



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICA VERMELHA UTILIZANDO REJEITOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Juliana Emília de Oliveira Silva**

Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Acchar

Dissertação n.º 21/PPGCEM

Novembro de 2007  
Natal - RN

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

JULIANA EMÍDIA DE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICA VERMELHA UTILIZANDO  
REJEITOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

NATAL  
2007

JULIANA EMÍDIA DE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICA VERMELHA UTILIZANDO  
REJEITOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área e concentração: Cerâmicas  
Orientador: Professor Dr. Wilson Acchar

NATAL  
2007

Divisão de Serviços Técnicos  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila  
Mamede

Silva, Juliana Emídia de Oliveira.

Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil / Juliana Emídia de Oliveira Silva. – Natal [RN], 2007.

74 f.

Orientador: Wilson Acchar.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais.

1. Resíduo de construção - Dissertação. 2. Cerâmica - Dissertação. 3. Argila - Dissertação. 4. Reaproveitamento - Dissertação. I. Acchar, Wilson. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.4.036(043.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS-PPGCEM

DECLARAÇÃO

Declaramos, para todos os fins, que **Juliana Emídia de Oliveira Silva**, defendeu sua Dissertação de Mestrado intitulada "Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil.", em 23 de novembro de 2007, no Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo sido APROVADA, com conceito A...

Natal, 23 de novembro de 2007.

*Prof. Dr. Wilson Acchar*  
Orientador e Presidente da Banca

*Prof. Dr. Ricardo Silveira Nasar*  
Examinador Interno

*Prof. Dr. Francisco Antônio Vieira*  
Examinador Externo

*Prof. Dr. Sônia Regina Homem de Mello Castanho*  
Examinador Externo

VISTO

*Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas*  
Vice-Coordenador do PPGCEM

## AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Senhor.

Aos meus pais que sempre me incentivaram a fazer aquilo que desejei.

Ao professor Dr. Wilson Acchar, pela atenção, paciência e estímulo durante o processo de orientação deste trabalho.

A Grace, minha irmã, que disponibilizou parte de seu tempo auxiliando nas dificuldades encontradas durante todo o mestrado, te amo.

Aos que fazem o LABCEM, que sempre me ajudaram em tudo.

Silva, J. E. O. **Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil**, 2007, 75 f. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

A indústria da construção civil tem sido um dos setores que mais tem contribuído com a poluição do meio ambiente devido a grande quantidade de resíduos gerados pela construção, demolição e extração de matéria prima. Como forma de minimizar os impactos ambientais gerados, alguns órgãos governamentais tem elaborado leis e medidas sobre a disposição de resíduos da construção civil (CONAMA – resolução 307). Este trabalho tem como objetivo estudar o reaproveitamento de resíduos da construção civil composto de areia, concreto, cimento, tijolos vermelhos, e blocos de cimento e argamassa na massa para fabricação de cerâmica vermelha, com o objetivo de minimizar custos e impactos ambientais gerados. As amostras investigadas continham 0% a 50% em peso de resíduo, sendo sinterizadas nas temperaturas de 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C e 1150 °C. Após a sinterização as amostras foram submetidas a ensaios de absorção de água, retração linear, resistência à flexão, porosidade aparente, massa específica, DRX e MEV. Foram obtidos resultados satisfatórios em todas as composições estudadas, sendo possível a incorporação de até 50% de resíduo nas massas cerâmicas sem grandes perdas na resistência mecânica, apresentando melhores resultados para a incorporação de 30% de resíduos na massa de fabricação de peças cerâmicas como telhas, tijolos de alvenaria e furados.

Palavras-chave: resíduo de construção; cerâmica; argila; reaproveitamento.

Silva, J. E. O. **Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil**, 2007, 75 f. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

The Industry of the Civil Construction has been one of the sectors that most contribute to the pollution of the environment, due to the great amount of residues generated by the construction, demolition and the extraction of raw material. As a way of minimizing the environmental impacts generated by this industry, some governmental organizations have elaborated laws and measures about the disposal of residues from the building construction (CONAMA - resolution 307). This work has as objective the reutilization of residues compound of sand, concrete, cement, red bricks and blocks of cement and mortar for the production of red ceramic, with the objective of minimizing costs and environmental impacts. The investigated samples contained 0% to 50% of residues in weight, and they were sintered at temperatures of 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C and 1150 °C. After the sinterization, the samples were submitted to tests of absorption of water, linear retraction, resistance to bending, apparent porosity, specific density, XRD and SEM. Satisfactory results were obtained in all studied compositions, with the possible incorporation of up to 50% of residues in ceramic mass without great losses in the mechanical strength, giving better results to the incorporation of 30% of residues in the fabrication of ceramic parts, such as roofing tiles, bricks masonry and pierced bricks.

Key-words: construction residue; ceramic; clay; reutilization.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fluxograma 01:	Metodologia utilizada .....	34
Quadro 02:	Composição química das matérias-primas utilizadas .....	48
Gráfico 03:	Difratograma de raios-X da argila .....	49
Gráfico 04:	Difratograma de raios-X do resíduo .....	50
Gráfico 05:	Distribuição granulométrica da argila .....	51
Gráfico 06:	Distribuição granulométrica do resíduo .....	51
Quadro 07:	Resumo da distribuição granulométrica das matérias primas em estudo .....	52
Gráfico 08:	Comportamento dilatométrico das massas cerâmicas de argila + 30% de resíduo .....	53
Gráfico 09:	Curva termogravimétrica (TG) e curva termodiferencial (DTA) da argila .....	55
Gráfico 10:	Curva termogravimétrica (TG) e curva termodiferencial (DTA) do resíduo .....	55
Gráfico 11:	Retração linear dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.....	56
Quadro 12:	Propriedades físico-mecânicas determinada em laboratório, requeridas para a aplicação em produtos de cerâmica vermelha .....	57
Gráfico 13:	Absorção de água dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo .....	58
Gráfico 14:	Porosidade dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de Resíduo .....	60
Gráfico 15:	Massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.....	60
Gráfico 16:	Tensão de ruptura a flexão dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo .....	62
Gráfico 17:	Curva de gresificação da argila sem resíduo .....	63
Gráfico 18:	Curva de gresificação da argila com 10% de resíduo .....	63

Gráfico 19:	Curva de gresificação da argila com 20% de resíduo .....	64
Gráfico 20:	Curva de gresificação da argila com 30% de resíduo .....	64
Gráfico 21:	Curva de gresificação da argila com 40% de resíduo .....	65
Gráfico 22:	Curva de gresificação da argila com 50% de resíduo .....	65
Quadro 23:	Temperaturas de gresificação das massas cerâmicas com resíduos em função da retração linear e da absorção de água .....	66
Fotografia 24:	Micrografia MEV da superfície polida amostra A01150 (100x) .....	67
Fotografia 25:	Micrografia MEV da superfície polida amostra A201150 (100x) .....	67
Fotografia 26:	Micrografia MEV da superfície polida amostra A301150 (100x) .....	67
Fotografia 27:	Micrografia MEV da superfície polida amostra A401150 (100x) .....	68
Quadro 28:	Temperaturas de sinterização e porcentagem de incorporação .....	70

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

A01150 – Amostra com 0% de adição de resíduo sinterizada a 1150 °C

A201150 – Amostra com 20% de adição de resíduo sinterizada a 1150 °C

A301150 – Amostra com 30% de adição de resíduo sinterizada a 1150 °C

A401150 – Amostra com 40% de adição de resíduo sinterizada a 1150 °C

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas.

AG - Análise granulométrica.

ASTM - American society for testing and materials

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTGÁS - Centro de Tecnologias do Gás.

DRX - Difração de raios X.

DTA - Análise diferencial termogravimétrica.

EDX - Espectroscopia por fluorescência de raios X por energia dispersiva.

ETE - Estação de tratamento de esgoto.

IP - Índice de plasticidade.

LABCEM - Laboratório de Cerâmica e Metais Especiais.

MEV - Microscópio eletrônico de varredura.

NEPGN - Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural.

TG ing. thermogravimetry - (termogravimetria).

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....	14
2.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1.	Materiais Cerâmicos .....	19
2.1.1.	Argilas.....	19
2.1.2.	Resíduos da Indústria da Construção Civil.....	20
2.2.	Resolução 307-CONAMA .....	21
2.3.	Utilização dos Resíduos Industriais em Aplicações Cerâmicas .....	22
3.	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	33
3.1.	Matérias Primas.....	35
3.1.1.	Argilas.....	35
3.1.2.	Resíduo .....	35
3.2.	Caracterização das Matérias Primas .....	36
3.2.1.	Caracterização Química .....	36
3.2.2.	Limite de Atterberg e Plasticidade .....	36
3.2.3.	Análise Granulométrica .....	38
3.3.	Análise Térmica.....	39
3.3.1.	Dilatometria .....	39
3.3.2.	Análise Termogravimétrica e Térmica Diferencial .....	40
3.4.	Preparação das Massas Cerâmicas e Corpos de Prova .....	41
3.5.	Sinterização dos Corpos de Prova .....	41
3.6.	Corpos Sinterizados .....	42
3.6.1.	Retração Linear (RL) .....	42
3.6.2.	Absorção de Água (AA) .....	43
3.6.3.	Porosidade Aparente .....	43
3.6.4.	Massa Específica Aparente (Mea).....	44
3.6.5.	Tensão de Ruptura À Flexão .....	45
3.6.6.	Análise por Difração de Raios – X.....	45
3.6.7.	Análise Microestrutural .....	46
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
4.1.	Caracterização das Matérias Primas.....	48
4.1.1.	Caracterização Química .....	48
4.1.2.	Análise Granulométrica .....	50
4.1.3.	Limite de Atterberg .....	52
4.2.	Análise Térmica.....	52
4.2.1.	Comportamento Dilatométrico das Massas Cerâmicas .....	52
4.2.2.	Comportamento Termogravimétrico e Termodiferencial.....	53
4.2.3.	Retração Linear .....	56

4.3. Caracterização dos Corpos de Prova Sinterizados .....	57
4.3.1. Absorção de Água .....	57
4.3.2. Porosidade Aparente .....	59
4.3.3. Massa Específica .....	60
4.3.4. Resistência Mecânica.....	61
4.3.5. Temperatura de Gresificação .....	62
4.3.6. Microestrutura.....	66
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

---

## CAPÍTULO 1

### *Introdução*

---

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A indústria da construção civil, ao longo do tempo, vem sendo uma das maiores produtoras de resíduos. O alto nível de desperdício tem totalizado mais de 30% dos custos da obra. Isso se deve a falta de um planejamento mais cuidadoso nas etapas da construção como: elaboração de projetos, orçamento e execução. Mudanças e incompatibilidade dos diversos projetos que compõe o empreendimento são detalhes que vem à tona somente no momento da execução; má disposição dos materiais no canteiro de obras; uso de mão de obra desqualificada.

O desperdício não atinge somente o bolso dos consumidores e construtores, mas também o meio ambiente, pois não há controle quanto à extração materiais, e por se tratar de recursos não renováveis sua extração e o uso deveriam ser mais racionais, sendo o grande responsável pela degradação ambiental de grandes áreas.

O resíduo da construção civil é composto por restos de argamassas, tijolos, concretos, demolição, restos de pisos cerâmicos e madeira proveniente de formas. Pode-se notar que se trata de um lixo composto em sua maior parte por materiais inertes, e que poderiam ser reaproveitados na própria obra e evitando a extração de matérias primas.

Apesar de inertes, os resíduos têm se acumulado em torno dos grandes centros urbanos, ou ocupando grandes volumes nos aterros sanitários. Os resíduos são muitas vezes depositados em locais não apropriados como: terrenos baldios (nos centros urbanos) e as margens das estradas e rios, originando ambientes satisfatórios à proliferação de vetores de contaminação e assoreamento dos rios. Tudo isso tem gerado elevados custos às prefeituras, ou aos Estados, que para

combater o despejo em locais impróprios, se mobiliza fazendo a coleta destes resíduos em toda a cidade, ocasionando assim despesas elevadas com limpeza pública.

Até bem pouco tempo a sociedade estava preocupada em extrair e usar sem limite algumas reservas naturais, sem pensar nas gerações futuras, nem na destinação dos resíduos gerados tanto no processo de fabricação e beneficiamento de materiais, quanto após sua utilização. Hoje a preocupação com o meio ambiente tornou-se um assunto em pauta, o aumento populacional tem obrigado o setor industrial a produzir em larga escala, e é cada vez maior a necessidade de matéria prima para a fabricação de bens de consumo que atendam a demanda da sociedade. Para que possamos prolongar o tempo útil de vida do planeta se fazem necessários cuidados como: a racionalização do uso de materiais não renováveis e a reutilização de materiais que são depositados no lixo (resíduos sólidos), mas que ainda apresentam um alto potencial de uso para outros fins. A reutilização de materiais beneficia o meio ambiente, pois contribui para a economia de matéria prima, reduz o consumo de energia na fabricação de produtos, reduz o custo das coletas de resíduos, e aumenta a vida útil dos aterros.

Diante do exposto se fazem necessárias pesquisas que visem o aproveitamento de resíduos na própria construção civil. Uma forma seria a reutilização de resíduos já beneficiados como agregados para a fabricação de produtos cerâmicos e/ou blocos cerâmicos, levando a uma menor necessidade de extração de matérias primas o que ocasionaria em uma diminuição de resíduos destinados a aterros e na redução de custos neste setor.

A proposta deste trabalho é estudar a utilização do resíduo que atualmente é destinado ao aterro sanitário ou "bota-fora" na própria obra, contribuindo para a



diminuição do desperdício e da extração de materiais naturais, deixando os materiais novos para usos mais justificáveis.

O alto potencial de reutilização destes materiais permite que eles sejam usados em várias frentes, como por exemplo, a produção de argamassas, aterros e na fabricação de tijolos e concretos, tornando-se um agregado de boa qualidade.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica. Este capítulo descreve um comentário acerca da resolução 307/2002 do CONAMA que versa sobre a destinação de rejeitos sólidos, e expõe, ainda, uma abordagem de trabalhos desenvolvidos sobre os mais variados resíduos para utilização em produtos da construção civil, como: serragem de granito e mármore, lodo de águas residuárias, rejeitos do setor siderúrgico, cinzas galvânicas, borracha e resíduos de construção e demolição.

O capítulo 3 detalha a metodologia aplicada, como também a descrição e caracterização dos materiais que foram utilizados na pesquisa.

Já no capítulo 4, são delineados os resultados obtidos com a metodologia utilizada e tece um breve comentário acerca de tais resultados.

No capítulo 5, é apresentada a conclusão geral do trabalho, demonstrando deduções baseadas nas análises anteriormente realizadas.

E no capítulo 6, encontra-se todo o acervo bibliográfico utilizado para dar embasamento a esta pesquisa.

