

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE REJEITOS CERÂMICOS NAS PROPRIEDADES DE  
CERÂMICA VERMELHA DA REGIÃO DO RECÔNCAVO BAIANO**

**OSVALDO CRUZ SANTOS**

**ORIENTADORES: Profº Dr. Engº Rubens Maribondo Nascimento**

**Profº Ph.D Antonio Eduardo Martinelli**

**NATAL RN,  
JUNHO/2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE REJEITOS CERÂMICOS NAS PROPRIEDADES DE  
CERÂMICA VERMELHA DA REGIÃO DO RECÔNCAVO BAIANO**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

**como parte dos requisitos para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**OSVALDO CRUZ SANTOS**

**NATAL-RN,  
JUNHO/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE REJEITOS CERÂMICOS NAS PROPRIEDADES DE  
CERÂMICA VERMELHA DA REGIÃO DO RECÔNCAVO BAIANO**

**OSVALDO CRUZ SANTOS**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Eng. Rubens Maribondo Nascimento(UFRN)**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Ph.D.Antonio Eduardo Martinelli(UFRN)**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas (UFRN)**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Carlos Pereira Santos (CEFET-Ba)**

**Aos meus pais, Lourival *in memoriam*,**

**e Marieta por tudo que sou.**

**A Tânia e Bárbara, por toda dedicação**

**carinho e paciência.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha existência neste plano.

Aos meus pais e irmãos pela condução do novo processo educacional.

Aos professores Rubens Maribondo Nascimento e Antonio Eduardo Martinelli pela orientação precisa, pertinácia e tolerância.

Aos amigos do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Pó da UFRN, pelo apoio dado durante os ensaios realizados, em especial aos estagiários Felipe e Pedro.

Ao CEFET-Ba pela oportunidade para a realização do mestrado.

Ao meu sobrinho engenheiro Paulo, pelo valioso apoio e colaboração.

Aos colegas da SUMAC e CEFET pelo incentivo.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse realizada essa nova jornada na minha vida acadêmica.

Muito Obrigado. Que Deus nos proteja!

Osvaldo Cruz Santos

SANTOS, O. C., Influência da adição de rejeitos cerâmicos nas propriedades de cerâmica vermelha da região do Recôncavo Baiano, Natal-RN, 2007. 80p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

## RESUMO

O estudo das propriedades físicas e mecânicas é uma análise de importância inquestionável na produção dos materiais cerâmicos. Na região do Recôncavo Baiano, encontram-se cerâmicas e pequenas olarias, que ainda utilizam técnicas rudimentares, onde a necessidade de caracterização das matérias-primas é denunciada pela qualidade do produto final.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento da argila proveniente da região do Recôncavo Baiano, compreendida entre os municípios de Candeias e Camaçari, com adição de 5, 10 e 15% em peso de rejeitos cerâmicos, procurando otimizar as propriedades físico-mecânicas do produto final, visando uma melhor trabalhabilidade, resistência mecânica e baixas retração linear e absorção de água. O rejeito cerâmico e a argila foram caracterizados por FRX, DRX, TG, ATD e análise granulométrica. Foram preparados corpos-de-prova com dimensões de 60x20x5mm, por prensagem uniaxial a 25MPa. As propriedades tecnológicas avaliadas foram: retração linear, absorção de água, porosidade aparente e resistência mecânica à flexão. Os corpos foram sinterizados em forno resistivo nas temperaturas de 850°, 950° e 1050°C e comparadas suas propriedades mecânicas e a gresificação. Obteve-se para os corpos com incorporação de 15% em peso de rejeitos cerâmicos, propriedades superiores as da argila, nas temperaturas entre 900° e 1000° C.

**Palavras-chave:** argila, rejeito cerâmico e gresificação.

SANTOS, O. C., Influence of the addition of brick scraps in the proprieties of red ceramic in the region of the Recôncavo Baiano, Natal-RN, 2007. 80p. Dissertation (mastership) – Program of post-graduation in Mechanics Engineering, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

### **ABSTRACT**

The study of the physical and mechanic properties is an analysis of unquestioned importance on the production of the ceramic materials. In the region of the Recôncavo Baiano, there are ceramic and small brick factories, that still use rudimentary techniques, where the necessity of characterization of raw materials is denounced by the quality of the final product.

The present work has for objective to study the behavior of the clay proceeding from the region of the Recôncavo, between the cities of Candeias and Camaçari/Ba, with addition of 5, 10 and 15% by weight of brick scraps, trying to optimize the physic and mechanical properties of the final product, aiming a better possibility of being manufactured, mechanic resistance, low linear retraction and water absorption. The brick scraps and the clay were characterized by FRX, DRX, TG, ATD and the granulometric analysis. Samples for testing where prepared by uniaxial pressing at 25Mpa, in 60x20x5mm size. The evaluated technological properties were: linear retraction, water absorption, apparent porosity and flexural strength. The samples were burned in electric oven in the temperatures of 850°, 950° and 1050°C and compared its mechanical properties and the gresification. With addition of 15% by weight of brick scraps and burning at 900°-1000°C the samples showed properties superior to that clay.

