Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. XVI, 2007, 70f.
- SILVA, L. A.** Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassas. Dissertação de Mestrado. Dezembro de 2006
- SILVA**, M. R. R., DANTAS, J. R. A., “Província pegmatítica da Borborema-Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte”. In: Departamento Nacional de Produção Mineral-CPRM *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, 1 ed., v. 4b, Brasília, Brasil, 1997.
- SOUZA** Santos, P. Ciência e tecnologia de argilas. v.1, 2.ed. SãoPaulo: Edgard Blücher Ltda., 408p 1992.
- 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.
- TANNO**, L.C. e Motta, J.F.M. (2000). Panorama Setorial – Minerais Industriais. In: Cerâmica Industrial, n.5, p.37-40
- VANDERLEY** Moacyr John. - (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/451) -- São Paulo : EPUSP, 2007. 13 p.
- VARELA**, M.L.Vale S A, do Nascimento,R.M; PaskocimaS C.A, Formiga,F.L.- Utilização dos Resíduos Provenientes da Cadeia da Construção Civil e da Indústria do Beneficiamento do Baulim na Produção de Piso Cerâmico. XXI ENTMME. NATAL-RN, 2005.