---

CAPÍTULO 2

*Revisão bibliográfica*

---

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Materiais Cerâmicos**

#### **2.1.1 Argilas**

Argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que quando umedecido com água transforma-se numa pasta moldável e plástica; podendo ser também o termo que define uma faixa granulométrica do solo com diâmetro inferior a  $2\mu\text{m}$ ; uma mistura de argilo-minerais com estrutura essencialmente filamentosa, que são formados por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio.

As argilas também contêm matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros materiais residuais. O termo argila pode ser usado para classificar materiais resultantes do intemperismo, da ação higrotérmica ou que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos. Após a secagem a argila perde a plasticidade e quando submetidas a temperaturas elevadas, acima de  $1000^{\circ}\text{C}$ , apresentam alta resistência mecânica (SOUZA SANTOS, 1989).

Devido a sua formação, que é de origem sedimentar (materiais compostos por restos de outras rochas, acumuladas em áreas deprimidas), a adição do resíduo, até um determinado limite, na massa argilosa para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha, poderá ser viável visto que há vários constituintes minerais similares em sua composição química.

### **2.1.2 Resíduos da Indústria da Construção Civil**

Atualmente há estudos de reaproveitamento de diversos tipos de resíduos, e grande parte destes são utilizados na confecção de vários produtos para a construção civil, podendo ser encontradas na literatura diversas pesquisas de reutilização de vários materiais como rejeitos de serragem de granito e mármore, lodo de águas residuárias da indústria têxtil, resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico, escória de soldagem, lama galvânica e incorporação de borracha usada na confecção de sandálias e resíduos de construção e demolição. Esses materiais vêm sendo incorporados nas massas cerâmicas para a fabricação de argamassas, blocos, lajotas, telhas e tijolos (cerâmica vermelha) (SCHENINI; BAGNATI ; CARDOSO, 2004).

Os resíduos da construção e demolição são gerados nas obras de construção civil, devido às falhas na elaboração e execução de projetos, má qualidade de materiais, armazenamento inadequado, má qualificação dos operários, falta de orientação técnica e falta de planejamento de etapas de execução. A maior parte dos resíduos de construção é depositada clandestinamente em terrenos baldios, passeios públicos, cursos d'água, as margens de estradas, causando proliferação de vetores de contaminação, assoreamentos de rios, obstrução de sistemas de drenagem, provocando comprometimento da paisagem urbana e complicações no livre trânsito de veículos e pedestres. O problema se agrava quando o poder público não executa sua retirada, pois se torna área de deposição de outros rejeitos como: podas de árvores, móveis velhos, pneus e resíduos domiciliares. Estes resíduos também podem vir acompanhados de materiais perigosos como latas de tinta e solventes, restos de lâmpadas, gesso e

outros materiais que deveriam ser coletados separadamente para receber o tratamento necessário a sua destinação final. Se coletados separadamente, estes resíduos poderiam ser mais bem aproveitados.

Os resíduos gerados pela construção civil variam dependendo da característica de cada obra e do grau de desenvolvimento da região, mas de uma forma geral é composto por areia, brita, resto de argamassa, concreto, tijolos cerâmicos, madeira, ferro, embalagens de papelão e plásticos. Estes resíduos são classificados, segundo a NBR10004 da ABNT, como resíduos sólidos inertes – Classe III (SCHENINI; BAGNATI; CARDOSO, 2004).

## **2.2 Resolução 307-CONAMA**

A resolução Nº. 307, de 05 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA estabelece a destinação, reuso e reciclagem do entulho produzido pela indústria da construção civil. A resolução transfere a responsabilidade pelo entulho ao seu gerador. De posse desta resolução, o Brasil entra num grupo seleto de países que se preocupam com o destino de seus resíduos. Pode parecer um entrave para a indústria da construção civil, mas as obras que adotaram esta prática têm obtido bons resultados, pois tem se observado a redução de custos e perda de materiais no canteiro.

A resolução não define parâmetros, mas estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, disciplinando ações necessárias para minimizar os impactos ambientais. Para isso, ela define os termos envolvidos como: resíduos de construção civil, geradores, transportadores, agregado reciclado, gerenciamento de resíduos, reutilização, reciclagem, beneficiamento,

aterro de resíduos da construção civil e áreas de destinação de resíduos. E classifica os resíduos em quatro classes: **Classe A** - são resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; **Classe B** – são resíduos recicláveis para outras destinações; **Classe C** – são resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis; **Classe D** – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção.

Os geradores de resíduos são colocados em dois grupos distintos, os grandes geradores (as empresas de construção) e pequenos geradores (a população). Ambos deverão fazer parte de um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil que deverá ser elaborado pelo município. Sendo que os grandes geradores, empresas de construção civil, deverão elaborar Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e os pequenos geradores terão que atuar segundo o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Os projetos deverão contemplar as seguintes etapas: caracterização do resíduo, triagem, acondicionamento, transporte e destinação de acordo com a classe. Sendo proibida sua disposição em aterros de resíduos domiciliares e em áreas de "bota fora".

### **2.3 Utilização dos resíduos Industriais em Aplicações Cerâmicas**

Os resíduos industriais têm sido usados cada vez mais na indústria da construção civil, pois é a atividade que permite maior incorporação de resíduo com menor comprometimento das propriedades finais.

Balaton, Gonçalves e Ferrer, (2002), estudaram a incorporação de resíduos galvânico, chamado de lama galvânica – que é resultado dos processos de limpeza,

lavagem e recobrimento das peças metálicas, em massas de cerâmica vermelha. Para esse trabalho foram utilizadas duas argilas uma vermelha plástica e outra arenosa e de baixa plasticidade, estas foram misturadas para que se obtivessem argilas com propriedades que atendessem a necessidade da indústria de telha e tijolos. Os corpos de prova foram conformados por extrusão e sinterizados em três temperaturas 850 °C, 900 °C, 950 °C.

Foi observado que a adição em até 2% da lama galvânica não trás alterações significativas a massa. Mas uma maior adição de resíduo acarreta a formação de eflorescência na superfície dos blocos, uma vez que o resíduo, uma contém uma alta quantidade de sais solúveis, que na secagem dos corpos de prova, migram junto com a água e após evaporação ficam depositados na superfície do corpo cerâmico. Com a adição de 5% de resíduo foi notado o aumento da porosidade, aumento da absorção de água e diminuição da resistência à flexão no corpo cerâmico, devido a presença de sais solúveis no resíduo. Para a retirada dos sais foi feita uma lavagem prévia do resíduo. Na utilização de 2% do resíduo lavado, sinterizado a 900 °C foi apresentada características muito próximas as da massa de referência que não possui resíduos. Houve a inertização dos resíduos conforme o esperado, sendo uma boa alternativa seu uso em cerâmica vermelha, para o fechamento do ciclo de tratamento da lama galvânica.

Falcão e Stellin (2001), estudaram em escala de laboratório o aproveitamento de resíduos de pó de teares nas serrarias de mármore e granitos na indústria da construção civil. No resíduo há uma parte metálica constituída pela granalha, esta pode ser separada e reutilizada para outro fim. Parte do resíduo foi beneficiada, a granalha, que é a parte metálica do resíduo que contém ferro (Fe), onde foi removido até 75% deste.

A amostra do resíduo foi coletada na barragem de rejeitos, onde ocorre a descarga da lama, por meio de um tubo. Para a produção dos corpos de prova foram usadas misturas de resíduo não-beneficiado e beneficiado, contendo 10%, 20% e 30% de resíduo na massa cerâmica, com adição em peso de 10% de água. Os corpos de prova foram prensados uniaxialmente e sinterizados a 900 °C e 1100 °C. Foram avaliados os seguintes parâmetros: resistência à compressão, absorção de água e retração linear para todas as amostras sinterizadas. Os valores de resistência à compressão ficaram dentro dos valores estabelecidos na norma para produção de tijolos cerâmicos de alvenaria, porém os valores de retração linear a temperatura de 1100 °C ficaram acima do permitido para todos os valores de adição de resíduo.

Também foram produzidos corpos de prova de blocos estruturais onde foram adicionados 10% do resíduo no lugar da areia. Os blocos foram prensados e secos e aos 24 dias e submetidos ao ensaio de resistência à compressão, obtendo resultados satisfatórios ficando a média dos resultados acima do exigido por norma (5,5 MPa aos 28 dias).

De posse dos resultados dos ensaios que se conclui é que a adição de resíduo nos blocos estruturais aumentou a resistência à compressão. Já para os blocos cerâmicos a adição de resíduo na massa não excedeu 30%. Os corpos de prova com resíduo não beneficiado sinterizados a 1000 °C ficaram com os valores dentro dos estabelecidos por norma, mas apresentou defeitos superficiais e internos como coração negro. Na temperatura de 900 °C a resistência mecânica apresentou valores mínimos nas adições de 20% e 30% do resíduo.

Giffoni, Lange (2005), realizou este trabalho como uma busca de tecnologias apropriadas e mais limpas, capazes de promover o reaproveitamento do resíduo de



borra de fosfato na fabricação de blocos cerâmicos (tijolos), com a finalidade de reduzir custos e prejuízos ambientais relativos ao tratamento e disposição final deste e reduzir impactos ambientais decorrentes da extração de matérias-primas diretamente do meio ambiente. O resíduo é gerado em indústrias que possuem em seu processo produtivo a etapa de pintura em superfícies metálicas. A matéria prima utilizada foi coletada na FIAT e a amostra de argila foi da fábrica Cerâmica Vilaça, onde para a realização dos estudos foram formuladas massas cerâmicas com porcentagens da borra de fosfato nas proporções 0% a 20%. Os corpos de prova foram moldados e secos à temperatura de 105°C por 24h, logo após sinterizados a 850°C, semelhante aos procedimentos de escala industrial.

Foi verificado que os resultados dos corpos de prova contendo 0%, 5% e 10% foram bastante semelhantes, enquanto que os corpos de provas contendo 20% do resíduo apresentaram resistência à compressão abaixo do especificado, devido ao aumento da porosidade. Os corpos de prova com resíduo apesar de apresentar resistência à compressão ligeiramente inferior e absorção de água um pouco a baixo, atendiam as normas NBR15270-1 e NBR15270-02 para blocos cerâmicos. Foi realizado o ensaio de solubilização e lixiviação na amostra com 10% de resíduo sendo que este não pode ser considerado inerte pelas normas em vigor, mas não apresenta perigo do ponto de vista ambiental.

A fabricação de blocos de cerâmica de vedação classe 10 utilizando a borra de fosfato é possível, de acordo com os resultados físicos.

Moreira, Oliveira e Lima (2001), discutiram o aproveitamento de um tipo de lodo, gerado na estação de tratamento de esgotos (ETE) de uma indústria têxtil, na fabricação de materiais cerâmicos para construção. O lodo é constituído por um corante, sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) e um polieletrólito catiônico que são usados

como agente floclulantes na ETE. As argilas e o resíduo foram caracterizados, e para a preparação das massas foram utilizados dois tipos de argilas, uma plástica rica em illita e baumita e outra menos plástica rica em quartzo. Para a preparação dos corpos de prova foi utilizada a argila plástica, mais lodo em duas diferentes quantidades 5 e 10% e uma mistura das argilas plástica e menos plástica na mesma proporção e mesma quantidade de lodo (5 e 10%). As amostras foram sinterizadas a 1000°C, 1050°C e 1100°C. Foram realizados os ensaios de retração linear, absorção de água, pH e condutividade elétrica, foi observado que a retração aumentou com a temperatura. A absorção de água aumenta na faixa de temperatura de 1000°C até 1050°C, e diminui para valores acima de 1100°C. Não há variação do pH, mas a condutividade aumenta em função da concentração de lodo usado na amostra. Observaram-se alguns defeitos como: deformação dos corpos de prova, este aumentou com o aumento da concentração de lodo e temperatura, e foi atribuído aos gases formados no interior da peça que não conseguiram sair devido à vitrificação da superfície da amostra; e a presença de "coração negro" no interior das peças, devido à matéria orgânica presente.

Para as amostras confeccionadas com a argila menos plástica foi observado que a retração aumenta com a temperatura e diminui com o aumento do lodo, mas com uma maior quantidade de resíduo, há um aumento na absorção de água. Comparando as duas amostras, foi observado que a retração na amostra confeccionada com a argila menos plástica foi menor que na amostra confeccionada com a argila mais plástica, porém a absorção de água é maior, devido a maior concentração de poros. Para os ensaios de resistência mecânica foram confeccionadas amostras sob uma pressão de 200 kgf/cm<sup>2</sup>, estas foram rompidas após a queima a 1000°C, 1050°C, 1100°C. As amostras confeccionadas com a argila

mais plástica sofreram grande deformação após a sinterização. Já as amostras confeccionadas com argila menos plástica sinterizadas a 1100°C apresentaram pouca deformação e o aparecimento de "coração negro".

Concluiu-se que não é possível utilizar somente a argila plástica para incorporar o lodo, pois os corpos de prova apresentam grandes deformações e a formação de "coração negro". As amostras confeccionadas com argila menos plástica apresentam melhor aspecto. A resistência mecânica em geral aumenta com o aumento da temperatura e a adição do lodo não influencia significativamente. As amostras confeccionadas com argila menos plástica sinterizadas a 1100°C se encontram dentro do limite mínimo de tensão de ruptura à flexão. Sendo possível inserir o lodo da ETE na massa para a fabricação de produtos cerâmicos.

Moreira, Manhães e Holanda (2005), usaram resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense adicionado à argila para fabricação de cerâmica vermelha. O resíduo apresenta-se como um material não plástico, e possui como principais fases cristalinas a sílica e feldspato. Para o estudo foram preparadas 5 massas cerâmicas com adições variando de 0 a 20 % em peso de resíduo de rocha ornamental do tipo gnaisse e uma argila industrial plástica. As massas cerâmicas foram submetidas à compactação de prensagem uniaxial de aproximadamente 26 MPa, e sinterizadas em sete temperaturas entre 850° e 1150°C.

Observou-se que a retração linear dos corpos cerâmicos aumentou com a elevação da temperatura, independente da quantidade adicionada de resíduo. A massa específica aumentou e a absorção de água diminuiu com o aumento da temperatura devido aos fundentes alcalinos do resíduo, que contribuem para o fechamento da porosidade aberta. Os valores de tensão de ruptura também foram

elevando com o aumento da temperatura de sinterização, e não sofreu grandes alterações com a adição do resíduo. O resíduo apresenta resultados satisfatórios para sua utilização na fabricação de tijolos maciços, blocos cerâmicos e telhas dependendo da temperatura utilizada.