**Word-key:** clay, brick scraps and gresification.



# SUMÁRIO

## ÍNDICE DE SIMBOLOS

## ÍNDICE DE FIGURAS

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Massa cerâmica</b>	<b>19</b>
<b>2.1.1. Minerais Argilosos</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2. Rejeitos cerâmicos (resíduos)</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Processamento cerâmico</b>	<b>35</b>
<b>2.2.1 Processo Produtivo da Indústria</b>	<b>35</b>
<b>2.3 Ensaios Tecnológicos</b>	<b>51</b>
<b>2.3.1. Análise química</b>	<b>52</b>
<b>2.3.2. Difração de raio X</b>	<b>53</b>
<b>2.3.3. Análise térmica diferencial</b>	<b>54</b>
<b>2.3.4. Análise termogravimétrica</b>	<b>55</b>
<b>2.3.5. Distribuição de tamanhos das partículas</b>	<b>56</b>
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>57</b>
<b>3.1 Matérias-primas</b>	<b>58</b>
<b>3.1.1 Argila</b>	<b>59</b>
<b>3.1.2 Rejeitos cerâmicos</b>	<b>59</b>
<b>3.2 Preparação das amostras</b>	<b>60</b>

3.2.1. Moagem	60
3.2.2 Homogeneização	61
3.2.3 Compactação	62
3.2.4 Secagem	63
3.2.5 Queima	64
3.3 Caracterização das matérias-primas	65
3.3.1 Análise química	65
3.3.2. Difração de raios X	66
3.3.3. Análise térmica	66
3.3.4. Distribuição de tamanhos das partículas	67
3.4. Características após a queima	67
3.4.1. Retração linear	67
3.4.2 Absorção de água	68
3.4.3 Porosidade aparente	68
3.4.4 Massa específica aparente	69
3.4.5 Resistência Mecânica	69
3.4.6. Temperatura de fusão	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 Caracterização dos pós	71
4.1.1. Análise Química	71
4.1.2. Difração de Raios X	72
4.1.3. Análise Química racional das matérias-primas	73
4.1.4. Análise Térmica	74
4.1.5. Granulometria	77
4.2 Caracterização dos sinterizados	79

<b>4.2.1. Retração Linear</b>	<b>81</b>
<b>4.2.2. Absorção de água</b>	<b>81</b>
<b>4.2.3. Porosidade aparente</b>	<b>82</b>
<b>4.2.4. Massa específica aparente</b>	<b>83</b>
<b>4.2.5. Resistência mecânica</b>	<b>84</b>
<b>4.3 Estudo do ciclo de queima</b>	<b>85</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>89</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>92</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

TGA	-	Análise Termogravimétrica
DTA	-	Análise Térmica Diferencial
DRX	-	Difração de Raios-X
$\sigma$	-	Resistência à flexão
$\mu\text{m}$	-	Micrômetro
$\text{g}/\text{cm}^3$	-	Gramas por centímetro cúbico
$\text{kgf}/\text{cm}^2$	-	Quilograma força por centímetro quadrado
Å	-	Amstrong
$2\theta$	-	Ângulo de difração de raios x
$L_0$	-	Comprimento inicial do corpo-de-prova
$L_i$	-	Comprimento do corpo-de-prova após queima
P	-	Carga aplicada ao corpo-de-prova
L	-	Distância entre os apoios
a	-	Largura do corpo-de-prova
b	-	Altura do corpo-de-prova
$P_u$	-	Peso do corpo-de-prova úmido
$P_s$	-	Peso do corpo-de-prova seco
$P_i$	-	Peso do corpo-de-prova imerso em água
AA	-	Absorção de Água
PA	-	Porosidade Aparente
MEA	-	Massa Específica Aparente
RLq	-	Retração Linear

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelos esquemáticos da camada estrutural básica de uma argila 1:1	23
Figura 2.2: Modelos esquemáticos da camada estrutural básica de uma argila 2:1	24
Figura 2.3: Aplicação das argilas	29
Figura 2.4: Estratigrafia da Bacia do Recôncavo	31
Figura 2.5: Fluxograma do processo de cerâmica vermelha	37
Figura 2.6: Jazida de argila (processo de extração)	38
Figura 2.7: Fluxograma tradicional da disposição de máquinas	40
Figura 2.8: Vista do laminador	42
Figura 2.9: Vista do processo de extrusão (maromba)	43
Figura 2.10: Sinterização	46
Figura 2.11: Construção de um forno tipo contínuo	50
Figura 2.12: Interior do forno contínuo tipo Hoffman	50
Figura 3.1: Fluxograma experimental utilizado	57
Figura 3.2: Mapa Geológico do Recôncavo Baiano	58
Figura 3.3: Jazida de Argila – Ba-523	59
Figura 3.4: Material a ser reutilizado (rejeitos cerâmicos)	60
Figura 3.5: Jarro - moinho de bolas (processo de moagem)	61
Figura 3.6: Moinho planetário - (processo de homogeneização das amostras)	62
Figura 3.7: Prensagem dos corpos-de-prova	63
Figura 3.8: Corpos- de- prova após compactação	63
Figura 3.9: Secagem dos corpos de prova	64
Figura 3.10: Forno utilizado para sinterização dos corpos de prova	65
Figura 3.11: Analisadores termogravimétrico e termodiferencial	66
Figura 4.1: Resultado do DRX da argila	72