Morete, Paranhos e Holanda (2006), vendo que no Brasil não foi desenvolvida uma metodologia para o aproveitamento do resíduo de escória de soldagem de maneira ecológica e econômica, procuraram estudar a incorporação deste resíduo em peças de cerâmica vermelha. Para isso foram preparadas três formulações em peso 0%, 5%, 10% de resíduo, compactado a 24 MPa, depois de conformadas as peças foram submetidas a secagem e sinterizadas na temperatura de 950 °C. Determinaram-se as propriedades como retração linear, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e tensão de ruptura a flexão. Foi visto que a incorporação de resíduo resultou no aumento da retração linear, numa pequena redução da absorção de água nos corpos de prova queimados, que se deve a diminuição do nível de porosidade aberta. A resistência mecânica dos corpos cerâmicos sofreu um aumento, isso também se deve ao fechamento de boa parte da porosidade aberta. Os resultados indicam que há possibilidade de incorporar o resíduo de escória de soldagem na cerâmica vermelha para a fabricação de tijolos e blocos cerâmicos.

Nolasco (1993), buscou o desenvolvimento e a aplicação de produtos para vedação usando um compósito de cimento Portland e resíduo sólido industrial (fibrocimento), resultante da produção do papel, através de um estudo do caso das Indústrias de Papel Simão S.A, Piracicaba, SP. A destinação do resíduo de papel geralmente é ser depositado em aterros sanitários ou empregado na agricultura como corretivo de solos ou substratos para o cultivo de cogumelo, trata-se de um

compósito de cimento Portland, sendo formado por 30% de celulose e 70% de caulim.

Concluiu-se que o material é um agregado leve, inerte quimicamente, excelente isolante termo-acústico, possuindo trabalhabilidade semelhante a da madeira, o que permite que a peça seja cortada, furada e lixada. Em alguns traços constatou-se que o compósito apresenta resistência a compressão em torno de 3,1 MPa, similar as requeridas para blocos de vedação de concreto, tijolos cerâmicos para vedação, e blocos de concreto celular autoclavado do tipo G25.

Existe possibilidade de produção de blocos para vedação com características similares aos dos blocos de concreto para vedação, tijolos cerâmicos para vedação, blocos cerâmicos para vedação e bloco de concreto celular autoclavado G25, com vantagens de possibilidade de cortes perfeitos, maior facilidade, melhor aspecto (menos sujeito a quebras, trincamentos e deformações) e mais leves. O custo final deste material poderá ser inferior ao dos demais pelo uso do resíduo e pela possibilidade de produção por pequenas indústrias e no canteiro de obra.

Oliveira e Holanda (2004), realizaram estudos visando o reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico, como constituinte da massa cerâmica, juntamente com a argila para fabricação de produtos de cerâmica vermelha. Sendo os principais parâmetros a ser estudados a quantidade de resíduo sólido que a massa cerâmica suporta e a temperatura final de queima dos corpos de prova.

O resíduo utilizado estava na forma de pó fino e cor escura, composto basicamente de óxidos de ferro (magnetita e hematita), quartzo, calcita, mulita e argilominerais. Nas massas preparadas foram adicionadas até 3% em peso de resíduo siderúrgico. Para a caracterização do material foram feitos os ensaios de

difração de raio-X, ensaio granulométrico, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg.

Os corpos de prova foram conformados por uma extrusora a vácuo. Sendo as temperaturas de patamar de 850°C a 1050°C. Após a queima foram determinadas propriedades como: retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão. Percebeu-se que a adição de resíduo não altera o valor da massa específica real e que na temperatura de queima acima de 1000°C fica mais evidente o aumento da retração linear e densificação dos corpos de prova, e a diminuição da porosidade aberta, isso se deve ao maior grau de vitrificação das amostras. Já a absorção de água das peças sinterizadas a partir de 950 °C obteve-se uma variação complexa.

Os resultados obtidos mostram que o resíduo adicionado até 3% em peso na massa de argila, atinge as especificações para tijolos maciços e blocos cerâmicos, para todas as temperaturas de queima proposta, mas as especificações para telhas só foram atingidas para temperaturas acima de 950 °C.

Ripoli (1997) estudou a adição de chamote a massa de argila para a fabricação de produtos da cerâmica vermelha. O chamote é um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico, para a pesquisa foram usadas cinco misturas com duas amostras-base em diferentes proporções de volume, perfazendo um equivalente de cinqüenta composições. A moldagem foi desenvolvida sob pressão de 20 MPa, os corpos de prova foram secados a  $110\pm 5^\circ\text{C}$ , e queimados a 705°C, 950°C e 1050°C, em forno elétrico, com variação controlada de temperatura e permanecendo na temperatura máxima por três horas, completando todo um ciclo de dez horas de queima e resfriamento natural até temperatura ambiente.

Com a adição de chamote observou-se que os corpos de prova quando secos apresentaram menor taxa de retração e secagem mais rápida. Após sinterizados foi observado que o aumento na adição de chamote ocasionou a diminuição da retração linear, o que resultou na diminuição de trincas, ganho na trabalhabilidade da massa cerâmica e redução da massa específica, melhorando as propriedades térmicas dos blocos e reduzindo o peso de estrutura.

O uso do chamote misturado à argila para fabricação de produtos cerâmicos apresentou-se viável, pois apresenta possibilidade de utilizá-lo homogêneo na fabricação de elementos cerâmicos, desde que em proporção ideal e queimado a temperatura adequada; as tensões de ruptura e absorção de água obtidas estão de acordo com aquelas previstas pelas normas brasileiras; a adição de chamote à argila contribui potencialmente para o controle da retração., podendo ser uma alternativa econômica e eficiente para a destinação de resíduo.

Santos, Souza e Holanda (2002), estudaram uma solução para destinação da borra de petróleo, resíduo proveniente da separação do óleo cru bruto, de impurezas sólidas e líquidas nas plataformas marítimas de produção. Este resíduo pode ser classificado como classe I – perigoso, não podendo ser lançado no meio ambiente ou comercializado. A solução utilizada é um tratamento de mistura da borra com um agente encapsulante, bentonita organofílica em forma de pó, formando assim uma barreira física permanente no resíduo. Neste trabalho foi estudado seu aproveitamento em massas cerâmicas argilosas para a obtenção de cerâmica estrutural. As massas cerâmicas estudadas foram preparadas com as seguintes adições de borra encapsulada 0 a 20% em peso. Os corpos de prova foram prensados a 24 MPa numa matriz retangular, secos na estufa a 110°C por 24 h e sinterizados de 850°C a 1100°C. Para estes foram determinados: retração linear,

absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e módulo de ruptura à flexão em carregamento de três pontos. Observou-se através dos resultados que a retração linear diminuiu com o aumento da adição da borra, devido ao quartzo e ao sulfato de bário que não são materiais plásticos. O aumento da temperatura faz com que a retração também aumente especialmente acima de 1000 °C, onde há um maior grau de vitrificação do material.

A absorção de água não apresentou variações significativas até 1000 °C, acima desta temperatura ocorre uma redução devido à formação de fase líquida que reduz a porosidade aberta dos corpos de prova. Os corpos de prova atingiram valores especificados de absorção de água para tijolos maciços e blocos cerâmicos (<25%) a partir de 850 °C. Para telhas (<20%) os valores especificados só foram alcançados em temperaturas a partir de 1050 °C. Para aplicação em cerâmica de revestimento, os corpos de prova atingiram os valores especificados para revestimento poroso ( $10\% < AA < 20\%$ ) somente quando queimados a 1100 °C. O valor do módulo de ruptura à flexão aumentou com o aumento da temperatura de sinterização, o que foi percebido acentuadamente a partir da temperatura de 1000 °C. A partir de 850 °C as massas estudadas atingiram valores especificados para a fabricação de tijolos maciços e blocos cerâmicos, a 950 °C para a fabricação de telhas e a partir de 1100 °C só dois corpos de prova atingiram os valores para a fabricação de revestimentos porosos.

Concluiu-se que com a adição da borra houve um aumento no teor de quartzo e uma diminuição da fração de argila e plasticidade das massas, e que as propriedades físico-mecânicas foram afetadas pelo aumento da temperatura e a adição da borra.



---

CAPÍTULO 3

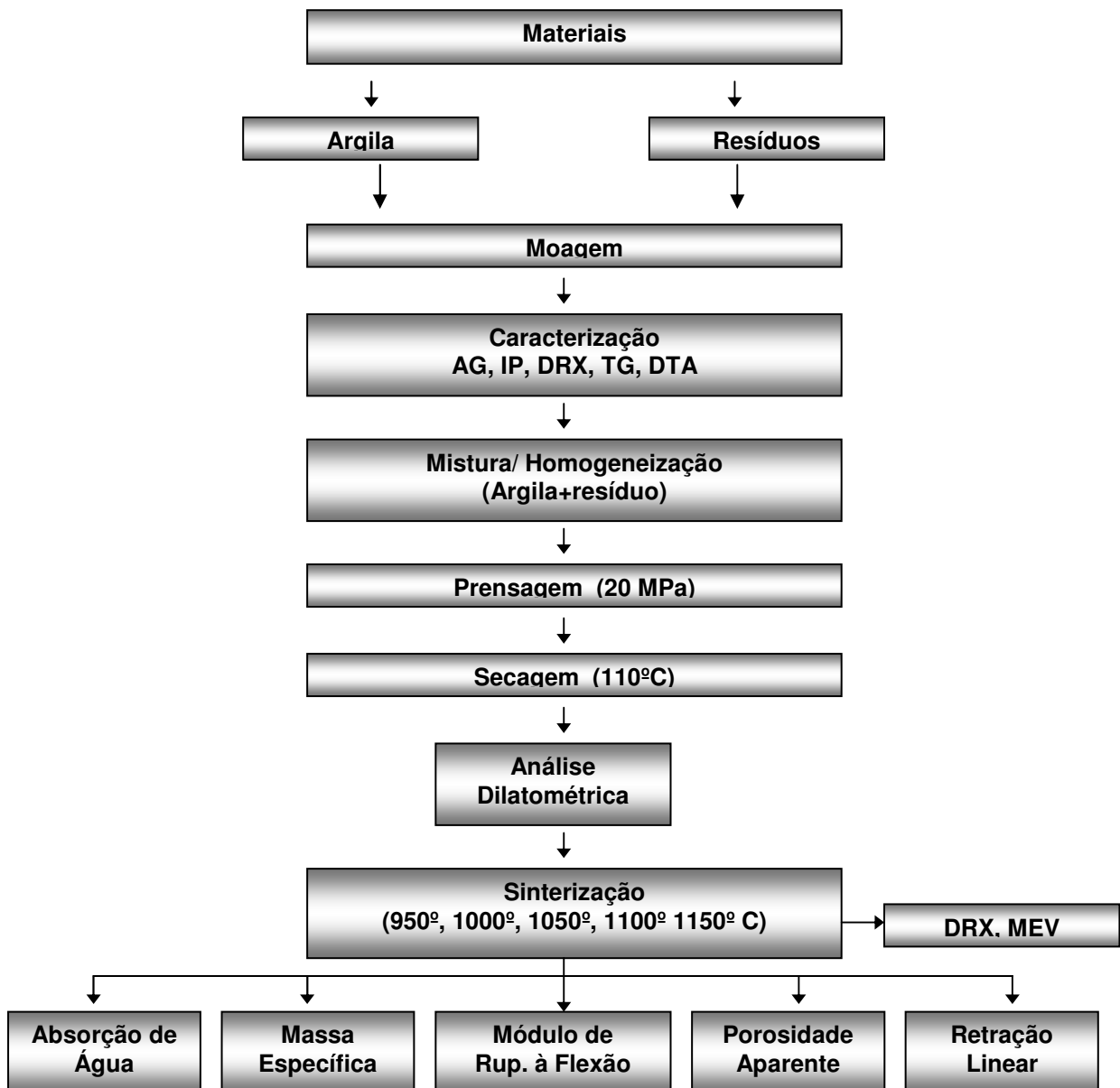
*Materiais e métodos*

---

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia, materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

No fluxograma 01 pode-se observar de forma resumida a metodologia utilizada.



Fluxograma 01: Metodologia utilizada.

### **3.1 Matérias – primas**

#### **3.1.1 Argila**

A argila utilizada neste trabalho é uma amostra usada na linha de produção da indústria cerâmica do município de Goianinha/RN, para a fabricação de produtos cerâmicos como: telhas e tijolos para alvenaria. Esta argila é proveniente da mistura de uma argila plástica e outra não plástica.

As argilas foram secadas em estufa a uma temperatura de 110°C, logo depois moídas no moinho de bolas até a fração passante de 200 mesh. Com esta fração passante de argila foram fabricados os corpos de prova.

#### **3.1.2 Resíduo**

O resíduo utilizado foi coletado no canteiro de obras da Empresa ECOCIL. A empresa participa de um grupo que faz a coleta seletiva de resíduos. O material coletado representa o resíduo gerado na fase intermediária entre elevação de alvenaria nos pavimentos. Esta construção trata-se de um edifício residencial, padrão classe média alta, com estrutura executada em concreto armado, onde a vedação dos vãos está sendo executada com blocos de cimento e revestimento interno de gesso. O resíduo é composto de materiais novos (não possui resíduo de demolição, ou reforma), areia, restos de argamassa, concreto, cimento, tijolos vermelhos e blocos de cimento. As amostras coletadas passaram por processo de separação de materiais indesejáveis no próprio canteiro, tais como: madeira, ferro, plástico, gesso, etc.

Depois de coletadas para estudo, as amostras foram armazenadas em um recipiente plástico com tampa para evitar contaminação e guardadas em um local fechado. Antes da moagem o material foi submetido à secagem na estufa a uma temperatura de 110°C para retirar a umidade.

O resíduo foi moído em moinho de bolas de alumina até obter-se a granulometria passante na peneira de 200 mesh, equivalente a granulometria da argila que será feita a massa cerâmica.

## **3.2 Caracterização das matérias primas**

### **3.2.1 Caracterização Química**

A composição química das matérias primas estudadas neste trabalho foi obtida por Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva (EDX). Foi utilizado o espectrômetro modelo EDX-700, da SHIMADZU. As matérias-primas passantes na peneira de 200 mesh foram ensaiadas sob atmosfera de Hélio. Os resultados foram obtidos em forma de percentuais de óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes.

### **3.2.2 Limite de Atterberg e plasticidade**

Pode-se definir a plasticidade como a propriedade de certos solos serem moldados sem variação de volume. Isto ocorre porque, a forma lamelar das partículas permite um deslocamento relativo entre elas, sem necessidade de

variação de volume. Esta plasticidade dependerá também do teor de umidade da argila.

A forma dos grãos possibilita que eles deslizem uns sobre os outros, desde que a água intersticial possa funcionar como lubrificante. Entretanto, se existir água em excesso, as partículas estarão em suspensão e o corpo não será mais plástico, apresentando-se como um líquido viscoso. Por outro lado, se existir pouca água, as forças capilares serão muito grandes e os grãos se aglutinarão, formando torrões quase sólidos, que não poderão ser moldados e, ao sofrerem esforços de deformação, se quebrarão.

Para a determinação do limite de liquidez pelo método de Casagrande, primeiramente calibramos o aparelho, parte da amostra foi colocada em sua concha, alisou-se a superfície, de forma a obter uma camada com espessura de 10 mm na seção mais profunda. Uma ranhura foi feita ao longo do plano de simetria da concha utilizando-se o cinzel, este mantido normal à concha no ponto de contato durante o movimento. O aparelho foi ligado, iniciando os golpes até que as duas partes do material separadas pelo cinzel se uniram, neste momento o equipamento foi desligado e verificado o número de golpes executados. Uma alíquota da amostra foi retirada e pesada (peso úmido), logo após levada a estufa a uma temperatura de 110°C por 24 horas para a determinação do peso a seco, onde através da equação (1) obtemos o teor da umidade (SOUZA; RAFULL; VIEIRA, 2000).

$$U(\%) = \frac{P_U - P_S}{P_S} \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo: U – Absorção de água (%);

$P_U$  – peso da argila úmida (g);

$P_S$  – peso da argila após a secagem a 110°C (g).

A amostra ensaiada foi misturada novamente ao restante do material preparado, ao qual se adicionou um pouco de água para aumentar a umidade e, em seguida, homogeneizou-se a pasta novamente; este procedimento foi repetido cinco vezes, para se obter 4 pares de valores de umidade versus número de golpes situados, esses últimos, entre 13 e 62. Os dados foram representados graficamente, com o número de golpes na abscissa e a umidade correspondente na ordenada, em seguida foi traçada a reta que melhor se ajustou os pontos.

A umidade correspondente à projeção de 25 golpes, sobre a reta traçada, foi considerada limite de liquidez.

O limite de plasticidade é o teor de água expresso em porcentagem de argila seca a 110° C, de uma massa plástica de argila acima da qual a massa pode ser enrolada em cilindro de cerca de 3 mm a 4 mm de diâmetro; as argilas que não podem formar esses cilindros com nenhum teor de água são consideradas não-plásticas (SANTOS, 1989).

Os procedimentos foram utilizados de acordo com a norma NBR7180/84 e NBR6459/84.

O índice de plasticidade é dado através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, equação (2).

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

### **3.2.3 Análise Granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada através da classificação de partículas por difração a laser, realizada nas matérias-primas que foram moídas em moinhos de bolas de alumina, peneiradas em peneira de 200 mesh. As amostras foram

analisadas utilizando-se um granulômetro a laser modelo 920L do fabricante CILAS, existente no Laboratório de Cerâmicas e Metais Especiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo sido usado o programa The Particle Expert, e a água foi utilizada como meio de dispersão.

### **3.3 Análise Térmica**

A análise térmica é definida como um conjunto de técnicas pelas quais as propriedades físicas ou químicas de uma substância ou composto, são medidas em funções da temperatura ou tempo, enquanto a amostra está sujeita a uma variação programada de temperatura. A análise pode se dar a uma variação de temperatura (dinâmica) ou a temperatura constante (isotérmica), ou qualquer seqüência destes.

Os métodos térmicos incluem: termogravimetria, análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial. Estes métodos são de grande utilidade para o controle da qualidade e investigação de produtos industriais como polímeros, cerâmicos, farmacêuticos, metais e ligas.

#### **3.3.1 Dilatometria**

A Análise Dilatométrica é uma técnica cujo princípio de medição consiste na quantificação das variações dimensionais que um corpo de prova sofre quando submetido a aquecimento definido.

A determinação da dilatação pode ser feita por diversos tipos de equipamentos, dentre os quais destacamos o dilatômetro óptico, onde as variações dimensionais são acompanhadas por dispositivos ópticos e os dilatômetros

diferenciais. O tipo mais utilizado atualmente é o dilatômetro diferencial. Este possui um sistema porta-amostra constituído por um tubo, que suporta o corpo de prova no interior do forno, e um êmbolo ou haste que tem uma extremidade em contacto com o mesmo e transmite qualquer variação dimensional sofrida por ele durante o aquecimento até um transdutor localizado na extremidade oposta do êmbolo. O sistema porta amostra é complementado por um sensor de temperatura (termopar) localizado junto ao corpo de prova em ensaio. De posse das informações do ensaio temos a possibilidade de obter as curvas dilatométricas que são de grande importância para definição da temperatura de queima dos corpos cerâmicos.

As análises dilatométricas das massas cerâmicas foram realizadas no Laboratório de Cerâmicas e Metais Especiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, para isso foram utilizados corpos de prova prensados com massa semi-seca, numa matriz cilíndrica de 8 mm de diâmetro, sob pressão de 20 MPa. O equipamento utilizado foi uma prensa manual da marca Zeloso, modelo PA-20, com capacidade de 20 toneladas. As amostras foram aquecidas a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min até a temperatura de 1200 °C.

### **3.3.2 Análise Termogravimétrica e Análise Térmica Diferencial**

Os equipamentos utilizados foram o TGA-51 e o DTA-50, da marca SHIMADZU. O ensaio foi realizado a uma taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> em fluxo de ar sintético de 50 ml.min<sup>-1</sup>. A faixa de temperatura da análise variou de 24 a 1100 °C.



Análise térmica diferencial é a técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância e o material de referência é medida em função da temperatura, quando estes são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

### **3.4 Preparação das massas cerâmicas e corpos de prova**

Após a preparação a moagem das matérias-primas até uma fração de 200 mesh, as massas cerâmicas foram preparadas com proporções de resíduo de construção variando de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% em peso com a argila. A homogeneização dos pós foi feita a seco, sendo misturada em saco plástico, manualmente. Para dosagem da mistura foi utilizada uma balança digital AS120, com resolução de  $\pm 0,0001\text{g}$  da marca OHAUS. Foram umedecidas com 10% em peso de água destilada e acondicionadas em sacos plásticos.

Os corpos de prova foram preparados por prensagem uniaxial, utilizando-se uma prensa manual com capacidade de 20 toneladas, da marca Zeloso, modelo PA-20, localizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFRN. Para isso foi utilizada uma matriz em aço, retangular com punção superior. A pressão utilizada para prensagem foi de 20 MPa e os corpos de prova foram confeccionados com dimensões de (30mm×5mm×7mm).

### **3.5 Sinterização dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram secados na estufa a uma temperatura de 110°C até obter-se massa constante. Após serem retirados da estufa os mesmos foram

medidos com um paquímetro Starret com resolução de 0,05mm. A medida ( $L_i$ ) obtida nesta fase foi utilizada para a obtenção retração linear após a queima.

A queima dos corpos de prova foi realizada num forno tipo mufla de resistência elétrica, marca EDG, modelo 3P-S, em atmosfera normal sob um patamar de 60 min e taxa de aquecimento de 5° C/min. Foram empregadas as seguintes temperaturas nos patamares: 950, 1000, 1050, 1100, 1150°C. O resfriamento se deu naturalmente com o forno desligado e fechado até a temperatura ambiente.

### 3.6 Corpos sinterizados

#### 3.6.1 Retração Linear (RL)

São avaliadas as dimensões lineares dos corpos de prova após a sinterização.

A retração linear de queima (RL) foi calculada através da equação (3):

$$RL(\%) = \frac{L_i - L_f}{L_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Sendo: RL – retração de queima (%);

$L_i$  – comprimento do corpo de prova antes da sinterização (cm);

$L_f$  – comprimento do corpo de prova após a secagem a 110°C e sinterização (cm).

Onde  $L_f$  é o comprimento final obtido através da média de três medidas transversais e  $L_i$  e o comprimento inicial do corpo de prova após a secagem, todas as medidas foram obtidas com um paquímetro com resolução de 0,05 mm.

### 3.6.2 Absorção de Água (AA)

Compreende a percentagem do peso de água absorvido pelo corpo de prova seco.

Os valores de absorção de água foram obtidos após a queima dos corpos de prova de acordo com a NBR13818. Consistindo em secagem prévia dos corpos de prova na estufa a 110°C até obter massa constante, resfriamento das amostras no dessecador, pesagem do corpo de prova seco e imersão durante um período de 24 horas em um recipiente com água destilada. Completado o tempo determinado, foi retirado o excesso de água com um pano umedecido, em seguida pesado em uma balança eletrônica, modelo AW220 da SHIMADZU com resolução de 0,1 mg. Os valores de absorção de água foram obtidos a partir da média aritmética de quatro medições individuais, utilizando-se a equação (4):

$$AA(\%) = \frac{M_U - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo: AA – Absorção de água (%);

$M_U$  - Massa do corpo de prova úmido (g);

$M_S$  – Massa do corpo de prova após a secagem a 110°C (g).

### 3.6.3 Porosidade Aparente

Consiste no volume de poros abertos do corpo de prova tomando como base seu volume total. A porosidade aparente dos corpos de prova após a sinterização foi determinada de acordo com a norma C373-88(2006), e calculada através da equação (5).

$$PA(\%) = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_I} \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo: PA – Porosidade Aparente (%);

$M_U$  – massa do corpo de prova úmido (g);

$M_S$  – massa do corpo de prova após a secagem a 110°C (g);

$M_I$  – massa do corpo de prova imerso em água (medição feita pelo método da balança hidrostática).

### 3.6.4 Massa Específica Aparente (MEA)

Massa específica aparente é o valor da massa por unidade de volume, dos corpos de prova, esta foi determinada segundo a norma C372-94 (2007), utilizando a média de quatro amostras, calculadas através da Equação (7).

$$MEA(g / cm^3) = \frac{PA}{AA} \quad \text{ou} \quad MEA(g / cm^3) = \frac{M_S}{M_U - M_I} \cdot 100 \quad (6)$$

Sendo: MEA – Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>);

$M_U$  - massa do corpo de prova úmido (g);

$M_S$  – massa do corpo de prova após a secagem a 110°C (g).

$M_I$  – massa do corpo de prova imerso em água (medição feita pelo método da balança hidrostática).

### 3.6.5 Tensão de Ruptura à Flexão

É a tensão de flexão necessária para causar a ruptura de um corpo de prova, segundo o método proposto por VICAT através da Equação (7).

$$TRF(kgf / cm^2) = \frac{4PL}{bh^2} \quad (7)$$

Sendo: TRF – tensão de ruptura (kgf/cm<sup>2</sup>);

P – Carga atingida no momento da ruptura (kgf);

L – a distância entre os apoios do corpo de prova (cm);

b – a largura do corpo de prova (cm);

h – a altura do corpo de prova (cm).

Para o ensaio foi utilizada a máquina de ensaios Zwick/Roel, modelo Z2.5, com uma célula de carga de 2,5 kN, operando a uma velocidade de 0,4mm/min, com um espaçamento de 20 mm. Os resultados foram obtidos através da média aritmética de quatro repetições sob iguais condições de análise. Os valores foram efetuados com o auxílio do software Zwick/Roell Textxpert.

### 3.6.6 Análise por Difração de Raios-X

A análise de difração de raios-X foi utilizada para identificar as fases presentes remanescentes e as novas fases formadas durante a sinterização dos materiais. Os corpos de prova foram moídos em um almofariz, e para a análise foi utilizada a radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1,5406$ ), obtida por 30 Kv em corrente de filamento de

30 mA, com dados coletados em um intervalo de variação angular  $2\theta = 5^\circ$  a  $90^\circ$ . Foi utilizado o difratômetro modelo XRD-6000, marca SHIMADZU, existente no Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural – NEPGN. A análise qualitativa das fases presentes foi efetuada através da comparação do ângulo de Bragg e da intensidade relativa dos principais picos do difratograma com cartas padrões existentes no software JCPDF para identificação cristalográfica.

### **3.6.7 Análise Microestrutural**

Os corpos de prova sinterizados foram examinados com o microscópio eletrônico de varredura, da marca SHIMADZU, modelo SSX-550, com Sputter Coater (revestimento), modelo IC-50, marca SHIMADZU do Centro de Tecnologias do Gás – CTGÁS. A análise foi realizada com o objetivo de verificar as mudanças microestruturais e morfológicas dos corpos de prova após a sinterização.

Para a realização da análise as amostras foram previamente lixadas e polidas na superfície a ser analisada, em seguidas foram colocadas no porta-amostra e aderidas por fita de carbono dupla face e metalizadas com deposição de uma fina camada de ouro.

---

Capítulo 4

Resultados e discussões

---

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Caracterização das Matérias-primas

#### 4.1.1. Caracterização Química

A amostra apresenta composição química típica de um material argiloso, tendo como constituintes majoritários a sílica e a alumina que estão presentes em maior concentração, como visto no Quadro 02.

ÓXIDOS PRESENTES	CONCENTRAÇÕES (%)	
	ARGILA	RESÍDUO
SiO <sub>2</sub>	60,214	64,584
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,936	10,751
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,589	1,502
K <sub>2</sub> O	4,053	4,350
CaO	3,000	16,016
Na <sub>2</sub> O	0,959	0,910
TiO <sub>2</sub>	0,878	0,391
MgO	0,771	0,364
BaO	0,258	0,0
SrO	0,082	0,058
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,081	0,194
ZrO <sub>2</sub>	0,076	0,057
MnO	0,055	0,045
CuO	0,026	0,024
NiO	0,021	0,021
SO <sub>3</sub>	0,0	0,690
ZnO	0,0	0,029
Rb <sub>2</sub> O	0,0	0,016
Somatório (Σ)	100	100

Quadro 02: Composição química das matérias-primas utilizadas, através do ensaio de fluorescência de raio-X.



Nos Gráficos 03 e 04 estão os difratogramas de raios-X da amostra de argila e do resíduo. Com base nos picos característicos de difração pode-se constatar que a argila é basicamente constituída de fases cristalinas de Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), Montmorilonita ( $\text{Ca}_{0,2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,4}\text{H}_2\text{O}$ ) e Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). O difratograma da amostra do resíduo indicou a presença predominante de Quartzo, vindo a ratificar os resultados obtidos na análise química apontada no Quadro 02.

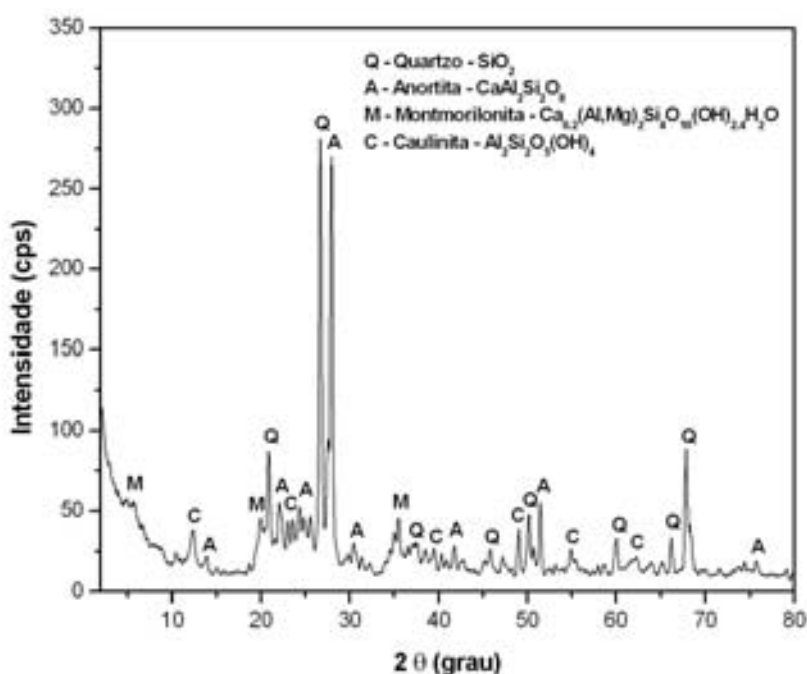


Gráfico 03: Difratograma de raios-X da argila.