Figura 4.2: Resultado do DRX dos rejeitos cerâmicos	73
Figura 4.3: Curva termogravimétrica (TG) da argila	74
Figura 4.4: Curva termodiferencial (ATD) da argila	75
Figura 4.5: Curva termogravimétrica (TG) dos rejeitos cerâmicos	76
Figura 4.6: Curva termodiferencial (ATD) dos rejeitos cerâmicos	77
Figura 4.7: Distribuição granulométrica fracional e acumulada da argila	78
Figura 4.8: Distribuição granulométrica fracional e acumulada dos rejeitos cerâmicos	78
Figura 4.9: Retração linear em função da temperatura ara diversas formulações	81
Figura 4.10: Absorção de água para as diversas formulações	82
Figura 4.11: Porosidade aparente para as diversas formulações	83
Figura 4.12: Massa específica aparente para as diversas formulações	84
Figura 4.13: Resistência mecânica à flexão	85
Figura 4.14: Curvas de Gresificação 100% Argila	86
Figura 4.15: Curvas de Gresificação 5% em peso dos rejeitos cerâmicos	86
Figura 4.16: Curvas de Gresificação 10% em peso dos rejeitos cerâmicos	87
Figura 4.17: Curvas de Gresificação 15% em peso dos rejeitos cerâmicos	87

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação do argilominerais 1:1 (difórmicos)	22
Tabela 2.2: Classificação do argilominerais 2:1 (trifórmicos)	23
Tabela 2.3: Dimensões das partículas, segundo Serger	25
Tabela 2.4: Dimensões das partículas, segundo Attemberg	25
Tabela 2.5: Reservas das argilas do Recôncavo	36
Tabela 2.6: Temperaturas típicas de queima	47
Tabela 2.7: Quadro comparativo dos consumos e tempo de queima	51
Tabela 3.1: Formulação da mistura cerâmica (argila + rejeitos cerâmicos)	62
Tabela 4.1: Composição química em peso das matérias-primas	71
Tabela 4.2: Análise racional das matérias primas	74
Tabela 4.3: Porcentagem do diâmetro das partículas das matérias-primas estudadas.	79
Tabela 4.4: Caracterização das formulações à temperatura de 850°C	80
Tabela 4.5: Caracterização das formulações à temperatura de 950°C	80
Tabela 4.6: Caracterização das formulações à temperatura de 1050°C	80
Tabela 4.7: Resistência mecânica à flexão em três pontos	84
Tabela 4.8: Estimativa de temperatura de fusão a partir da fórmula de Schuen	88

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra Cerâmica originária do grego “KERAMUS”, que significa “coisa queimada”, tem um sentido amplo e abrange desde a sua matéria-prima até a arte de fabricar objetos de barro cozido. Tecnicamente convencionou-se chamar de cerâmica todo e qualquer produto obtido pela modelagem e queima de uma mistura de minerais com propriedades adequadas à confecção e acabamento de produtos a que se destinam (GUETO, 2005).

A cerâmica é um material milenar e muito versátil, desde a sua descoberta se apresentou como um material de extrema utilidade para a humanidade. Seus primeiros exemplares foram encontrados em assentamentos humanos datados do início do período neolítico. É difícil estabelecer o momento exato da descoberta da cerâmica. Quando o homem pré-histórico torna-se sedentário e descobre o fogo e por acaso a sua propriedade de endurecer o barro, unido à necessidade de objetos para caçar, guardar seus alimentos, acondicionar água e até mesmo guardar os restos mortais de seus entes, fez com que ele aprendesse a trabalhar com a argila (FILHO & MÔNACO, 2001).

Assim, pode-se observar como foi o seu desenvolvimento através das mais distintas civilizações, começando pela Mesopotâmia, onde se tem o relato mais antigo do seu aparecimento. Entre os anos 5000 e 4000 a.C. a cerâmica se desenvolveu com peças artísticas, com desenhos de animais e figuras geométricas. Por volta do ano 3000 a.C. a Suméria constituiu um importante centro de produção cerâmica, onde se utilizavam tijolos de argila cozida nas edificações.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (2006), a cerâmica tem um papel importante para economia do país, com participação no PIB (Produto Interno Bruto) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares. A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos



equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

No campo da construção, a cerâmica é um dos materiais mais antigos, seja na forma de blocos e telhas, seja na forma de placas para revestimentos, que eram utilizadas apenas em construções luxuosas. Porém, somente após a segunda guerra mundial (1939-1945), foram incrementadas novas tecnologias, permitindo a produção em massa, com a conseqüente queda dos preços e sua popularização, dando assim incentivo aos estudos e pesquisas científicas, objetivando melhorar a qualidade do produto.

Compete à engenharia de materiais o desenvolvimento, produção, ensaios, avaliação, aplicação e conhecimento dos materiais, no caso específico de tecnologia cerâmica, de materiais e produtos cerâmicos. Logo, este ramo da engenharia trata a natureza e comportamento da matéria-prima cerâmica, sua estrutura e composição, utilizando técnicas e equipamentos modernos, face à complexidade das matérias-primas cerâmicas e dos materiais cerâmicos processados.

Apesar dos problemas apresentados nas cerâmicas utilizadas na construção civil, serem alvos constantes de críticas dos profissionais e das empresas que atuam nesse segmento, tem-se nos últimos anos, ocorrido rápidos avanços tecnológicos na área de transformação dos materiais, impondo uma renovação no tratamento e na gestão dos materiais, integrados aos conhecimentos fundamentais aplicados à Ciência e Tecnologia dos Materiais. Se tratando de cerâmica vermelha ou estrutural, se utilizam a argila para fabricação de blocos furados, tijolos, telhas, ladrilhos de piso, objetos de adorno, entre outros, e segundo SANTOS (1989), para tanto, torna-se necessário seu estudo mais aprofundado, considerando suas características e podendo analisar suas propriedades a partir da sua forma natural, plástica, seca e queimada.

O estudo das propriedades físicas e mecânicas é uma análise da importância inquestionável na produção dos materiais cerâmicos, enquanto a necessidade de uma melhor caracterização das matérias-primas é denunciada pela qualidade questionável do produto final, a baixa produtividade na produção aponta para urgência de implantação de melhorias no controle dos processos produtivos industriais. Essa realidade pode ser observada inclusive no Recôncavo Baiano, região produtora de cerâmica.

Pequenas cerâmicas e olarias que utilizam técnicas rudimentares ou artesanais são encontradas em todo o estado da Bahia, merecendo destaque em produção, a região do

recôncavo, que abrange municípios em torno da Bahia de Todos os Santos e adjacências, sendo essa a principal por englobar a Região Metropolitana de Salvador (RMS).

A maior parte da produção de cerâmica vermelha, na Bahia, é distribuída por todo o estado, e advém de empresas de pequeno porte, de tecnologia primária a artesanal. As maiores e melhores instaladas fábricas do produto cerâmico estrutural, na Bahia, são as do Recôncavo, mas, em relação aos centros avançados de outros estados, a qualidade das peças produzidas é tida como apenas razoável.

Na RMS estima-se uma demanda anual em torno de 600 milhões de peças de cerâmica vermelha, enquanto que no Recôncavo registra-se uma produção da ordem de 250 milhões de peças anuais (FILHO & MÔNACO, 2001).

Na região, os blocos de vedação, ou simplesmente tijolos furados, correspondem à aproximadamente 85% da produção. Esses tijolos são normalmente queimados em fornos do tipo Hoffman em temperatura entre 800°C e 950°C, utilizando-se principalmente lenha como combustível. Há um percentual de perda após queima, chegando, em média, a 8% na etapa de queima.

A produção está voltada, sobretudo, para a fabricação de blocos de vedação, que se constitui em um tipo de produto de baixo valor agregado. Há, ainda, uma pequena produção de telhas, pisos extrudados e placas de revestimento. Mão-de-obra não qualificada, defasagem tecnológica e ausência de controle de qualidade são os fatores preponderantes para a obtenção de produtos com inconstância nas suas propriedades e que, em muitos casos, não atendem as normas técnicas.

De acordo com dados da Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), apesar da reserva dessa região, em torno de 188 milhões de toneladas de minerais argilosos, e das excelentes condições de infra-estrutura, não existe um pólo industrial cerâmico com tecnologia avançada. A procura por cerâmica estrutural é muito grande, enquanto que a produção somente cobre 30% da demanda, o que torna o setor deficitário (FILHO & MÔNACO, 2001).

Normalmente os rejeitos de peças queimadas são depositados no próprio pátio das indústrias, ou, em alguns casos, transportados para aterros sanitários.

Diante desse quadro, realizou-se coleta das matérias-primas na região, entre Candeias e Camaçari, recôncavo baiano, a fim de realizar estudos de suas propriedades físicas e mecânicas, visando o reaproveitamento dos rejeitos cerâmicos, o que significa mais de 20 (vinte) milhões de peças indo diretamente para aterros, visto que estas depois de queimadas,

não podem ser reutilizadas no processo de fabricação. Desta forma o uso desse rejeito na produção de cerâmica se torna uma opção viável. Do ponto de vista econômico pelo fato de utilizar-se um rejeito como parte da formulação, e do ponto de vista ambiental, em reduzir o acúmulo desses rejeitos nos aterros sanitários.

A indústria cerâmica utiliza em seu processo produtivo, diversas fontes de energia, tais como: lenha, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural, entre outros. A mais difundida, principalmente no recôncavo baiano, é a lenha, utilizada por grande número de empresas, em especial, pelos produtos de telhas e tijolos que constituem a maior parte destas indústrias.

O gás natural, cuja utilização vinha sendo aguardada por grande parte das indústrias de cerâmicas será uma expectativa de uma redução nos custos com combustíveis da ordem de 40% quando comparado ao GLP. Pelo fato da região em destaque ficar próxima da estação de processamento do gasoduto de Manati, valendo ressaltar, que essa estação é capaz de processar até 6 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia, torna-se assim, a região, mais competitiva reforçando, dessa a forma, a crescente perspectiva de instalações de novas indústrias cerâmicas, justificando-se por uma demanda comercial positiva, lado a lado com toda uma infra-estrutura favorável a esse ramo industrial.

A justificativa desse trabalho está fundamentada em dois aspectos principais: primeiramente, deve-se ressaltar a importância de se ter uma formulação para massa cerâmica que tenha uma boa trabalhabilidade, pequena retração após queima e que não trinque durante a secagem, necessitando-se para isto de proporções definidas entre as matérias-primas plástica e a não plástica; segundo, a reciclagem do material cerâmico descartado com adição do pó às massas, para que venha adquirir melhoria em acabamento, resistência mecânica, baixa absorção de água e porosidade.