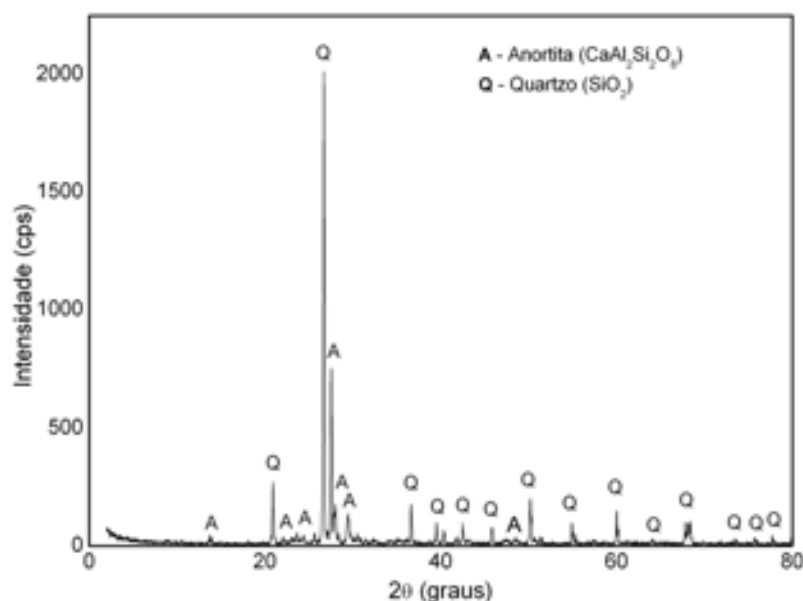


Gráfico 04: Difratograma de raios-X do resíduo.

#### 4.1.2. Análise Granulométrica

Nos Gráficos 05 e 06 estão apresentadas às curvas granulométricas da argila e do resíduo, respectivamente.

No Gráfico 05 percebemos que a argila tem distribuição granulométrica do tipo bimodal, apresentando diâmetros de partícula variando de  $0,3\mu\text{m}$  a aproximadamente  $160\mu\text{m}$ , onde 12% em volume têm diâmetro médio menor que  $2\mu\text{m}$  e 38% têm diâmetro médio superior a  $20\mu\text{m}$ . A argila apresentou diâmetro médio de  $22,83\mu\text{m}$ .

No Gráfico 06 observamos a distribuição granulométrica para o resíduo, o qual também apresenta distribuição bimodal, com diâmetros de partículas variando de  $0,3\mu\text{m}$  a aproximadamente  $160\mu\text{m}$ , onde 11% em volume têm diâmetro médio

menor que  $2\mu\text{m}$  e 43% têm diâmetro médio superior a  $20\mu\text{m}$ . O resíduo apresentou diâmetro médio de  $24,13\mu\text{m}$ .

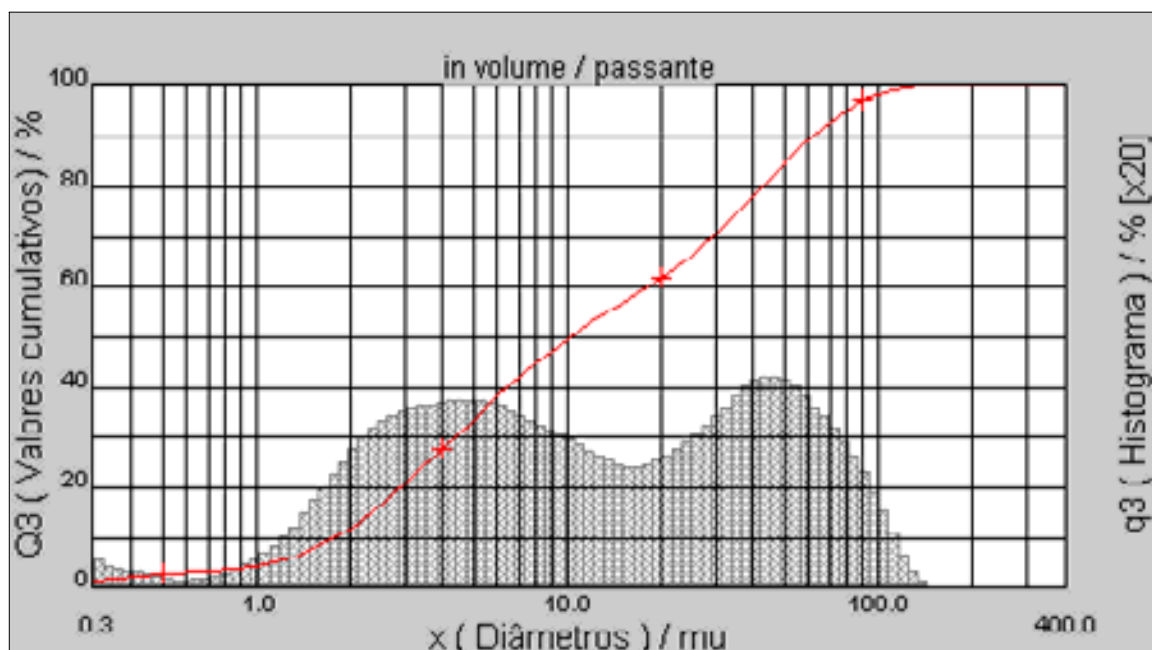


Gráfico 05: Distribuição granulométrica da argila.

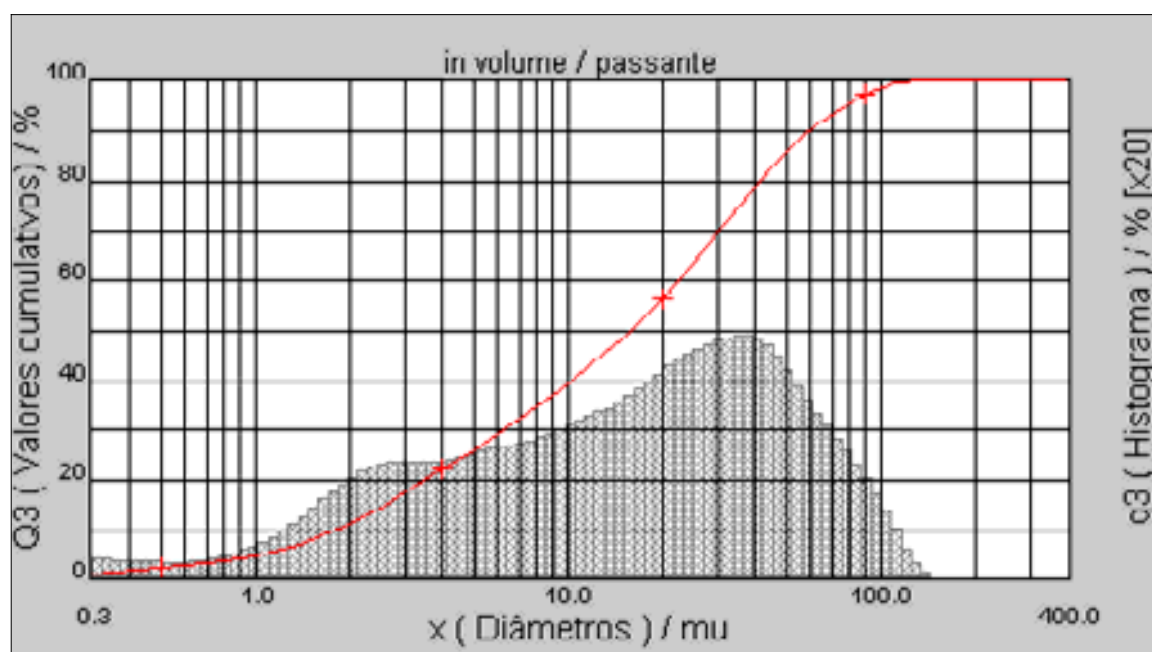


Gráfico 06: Distribuição granulométrica do resíduo.

O Quadro 07 abaixo informa de maneira resumida os resultados apresentados para cada matéria-prima em estudo.

Matérias-Primas	Distribuição granulométrica (% volume)			
	< 2,0 $\mu\text{m}$	2,0 a 20 $\mu\text{m}$	>20 $\mu\text{m}$	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )
ARGILA	12	50	38	22,83
RESÍDUO	11	46	43	24,13

Quadro 07: Resumo da distribuição granulométrica das matérias primas em estudo.

#### 4.1.3. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram determinados somente para a argila, pois o resíduo não possui características plásticas, não sendo justificada a medição destes valores. O valor do limite de liquidez foi de  $27,74\% \pm 1,8$ , o limite de plasticidade foi de  $16,91\% \pm 1,5$  e o índice de plasticidade foi de  $10,83\%$ . De acordo com os valores obtidos, esta argila pode ser classificada como uma argila de plasticidade média ( $7\% < IP < 15\%$ ), segundo Souza Santos (1989).

## 4.2. Análise Térmica

### 4.2.1. Comportamento Dilatométrico das Massas Cerâmicas

O comportamento dilatométrico dos corpos de prova com 0% e 30% de resíduo estão apresentados na Gráfico 08.

Observa-se para a argila pura que a temperatura de sinterização inicia em torno de  $1050^\circ\text{C}$ . Já para a argila com adição de 30% de resíduo, o início da temperatura de sinterização passa a  $1100^\circ\text{C}$ , esse comportamento é devido à

presença de materiais anteriormente sinterizados, que atuam como materiais inertes, e a grande presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) o que dificulta a sinterização do material.

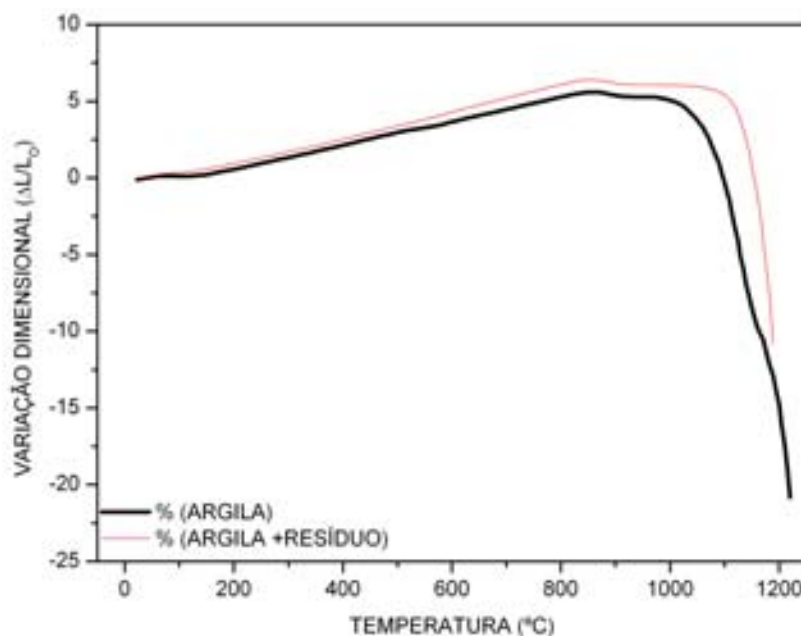


Gráfico 08: Comportamento dilatométrico das massas cerâmicas de argila + 30% de resíduo.

#### 4.2.2. Comportamento Termogravimétrico e Termodiferencial

Os comportamentos, termogravimétrico e termodiferencial, da argila estão apresentados no Gráfico 09. Percebe-se uma perda de massa inicial na faixa de temperatura de 30 a 110°C, a qual foi atribuída à água livre e adsorvida. A perda de matéria orgânica é contínua até a temperatura de 400°C, a partir desta temperatura ocorre uma segunda perda de massa atribuída a desidroxilação da montmorilonita e da caulinita (GARDOLINSKI e WYPYCH, 2001; VIEIRA, HOLANDA e PINATT, 2000). A amostra apresenta-se estável na faixa de temperatura de 700 a 1100°C.

Na curva DTA, observa-se um pico endotérmico a 58,12°C, referente ao início da liberação de água livre. Na temperatura de 301°C observa-se um pico exotérmico associado à perda da matéria orgânica, seguido por um pico endotérmico a 471°C correspondente a desidroxilação da caulinita e da montmorilonita e um pequeno pico endotérmico a 568,73°C, atribuído a transformação alotrópica do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$  (VIEIRA, HOLANDA, PINATT, 2000).

Os comportamentos, termogravimétrico e termodiferencial, do resíduo estão apresentados no Gráfico 10. Percebe-se uma perda de massa inicial na faixa de temperatura de 25 a 200°C, correspondente a perda de água livre e adsorvida. A perda de matéria orgânica é contínua até a temperatura de 700°C, a partir desta temperatura ocorre uma segunda perda de massa atribuída a descarbonatação do carbonato de cálcio, A amostra apresenta-se estável na faixa de temperatura de 800 a 1100°C.

Na curva DTA, observa-se um pico endotérmico a 40,3°C correspondente ao início da liberação da água livre. Na temperatura de 575,45°C observa-se um pico endotérmico atribuído à transformação alotrópica do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$ . Na temperatura de aproximadamente 700°C podemos ver um pico endotérmico ao qual foi atribuído ao início do processo de descarbonatação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (ALARCON-RUIZ; PLATRET; MASSIEU; EHRLACHER, 2005). A uma temperatura de 880° observamos um pico exotérmico atribuído à transformação alotrópica do quartzo em tridimita ( $\text{SiO}_2$  - Monoclínico) (VASSILEVA E VASSILEV, 2006).

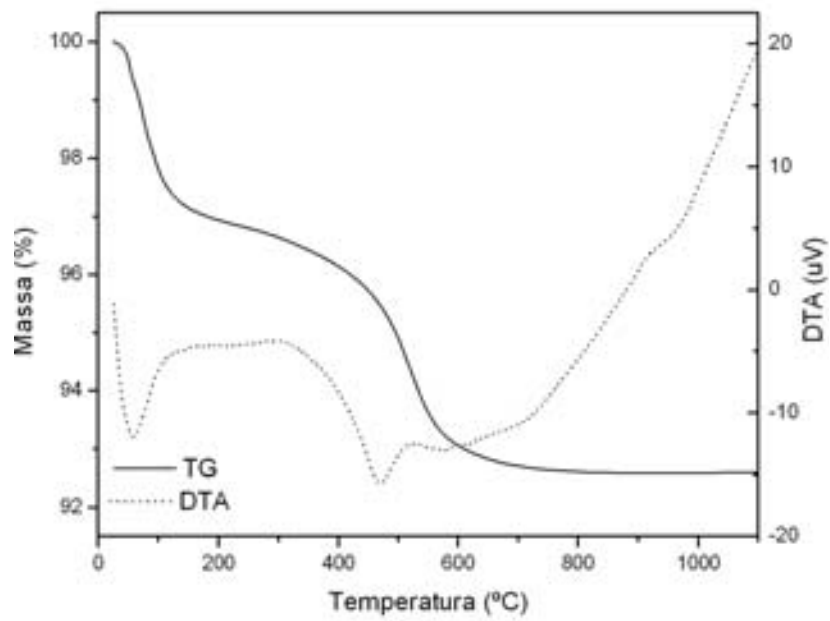


Gráfico 09: Curva Termogravimétrica (TG) e Curva Termodiferencial (DTA) da argila.

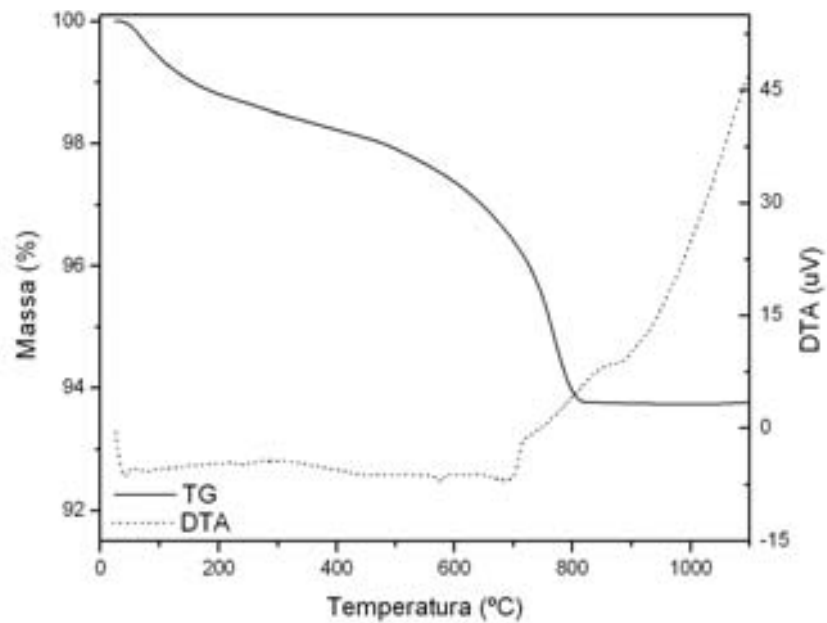


Gráfico 10: Curva Termogravimétrica (TG) e Curva Termodiferencial (DTA) do resíduo.

### 4.2.3. Retração Linear

O comportamento da retração linear nos corpos de prova cerâmicos pode ser vistos no Gráfico 11. Estes estão dispostos em função do percentual de resíduo a cada temperatura de sinterização.

As amostras estudadas apresentaram um percentual de retração linear de 6,53%. No Quadro 12 verificamos valores de retração linear, de algumas amostras, acima dos especificados para aplicação em cerâmica vermelha. Observa-se no Gráfico 11 que com o aumento da concentração do resíduo a retração linear de queima permanece constante para as temperaturas de queima inferiores a 1150° C. Os valores de retração linear acima dos especificados no gráfico foram sinterizados na temperatura de 1150 °C, acredita-se que a esta temperatura ocorre fusão dos elementos em maior volume, onde estes elementos preenchem os vazios e acarretam redução das peças cerâmicas (VIEIRA, 2004).

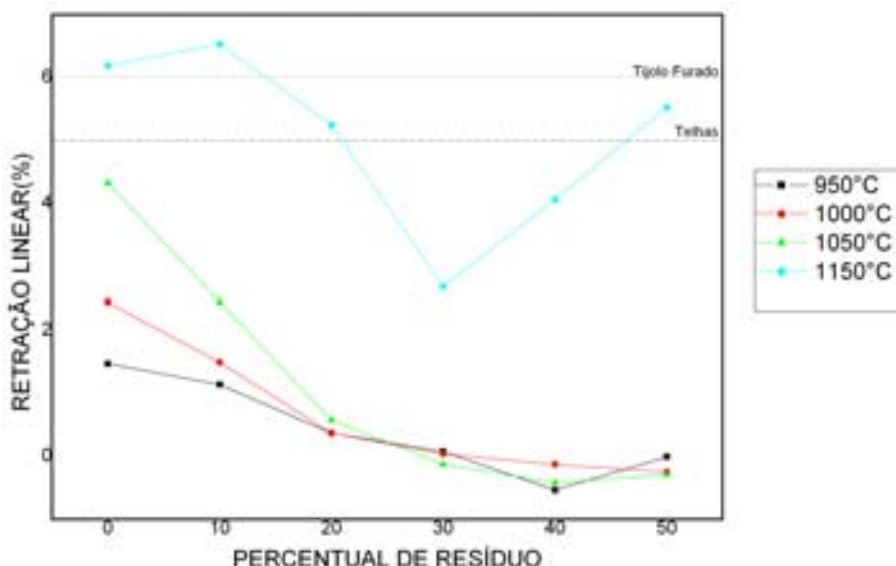


Gráfico 11: Retração linear dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.



Na faixa de temperatura de 950°C a 1050°C, observa-se no Gráfico 11 que a variação da temperatura não influencia na retração linear, pois não há grandes variações nos valores de retração dos corpos sinterizados, comportamento encontrado em estudos realizados por Vieira (2004) sobre incorporações de resíduos semelhantes à argila para fabricação de produtos cerâmicos.

Já na temperatura de 1150°C a retração mostra-se bastante acentuada a partir da adição de 30% de resíduo, isso se deve a maior quantidade de elementos fundentes presente no resíduo, como mostra o resultado da fluorescência de Raios-X, no Quadro 02. (SERPA, 2007).

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS				
Aplicações	RL (%)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
Tijolo de Alvenaria	ND	ND	≤ 35,00	≥ 2,00
Tijolo Furado	≤ 6,00	≤ 25,00	≤ 25,00	≥ 5,50
Telhas	≤ 5,00	≤ 20,00	≤ 20,00	≥ 6,50

Quadro 12: Propriedades físico-mecânicas determinada em laboratório, requeridas para a aplicação em produtos de cerâmica vermelha (SOUZA SANTOS, 1989).

### 4.3. Caracterização dos Corpos de Prova Sinterizados

#### 4.3.1. Absorção de Água

Os valores de absorção de água dos corpos de prova estão apresentados no Gráfico 13. As curvas estão em função do percentual de resíduo, para as concentrações de 0% a 50%. Os valores de absorção para todas as concentrações de adição de resíduos estão na faixa de 4,64 a 20,80%, encontrando-se dentro dos limites especificados para aplicação em cerâmica vermelha (Quadro 12), exceto a

amostra composta por 50% de resíduo. As amostras sinterizadas a uma temperatura de 1150°C na composição de 50% obtiveram todos os valores dentro da faixa especificada para a fabricação de telhas cerâmicas.

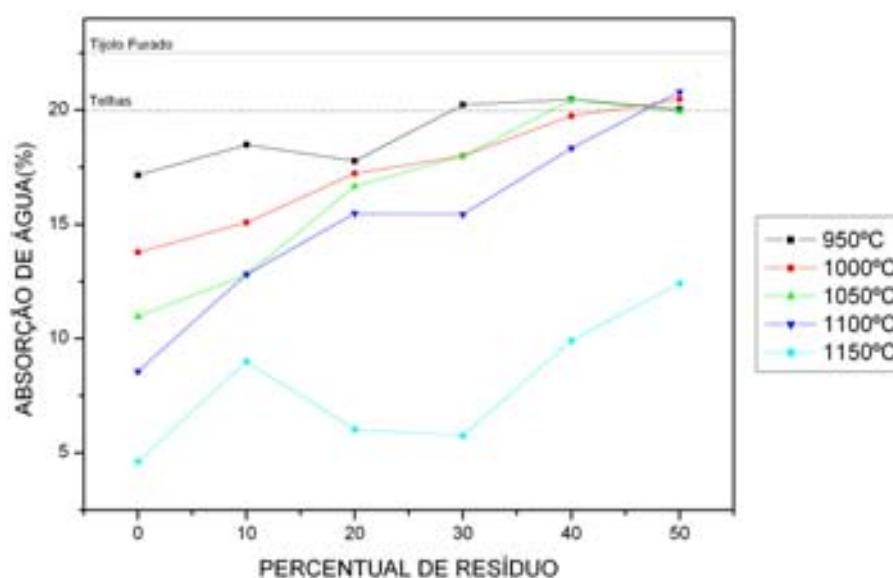


Gráfico 13: Absorção de água dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.

Pode se observar no Gráfico 13 que com o aumento da concentração de resíduo, no caso 50% de adição, ocorre o aumento da absorção de água para todas as temperaturas de queima, o que está relacionado com o aumento da porosidade dos corpos de prova devido a maior quantidade de resíduo, o qual é em grande parte formado por carbonato que constitui um fator que favorece a formação de gases durante a queima. Assim o aumento da absorção de água pode ser atribuído a este efeito mesmo considerando os valores mais elevados dos elementos fundentes (COSTA, ZANARDO, MORENO, 2007).

Exceto na temperatura de 1150°C, que apresenta menores valores de absorção, em relação às demais temperaturas, devido aos elementos com características fundentes existentes no material, que contribuem para o fechamento

dos poros nos corpos de provas, esse comportamento pode ser observado para temperaturas maiores que 1100°C. Pode-se confirmar ao analisar o gráfico de retração linear no Gráfico 11, em que na temperatura de 1150°C apresenta menores valores de retração nas amostras com adição acima de 30% de resíduo.

#### **4.3.2. Porosidade Aparente**

Os valores de porosidade aparente dos corpos de prova com adição de resíduo e argila podem ser vistos no Gráfico 14. Os resultados encontram-se na faixa de 10,29% a 34,88%, estando estes valores dentro dos limites especificados para aplicação em produtos de cerâmica vermelha (Quadro 12), na fabricação de tijolos de alvenaria.

Com a adição do resíduo a amostra apresenta aumento da porosidade e na faixa de temperatura de 950°C a 1100°C não houve grandes variações para a adição de 50% de resíduo. Já a uma temperatura de 1150°C, observou-se a redução da porosidade em relação às amostras sinterizadas nas demais temperaturas, isto pode ser explicado pelo fechamento dos poros dos corpos de prova devido aos elementos de características fundentes.

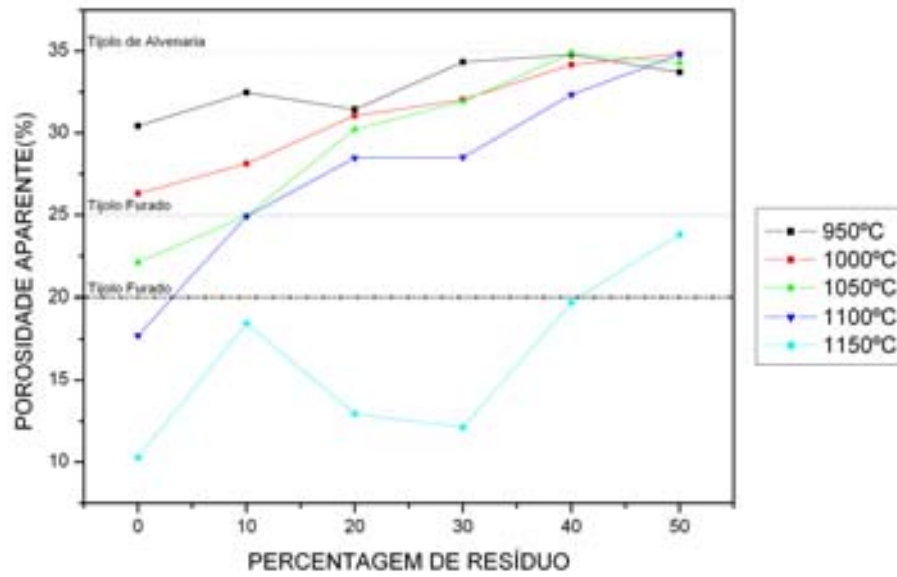


Gráfico 14: Porosidade dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.

#### 4.3.3. Massa Específica

Os valores de massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados em função da concentração de resíduos nas peças cerâmicas estão apresentados no Gráfico 15. Os valores encontrados estão em uma faixa de 1,67 a 2,22g/cm<sup>3</sup>.

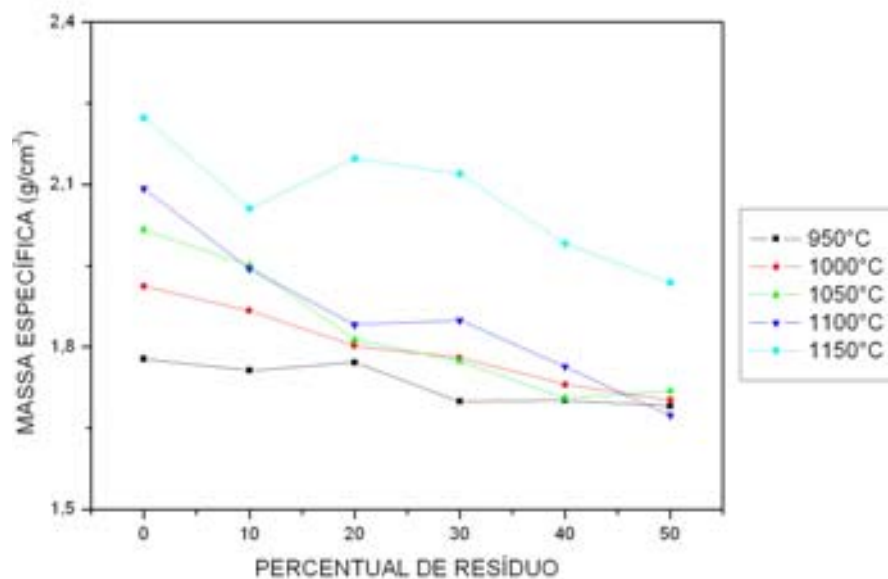


Gráfico 15: Massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.

Não é observada grande influência da temperatura na densificação dos corpos de prova sinterizados de 950°C a 1100°C, mas nos corpos sinterizados a temperatura de 1150°C pode ser visto o aumento da densificação devido ao aumento da temperatura de sinterização, confirmando assim os resultados encontrados nos ensaios de caracterização física.

#### **4.3.4. Resistência Mecânica**

Os valores de resistência mecânica à flexão dos corpos de prova estão apresentados no Gráfico 16. No gráfico pode-se observar que as amostras obtiveram resistência a flexão no intervalo de 1,56 a 31,33 MPa, estes valores ficaram na faixa de valores especificados para aplicação em cerâmica vermelha (Quadro 12), exceto nas concentrações de 40 e 50%, sinterizados a 950°C. O aumento da concentração de resíduo influenciou na diminuição da resistência mecânica do material até a concentração de 30%, a partir de 40% as amostras se estabilizaram ou aumentaram o valor da resistência à flexão para as diferentes temperaturas.