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da adição de rejeitos cerâmicos nas propriedades tecnológicas de formulações de massa cerâmica com argila da região do recôncavo baiano. Destacam-se, os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterização físico-química das matérias-primas da região.
2. Estudo do ciclo de queima.
3. Contribuição na diminuição dos impactos negativos causados à natureza pelos rejeitos cerâmicos produzidos na região.

## CAPÍTULO 2

---

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Massa cerâmica

A composição das massas cerâmicas varia em função do tipo das peças que se deseja fazer, do método a ser utilizado para conformá-las, do tipo de queima e das características do produto final.

Assim, a massa a ser utilizada para a fabricação de um refratário, o qual será usado num alto forno de siderurgia, será diferente daquela usada para fabricar um refratário para um forno de pizza ou uma lareira. Também a massa usada para um utilitário que vai direto ao fogo será diferente daquela usada para fazer uma travessa para saladas (GIARDULO, 2005).

A massa para um ladrilho, conformado por prensagem a seco, terá características muito diferentes das que conformam as peças no torno. A massa para queimas ultra-rápidas se diferencia daquelas para queima em fornos que têm ciclos de mais de um dia. Disso pode-se concluir que não existe uma massa universal, mas existem massas com características definidas para se obter corpos cerâmicos conformados por métodos próprios, que depois de queimados, segundo ciclos definidos, dêem à peça pronta, a cor a resistência e o aspecto planejado.

Ainda segundo GIARDULO (2005) as massas comumente utilizadas no Brasil dividem-se em dois grandes grupos: para baixa temperatura, ou seja, para serem queimado até 1.100°C; para alta temperatura, queimado acima dessa temperatura.

A porcelana foi a primeira massa desenvolvida no mundo pelos chineses, há muitos séculos, para ser queimada em torno de 1.300°C, dando um corpo cerâmico de cor branca, sem porosidade e translúcido quando fino. Originalmente era feita de caulim, argila, quartzo e

feldspato; posteriormente foi feita a porcelana de ossos, que usava osso calcinado como fonte de fosfato para tornar a peça mais translúcida.

### **2.1.1. Minerais Argilosos**

É muito difícil definir a palavra argila, o que permite vários conceitos subjetivos e interpretativos. A argila é um material natural, terroso, de granulação fina que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. Quimicamente, são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio.

Para os ceramistas, a argila é um material que, quando misturado com certa quantidade de água, torna-se uma massa plástica que endurece após a secagem e queima. Na mecânica dos solos, a argila é definida como material natural de textura terrosa, que desenvolve plasticidades quando misturado com água, e com DEE (diâmetro específico equivalente)  $\leq 2\mu\text{m}$ .

Segundo SANTOS (1989), todas as argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como “argilominerais”. Uma argila qualquer pode ser composta por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de diversos argilominerais.

A argila é uma rocha finamente dividida, constituída, essencialmente, por argilominerais podendo conter minerais que não são considerados argilominerais como: calcita; dolomita; gipsita; quartzo; aluminita; pirita; entre outros (Santos, 1989).

As argilas, por terem emprego na fabricação de tijolos, devem possuir plasticidade adequada para a moldagem, ter valor médio ou elevado para a tensão ou módulo de ruptura à flexão. Para permitir o manuseio durante a fabricação e após a secagem, a porosidade aparente e absorção de água devem ser baixas a fim de não permitir a permeação de água, pois não devem apresentar trincas e empenamentos após secagem e queima.

Costumam apresentar cor vermelha após a queima em baixas temperaturas (geralmente 800° a 950°C, que é a temperatura usual de queima para esse tipo de produto), com um mínimo de trincas e empenamentos. Elevados teores de ferro divalente, elementos alcalinos e alcalino-terrosos, são prejudiciais pelo fato de causar excessiva retração, reduzir a faixa de vitrificação e causar coloração indesejável.

Os caulins são tipos de argilas nas quais há predominância do argilomineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Existem jazidas de caulins residuais, ou seja, eles se encontram no local onde foram formados pela ação do intemperismo sobre rochas, geralmente graníticas, e também de caulins sedimentares, que se originaram pelo transporte e classificação por água dos residuais. Normalmente os caulins sedimentares e principalmente os residuais contêm grande quantidade de areia, (quartzo) mica, turmalina, etc. que devem ser separados por beneficiamento para que possam ser usados em cerâmica, papel, inseticidas, etc. De um modo geral, os caulins têm pouca plasticidade. Em cerâmica são usados tanto na preparação de massas plásticas (porcelana, faiança, grês), com a função de aumentar o teor de alumina e auxiliar na alvura do produto, bem como em barbotinas e na preparação de engobes e esmaltes.

Quimicamente, os argilominerais, como foram assinalados, são formados por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, contendo ainda, geralmente, alto teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos. Além dos argilominerais contêm as argilas, outros materiais e minerais, tais como “matéria orgânica”, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não cristalinos ou amorfos.

Os argilominerais podem ser divididos em duas classes gerais, em função de suas estruturas:

- a) silicatos cristalinos com estrutura em camadas ou lamelares, também chamados silicatos em folhas;
- b) silicatos cristalinos com estrutura fibrosa.

Os silicatos de estrutura fibrosa são constituídos por apenas dois argilominerais: sepiolita e poligrosfuitas, esse também chamado de atapugita. Já os silicatos de estrutura lamelar podem ser divididos em dois subgrupos caracterizados em função de propriedades estruturais:

- camada 1:1 ou difórmicas;
- camada 2:1 ou trifórmicas.