Para a temperatura de 1150°C comprova-se novamente que os elementos fundentes melhoraram a qualidade da amostra tornando-a mais resistente a ruptura que as demais, devido ao fechamento dos poros e sinterização de todo o material da amostra.

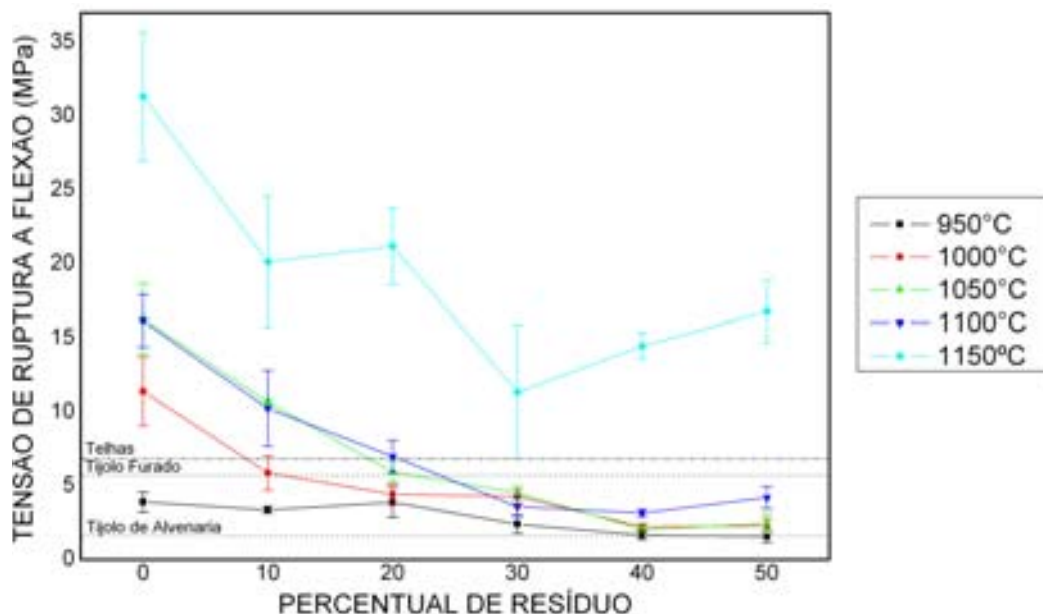


Gráfico 16: Tensão de ruptura a flexão dos corpos de prova sinterizados em função do percentual de resíduo.

#### 4.3.5. Temperatura de Gresificação

As curvas de gresificação das massas cerâmicas nas composições estudadas estão apresentadas nos Gráficos 17, 18, 19, 20, 21 e 22. Nota-se o aumento da temperatura de gresificação com o aumento da concentração do resíduo, exceto na composição de 50% (1126,53 °C) que ocorre uma redução valor da temperatura de gresificação chegando a ser menor que a temperatura da composição de 30% (1128,16 °C).

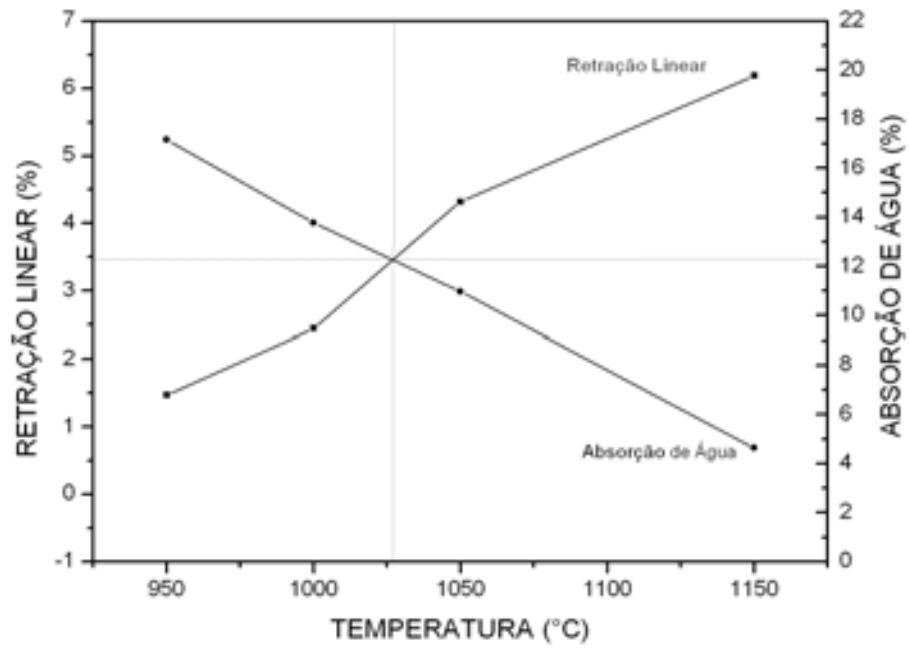


Gráfico 17: Curva de gresificação da argila sem resíduo.

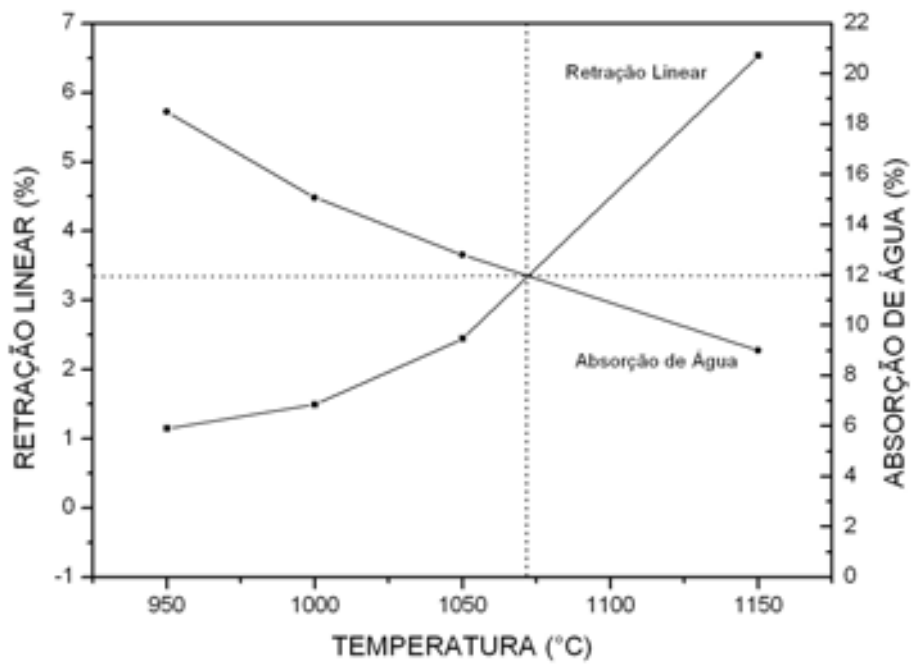


Gráfico 18: Curva de gresificação da argila com 10% de resíduo.

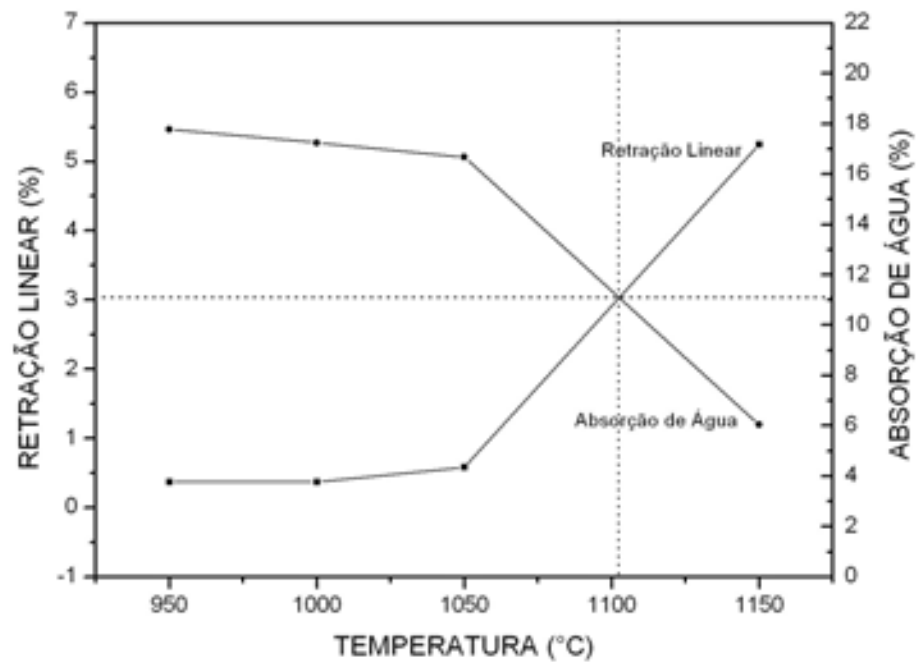


Gráfico 19: Curva de gresificação da argila com 20% de resíduo.

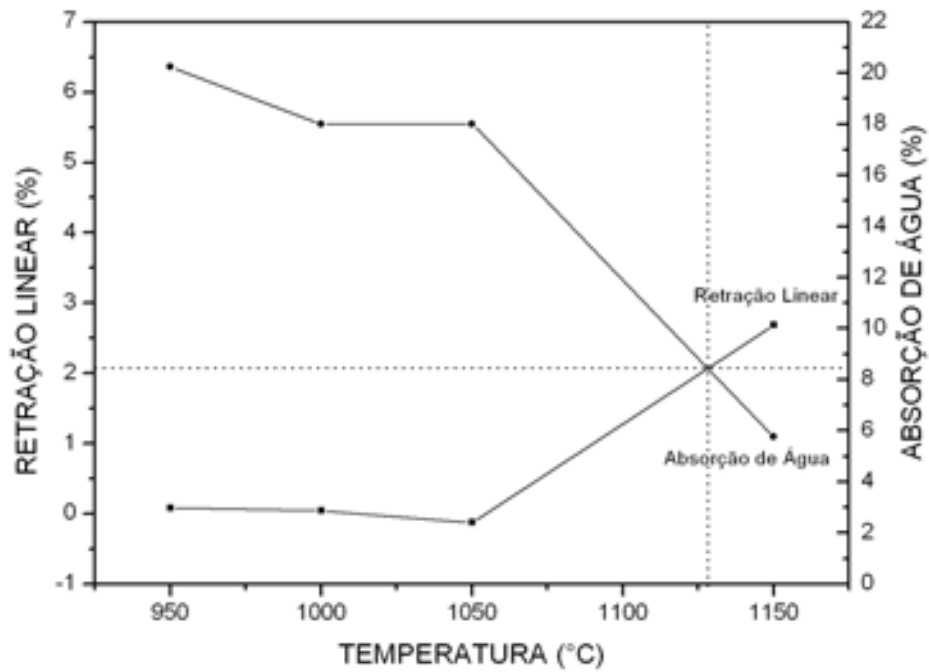


Gráfico 20: Curva de gresificação da argila com 30% de resíduo.



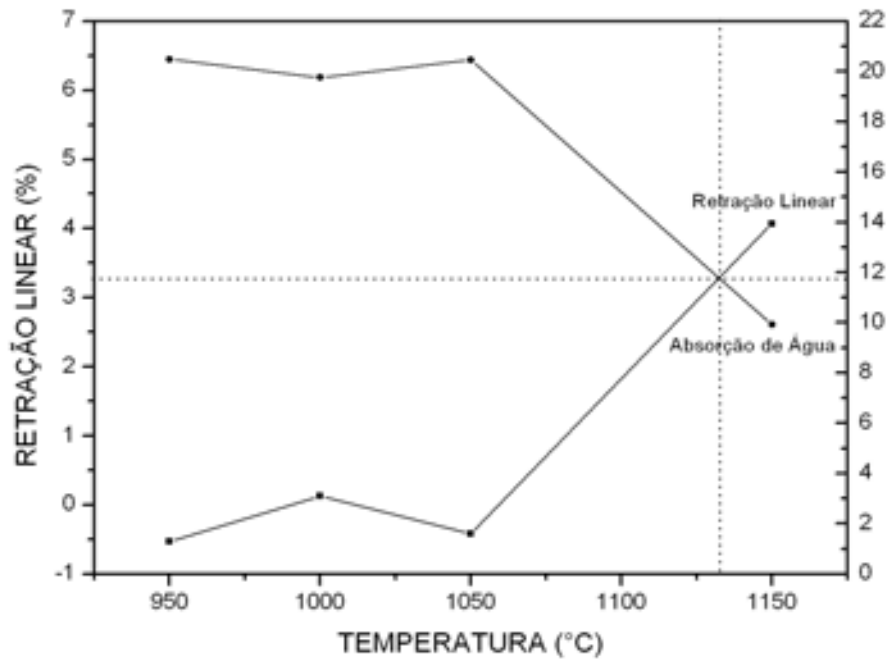


Gráfico 21: Curva de gresificação da argila com 40% de resíduo.

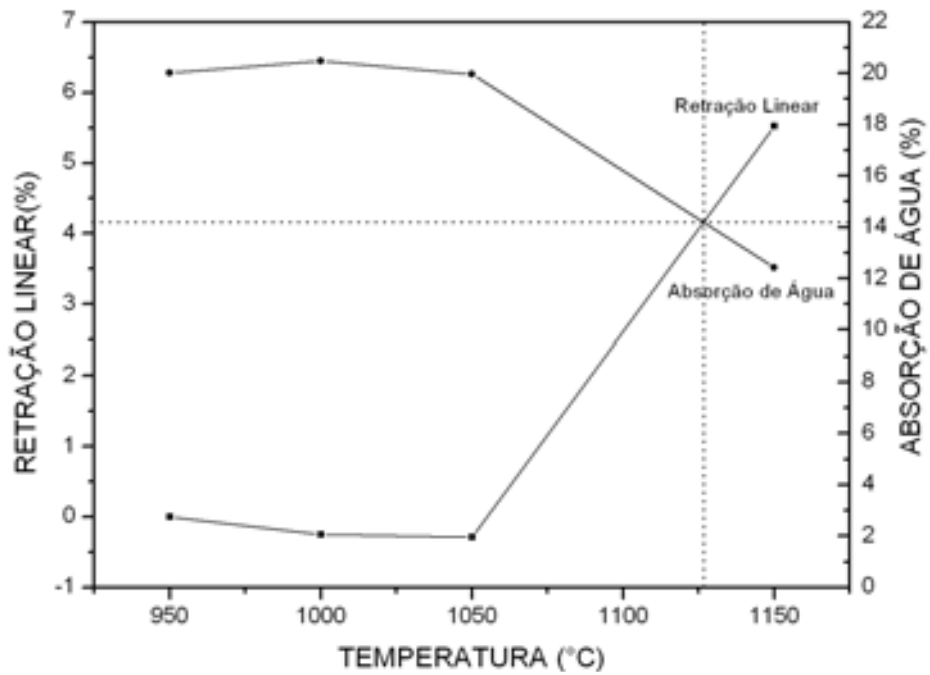


Gráfico 22: Curva de gresificação da argila com 50% de resíduo.