Tal nomenclatura, 1:1 e 2:1 deve-se ao número de camadas de tetraedros de silicato e de octaedros de hidróxidos, respectivamente, que encontram na constituição de cela unitária de estrutura cristalina do argilomineral.

Em certos locais encontra-se a formação de argilas plásticas, denominadas com a palavra “tagua”, apesar de ser uma forma imprecisa de se referir às matérias-primas plásticas, pois,

necessita-se neste ponto a família das argilas. Existem famílias de argilas denominadas ilitas, caulinitas, montmorilonitas e haloisitas. As argilas ilitas têm potássio, portanto, podem apresentar uma boa resistência após queima; são as preferidas. As caulinitas não têm fundentes, portanto apresentam uma resistência fraca após queima. As argilas montmorilonitas têm uma tendência violenta em causar trincas de secagem que absolutamente impedem qualquer produção com elas.

As haloisíticas têm partículas em forma de agulha que aumentam muito a demanda de água para extrudar.

Nas tabelas 2.1 e 2.2, apresentam-se a classificação dos principais argilominerais, com sua estrutura em camadas, divididos em grupos com suas respectivas fórmulas correspondentes à célula unitária. Nas figuras 2.1 e 2.2, apresentam-se os modelos esquemáticos da camada estrutural básica de uma argila.

Tabela 2.1: Classificação do argilominerais 1:1 (difórmicos)

(Santos, 1989)

Classe Geral	Família	População da camada octaédrica	Nome do grupo	Argilominerais do grupo	Fórmula da cela unitária (extremo da série)	
Silicatos em camadas ou lamelares	1:1 ou difórmicos (distância interplanar de 7 Å)	Dioctaédrica	Caulinita	Nacrita	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	
				Diquita	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	
				Caulimita	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	
				Haloisita - 7Å	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	
			Serpentina	Haloisita - 10Å	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8 \cdot 4H_2O$	
				Antigorita	$Mg_6 Si_4 O_{10} (OH)_8$	
		Crisotila		$Mg_6 Si_4 O_{10} (OH)_8$		
		Trioctaédrica	Lizardita	$Mg_6 Si_4 O_{10} (OH)_8$		
			Ortosserpentina de 6 camadas	$Mg_6 Si_4 O_{10} (OH)_8$		
			Amesita	$(Mg_4 Al_2) (Si_2 Al_2) O_{10} (OH)_8$		
			Cronstedtita	$(Fe^{2+}_4 Fe^{3+}_2) (Si_2 Fe^{3+}_2) O_{10} (OH)_8$		
					Chamosita (Betierina)	$(Fe^{2+}_{3,6} Mg_{0,4} Al_{1,6}) (Si_{2,6} Al_{1,4}) O_{10} (OH)_8$

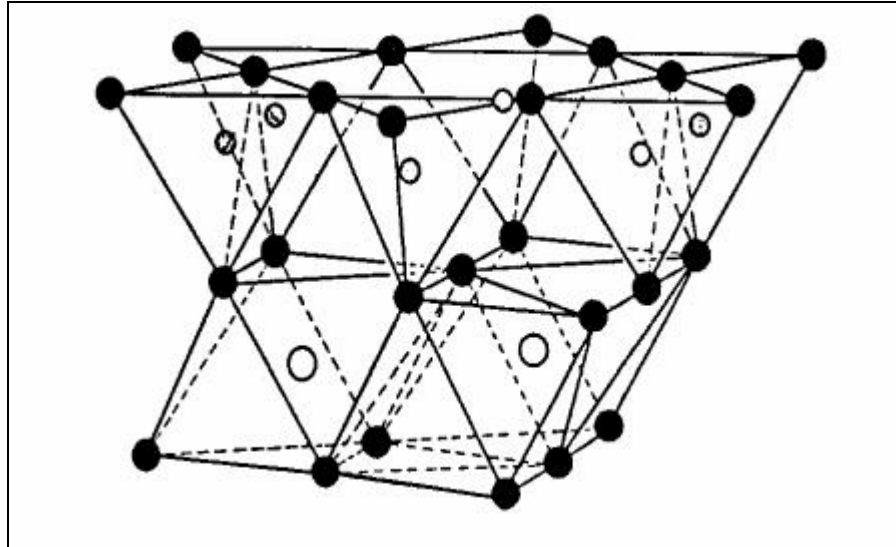


Figura 2.1: Modelos esquemáticos da camada estrutural básica de uma argila 1:1

(CARDOSO, 2002)

Tabela 2.2: Classificação do argilominerais 2:1 (trifórmicos)

(Santos, 1989)

Classe Geral	Família	Nome do grupo	População da camada octaédrica	Argilominerais do grupo	Fórmula da cela unitária (extremo da série)
Silicatos em camadas ou lamelares	2:1 ou trifórmicos (distância interplanar Basal de 10Å na forma anidra)	Esmectita	Dioctaédrica	Beidelita	$0,33M^+ \cdot Al_2 (Si_{3,67} Al_{0,33}) O_{10} (OH)_8$
				Nontronita	$0,33M^+ \cdot Fe_2 (Si_{3,67} Al_{0,33}) O_{10} (OH)_8$
				Volconsoita	$0,33M^+ \cdot (Fé, Cr, Al)_8 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$
				Montmorilonita	$0,33M^+ \cdot (Al_{1,67} Mg_{0,33}) Si_4 O_{10} (OH)_8$
				Saponita	$0,33M^+ \cdot Mg_3 (Si_{3,67} Al_{0,33}) O_{10} (OH)_8$
				Sauconita	$0,33M^+ \cdot (Mg, Zn)_3 (Si_{3,67} Al_{0,33}) O_{10} (OH)_8$
		Vermiculita	Dioctaédrica	Hectorita	$0,33M^+ \cdot (Mg, Li)_3 (Si_{3,67} Al_{0,33}) O_{10} (OH)_8$
				Vermiculita dioctaédrica	$0,67M^+ \cdot (Al, Fe \text{ etc})_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$
				Vermiculita trioctaédrica	$0,67M^+ \cdot (Al, Fe \text{ etc})_3 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$



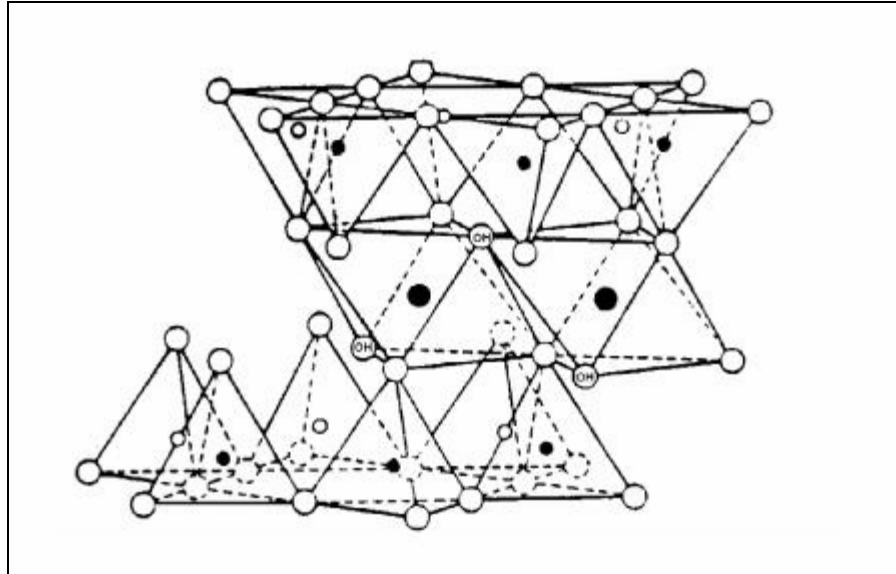


Figura 2.2: Modelos esquemáticos da camada estrutural básica de uma argila 2:1

(CARDOSO, 2002)

#### 2.1.1.1. Propriedades básicas dos materiais argilosos

Os Materiais Argilosos se diferenciam entre si e se caracterizam fisicamente pelas seguintes propriedades:

- a. dimensão das partículas;
- b. poder de fluidificação;
- c. plasticidade.

##### a. Dimensão das partículas

Cada argila tem uma granulometria própria, diferente de outras. Isso depende do solo e das dimensões das partículas caulínísticas e de outros materiais procedentes da rocha mãe, durante a desagregação no processo de sedimentação. Tem-se realizado diferentes análises para cada argila, o que se pode resumir conforme Tabelas 2.3, segundo Serger e Tabela 2.4, segundo Attemberg.

Tabela 2.3: Dimensões das partículas, segundo Serger

(GUETO, 2005)

<b>Partícula</b>	<b>Material</b>
de 0 a 0,01mm	argila
de 0,001a 0,025mm	pó extra fino
de 0,025 a 0,04 mm	areia impalpável
de 0,04a 0,33mm	areia fina
0,33	areia grossa

Tabela 2.4: Dimensões das partículas, segundo Attemberg

(GUETO, 2005)

<b>Partícula</b>	<b>Material</b>
de 0 a 0,0002m	argila
de 0,0002a 0,005mm	pó extra fino
de 0,002 a 0,02 mm	areia fina
de 0,02a 0,2mm	areia grossa
de 0,2a 2mm	areia muito grossa

Pode-se concluir que as partículas de argila são sempre inferiores a um micro de diâmetro. O conhecimento da granulometria de um material argiloso é de grande importância sobre toda a determinação da superfície, por que esta tem uma grande influência sobre as propriedades práticas fundamentais do material, tais como: a plasticidade e a fluidificação.

#### b. Fluidificação

Um material argiloso tem a propriedade de manter-se em suspensão por certo período de tempo, depositando-se muito lentamente. A velocidade de decantação pode ser influenciada pela adição de substâncias estanhas. Tem-se, assim, a floculação e defloculação, fenômeno que se destaca em cada argila. As causas desse fenômeno são várias.

A experiência demonstra que são mais fluidificadas as argilas de reação alcalina ( $\text{pH} > 7$ ) e as que são ricas em substâncias orgânicas (húmus); a adição eletrólitos básicos aumenta o poder de fluidificação, enquanto que os ácidos provocam a coagulação ou floculação.

Pode-se distinguir os seguintes casos:

- as partículas pelo fato de estarem imersas em um líquido, recebem um empuxo ascendente;
- a tensão superficial do líquido pode ir de encontro à ação de gravidade na partícula finíssima;
- existem, portanto, causas de natureza iônica. De fato, as partículas argilosas em suspensão estão carregadas de eletricidade negativa.