Massa Cerâmica	Temperatura (°C)	RL (%)	AA (%)
0% resíduo	1027,18	3,46	12,27
10% Resíduo	1071,50	3,35	11,96
20% resíduo	1102,40	3,04	11,11
30% resíduo	1128,16	2,07	8,45
40% resíduo	1132,64	3,27	11,75
50% resíduo	1126,53	4,15	14,18

Quadro 23: Temperaturas de gresificação das massas cerâmicas com resíduos em função da retração linear e da absorção de água.

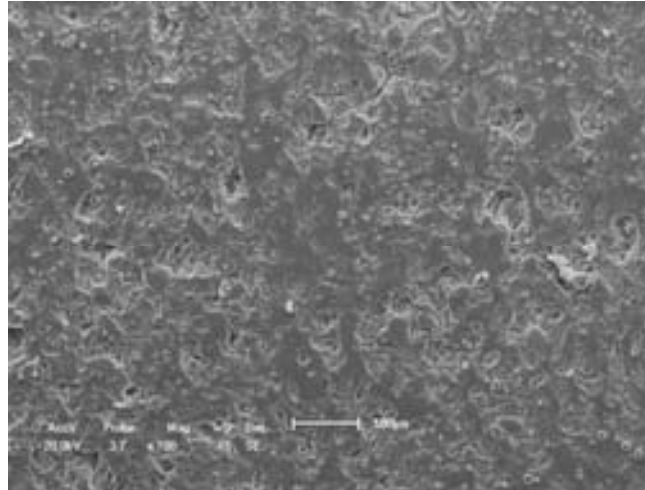
O acréscimo do resíduo aumentou a temperatura de gresificação da mistura argila-resíduo, o que pode ser atribuído a maior concentração de sílica presente no material na forma de quartzo, o qual dificulta a sinterização (Quadro 02). Análise dilatométrica (Gráfico 08) mostra claramente esse efeito para a adição de 30% em peso de resíduo.

Em concentrações maiores de resíduo O CaO vai degradar as propriedades dos corpos cerâmicos como absorção, porosidade, retração linear, resistência à flexão e massa específica aparente. Em valores de temperatura da ordem de 1130° e 1140°C, onde a alta porcentagem de CaO presente no resíduo passa a se comportar como material fundente, há uma melhoria das propriedade do material. Esse comportamento pode ser verificado em todos os gráficos na de temperatura de 1150°C e concentrações de resíduo maior que 30%, onde ocorre uma mudança do comportamento da mistura argila-resíduo.

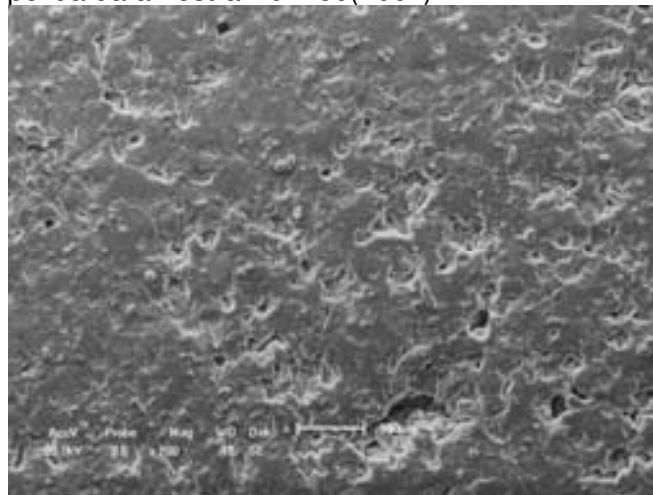
#### 4.3.6. Microestrutura

Nas fotografias abaixo, observamos as microestruturas da superfície polida das amostras de argila na composição de 0%, 20%, 30% e 40% de resíduo,

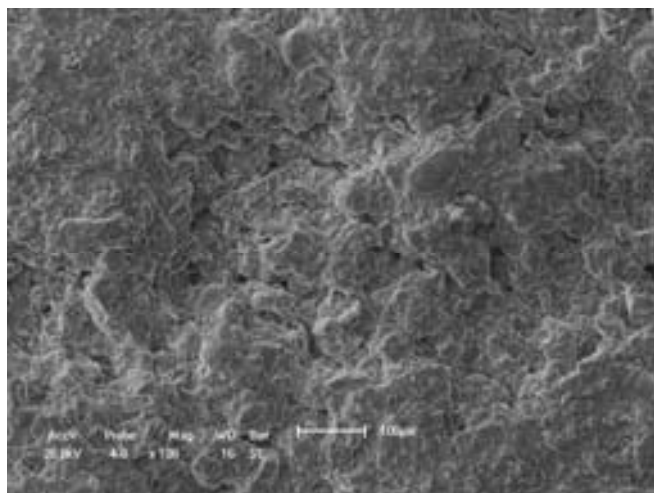
sinterizadas na temperatura de 1150°C e analisadas sobre microscopia eletrônica de varredura.



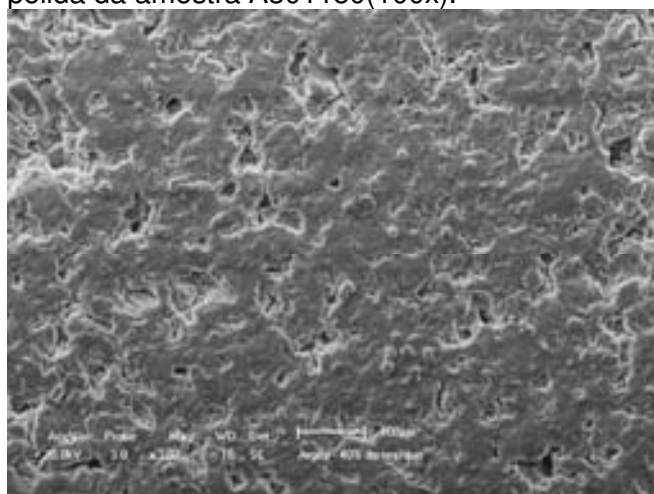
Fotografia 24: Micrografia MEV da superfície polida da amostra A01150(100x).



Fotografia 25: Micrografia MEV da superfície polida da amostra A201150(100x).



Fotografia 26: Micrografia MEV da superfície polida da amostra A301150(100x).



Fotografia 27: Micrografia MEV da superfície polida da amostra A401150(100x).

Observando as micrografias acima podemos perceber que a adição de resíduo é proporcional à quantidade de poros até 30% de incorporação (Fotografias 24, 25 e 26). Na fotografia 27 (40% de resíduo) observamos uma considerável diminuição do número de poros em relação à Fotografia 26 (30% de resíduo). Esta inversão de comportamento está de acordo com os resultados das análises realizadas e pode ser explicado devido a maior quantidade de elementos fundentes, os quais diminuem a porosidade do material por favorecerem a sua sinterização.

---

Capítulo 5

Conclusões

---

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados temos que:

- A máxima incorporação de resíduo de 40% se dá na temperatura 1150°C, nela é possível a fabricação de produtos cerâmicos, atendendo todas as especificações requeridas.
- A melhor composição e temperatura para a fabricação dos produtos cerâmicos, de acordo com as curvas de gresificação, foi a de 30% de resíduo incorporado sinterizada a 1150°C. Nesta composição e temperatura é possível a fabricação de tijolos de alvenaria, tijolos furados e telhas.
- Tijolos de alvenaria com até 50% de resíduo incorporado podem ser fabricados a partir da temperatura de 950°C.
- A fabricação de telhas só é possível na temperatura de 1150°C, com as seguintes incorporações: 10%, 30% e 40%.

No quadro abaixo, temos o resumo das diversas temperaturas de sinterização e porcentagem de incorporação. As células marcadas com um “x” representam a possibilidade de fabricação do produto cerâmico correspondente.

Porcentagem de resíduo inserido	Temperatura de sinterização														
	950°C			1000°C			1050°C			1100°C			1150°C		
	TA	TF	TE	TA	TF	TE	TA	TF	TE	TA	TF	TE	TA	TF	TE
10%	X			X			X	X		X	X		X		X
20%	X			X			X			X			X	X	
30%	X			X			X			X			X	X	X
40%	X			X			X			X			X	X	X
50%	X			X			X			X			X	X	

TA - TIJOLO DE ALVENARIA

TF - TIJOLO FURADO

TE - TELHA

Quadro 28: Temperaturas de sinterização e porcentagem de incorporação.

Podemos concluir que a incorporação de resíduos de construção é uma possibilidade viável, principalmente, para a fabricação de tijolos de alvenaria, já que se tem uma ampla faixa de incorporação, 10 a 50%. A incorporação de resíduos além de amenizar um problema ambiental, também reduziria os custos com matérias primas destes produtos cerâmicos trazendo benefícios ao meio ambiente e aos produtores cerâmicos.

## REFERÊNCIAS

ALARCON-RUIZ L.; PLATRET G.; MASSIEU E.; EHRLACHER A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, **Cement and Concrete Research**, **35**, Issue,(2005),Issue Pages 609-613.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ANTAC). **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. 1º Ed. Porto Alegre, 2003. 272 p. (Coleção Habitare, v. 4}

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10007**: Amostragem de resíduos - procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13818**: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15270-1**: Componentes Cerâmicos, Parte 1: Bloco cerâmico para alvenaria de vedação. Terminologia e requisitos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15270-2**: Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15270-3**: Bloco cerâmico para alvenaria – formas e dimensões. Rio de Janeiro, 1992.

*ASTM Standard, C 373, 1988 (2006), Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, ASTM International, West Conshohocken, PA.* Disponível em: <<http://www.astm.org>>. Acesso em: 23 jan. 2007.

*ASTM Standard, C 372, 1994 (2007), Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Porcelain Enamel and Glaze Frits and Fired Ceramic Whiteware Products by the Dilatometer Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.* Disponível em: <<http://www.astm.org>>. Acesso em: 23 jan. 2007.



BALATON, V. T.; GONÇALVES, P. S., FERRER, L. M. Incorporações de resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, Rio de Janeiro, v. 7, n° 6, Novembro/ Dezembro, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio ambiente. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. **Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002.

COSTA, M. N. S.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T. Características Químicas Mineralógicas e Cerâmicas das Argilas da Mina Granusso. **Cerâmica Industrial**, Rio de Janeiro, v. 12, n°1/2, jan-abr, 2007.

FALCÃO, I. P.; STELLIN, A. J. Utilização de finos de serrarias do espírito santo nas indústrias de construção civil. In: **Jornadas IBERMAC Materiais de Construção**, Madri/ Espanha: 2001.

GARDOLINSKI, J. E.; WYPYCH, F.; CANTÃO, M. P. Esfoliação e hidratação da caulinita após intercalação com uréia. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n° 6, p. 761-767, 2001.

GIFFONI, P. O.; LANGE, L. C. A utilização de borra de fosfato como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n° 2, p. 128-136, abr-jun, 2005.

LOTURCO, B. Construção sustentável. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 67, p.36-42, out. 2002.

LOTURCO, B. A nova lei do lixo. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 82, p.52-55, jan. 2004.

MEIRA, J. M. L. Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. **Visa.com Comunicações técnicas**, p. 1-7, jan. 2001. Disponível em: <[http://www.visaconsultores.com/pdf/VISA\\_com09.pdf](http://www.visaconsultores.com/pdf/VISA_com09.pdf)>. Acesso em: 01 mar. 2007.

MIRANDA, L.; SELMO, S. Argamassa com areia de entulho reciclado, **Revista Técnica**, São Paulo, v. 74, p. 68-71, maio. 2003.

MOREIRA, A. H., OLIVEIRA, R. M., LIMA, P. D. S. Efeito da adição do lodo de águas residuais da indústria têxtil nas propriedades de materiais de construção, **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 47, p. 158-162, 2001.

MOREIRA, J. M. S., MANHÃES J. P. V. T., HOLANDA J. N. F. Reaproveitamento de resíduos de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica Vermelha. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 51, p. 180-186, 2005.

MORETE, G. F.; PARANHOS R. P. R.; HOLANDA J. N. F. Avaliação de algumas propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos incorporados com resíduo de escória de soldagem, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n° 3, p. 232-237, 2006.

NOLASCO, A. M. **Utilização de Resíduos da Indústria de Papel na Produção de Materiais para a Construção Civil**. São Carlos/SP: 1993. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, 1993.

NOLASCO, A. M.; AGNESINI, M. V. C. **Aproveitamento do Resíduo da Indústria de Papel na Produção de Materiais de Construção a Base de Cimento**. São Carlos/SP: 1993. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, 1993.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA J. N. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 50, p. 75-80, 2004.

PINTO, Tarcísio de Paula. A nova legislação para resíduos da construção, **Revista Técnica**, São Paulo, v. 82, p.62-64, jan. 2004.

RIPOLI FILHO, F. A Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 43, p. 281-282, 1997.

SANTOS, R. S.; SOUZA, G. P.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 48, p. 115-120, 2002.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. Z.; CARDOSO, A.C.F. Gestão de resíduos da construção civil, **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, UFSC, Florianópolis, (2004), 1-13.

SERPA, E.C.S.N. **Obtenção de fritas cerâmicas a partir de resíduo refratário proveniente do setor metalúrgico**. Florianópolis/SC: 2007. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – UFSC, 1993.

SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 51, p. 325-330, 2005.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB, v. 4, n° 3, p. 460-464, 2000.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2 ed. São Paulo-SP: Edgar Blucher Ltda, 1989, V.1.

UFSC. **Laboratório de Análises Termofísicas**. Disponível em <<http://www.materiais.ufsc.br/~atermicas/dta.htm>>. Acesso em: 23 jan. 2007

VASSILEVA, C. G.; VASSILEV, S. V. Behaviour of inorganic matter during heating of Bulgarian coals 2. Subbituminous and bituminous coals. **Fuel Processing Technology**, **87**, 2006, 1095–1116.

Vieira, C. M. F.; Holanda, J. N. F.; Pinatti, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 46, n° 297, 2000.

VEIRA, F. A. **Processamento e caracterização de materiais cerâmicos obtidos através da incorporação de resíduos de mármore e granito provenientes das indústrias do RN**. Natal: 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) –UFRN, 2004.

VERDUCH, A. G.; SOLANA V. S. Formação de Eflorescências na Superfície dos Tijolos. **Cerâmica Industrial**, Rio de Janeiro, v. 5, p. 38-46, Set./Out., 2000.