### c. Plasticidade

Um material que, com uma determinada quantidade de líquido, forma uma pasta dotada de grande coesão, tanto no estado pastoso como depois de seco, e que no estado pastoso tenha elasticidade nula, ou seja, que mantenha as deformações provocadas, sem sofrer fissuras, se considera plástico.

Segundo FREITAS (2003), a plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares.

Os principais fatores que afetam a plasticidade são:

- Mineralógicos: são os minerais argilosos, a causa primeira da plasticidade das argilas. Em argilas do mesmo tipo, quanto maior for o teor em minerais argilosos, maior será a plasticidade. Argilas com composições diferentes apresentam comportamentos plásticos diferentes. De acordo com as respectivas plasticidades relativas, as argilas podem ordenar-se da seguinte forma:

Bentonita > ball-clay > fire-clay > caulim

A presença nas argilas de minerais acessórios não plásticos (quartzo, feldspato, etc.), reduz a plasticidade das argilas.

- Granulométricos: em geral, nas massas ou pastas argilosas, um aumento da percentagem de partículas finas corresponde a um aumento de plasticidade. Também a distribuição dimensional das partículas é muito importante. Quer seja a dimensão média quer a distribuição dimensional das partículas refletem na superfície específica, pois, quanto maior é a superfície específica, maior é a quantidade de água que se pode fixar numa superfície disponível maior.

- Forma dos cristais: o hábito lamelar dos minerais argilosos é um fator muito influente na plasticidade aliada à clivagem basal fácil e perfeita. Mas só por si, o hábito lamelar e a clivagem basal fácil e perfeita, são pouco influentes. É o caso das micas que, mesmo quando reduzidas a granulometria extremamente fina, são muito menos plásticas que qualquer dos minerais argilosos.
- Carga elétrica dos cristais: os minerais argilosos possuem carga elétrica global negativa para que quase todos os pH's com a qual está relacionada a sua capacidade de troca de cátion e o seu potencial eletrocinético. A espessura do filme de água, coordenada ou ligada que envolve as partículas nas massas de argila, está diretamente relacionada com o potencial eletrocinético e com o cátion de troca. As partículas de argila que fazem parte de uma massa plástica estão em posição de equilíbrio entre forças repulsivas devidas às suas cargas elétricas negativas, balanceadas por forças atrativas com uma componente de Van Der Waals e a outra de tensão superficial devida à água.
- Natureza dos cátions de troca e estado de defloculação da argila: uma argila em que o  $\text{Na}^+$  é o cátion de troca, requer muito menos água para fluir do que uma argila em que o  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  são cátions de troca. Na argila-Ca as partículas estão fortemente aglomeradas (floculação ou coagulação) e o empacotamento é desordenado formando-se estruturas abertas com espaços preenchidos por água. Tal sistema implica uma “tensão de cedência” elevada, requerendo mais água para fluir. Pelo contrário, na argila-Na a aglomeração das partículas é fraca (defloculação, dada à elevada energia de repulsão entre elas). O empacotamento das partículas é mais denso, já que a água retida é reduzida conseqüentemente, a argila-Na requer menos água e menos tensão aplicada para fluir.

Várias são as causas dessa propriedade que consistem em um mesmo material.

1. em função da forma das partículas: quanto mais finas as partículas, resulta em mais plástico.
2. causa química: plasticidade devida a colóides acessórios. A argila por si mesma não teria muita plasticidade, são as partículas coloidais contidas em forma de alumina, sílica, colóides orgânicos, que as tornam plástica. É a plasticidade devida a fenômenos de absorção. A plasticidade varia na troca de líquidos e de pasta.

3. causa física: a plasticidade depende de fenômenos capilares e de tensão superficial. A forte tensão superficial da água prende as partículas umas nas outras. A condicionada à massa, quanto mais finamente dividida, forma meniscos de pequeníssima magnitude (0,001mm), produzindo tensões que reúnem as partículas.

#### 2.1.1.2. Aplicação e utilização dos Materiais argilosos

São vários os setores da indústria que utilizam a argila, quer como matérias-primas fundamentais, quer específica ou então como componente acessório ou alternativo, isto é, para cujo emprego não é necessário que seja especificamente uma argila, podendo outro material inorgânico ser usado para essa finalidade: agentes absorventes; aceleradores; compostos químicos de alumínio; cerâmica artística; eliminação de resíduos radioativos; agentes ligantes; blocos; tijolos; telhas; louça e vasos sanitários; azulejos; lápis colorido; catalisadores; inseticidas; discos para gravação sonora; entre outros.

O Brasil atualmente tem cerca de 120 empresas de revestimentos cerâmicos e ocupa o 4º lugar de maior produção em nível mundial. Produziu 534 milhões de m<sup>2</sup> em 2003, aumentando 5% em relação ao ano de 2002. À sua frente estão China, Espanha e Itália, seguido da Indonésia. Atualmente exporta para mais de 121 países, e em 2003, 19,3% de sua produção foi para fora de sua fronteira. O mercado interno brasileiro é o segundo maior do mundo perdendo apenas para a China. Estima-se que em 2002 esse mercado interno tenha consumido 2,54 m<sup>2</sup> por cada habitante (BOSCHI, 2004 apud MELO, 2006, p. 21).

Existem várias indústrias nacionais que utilizam argilas de diversos tipos conforme mostra a Figura 2.3.

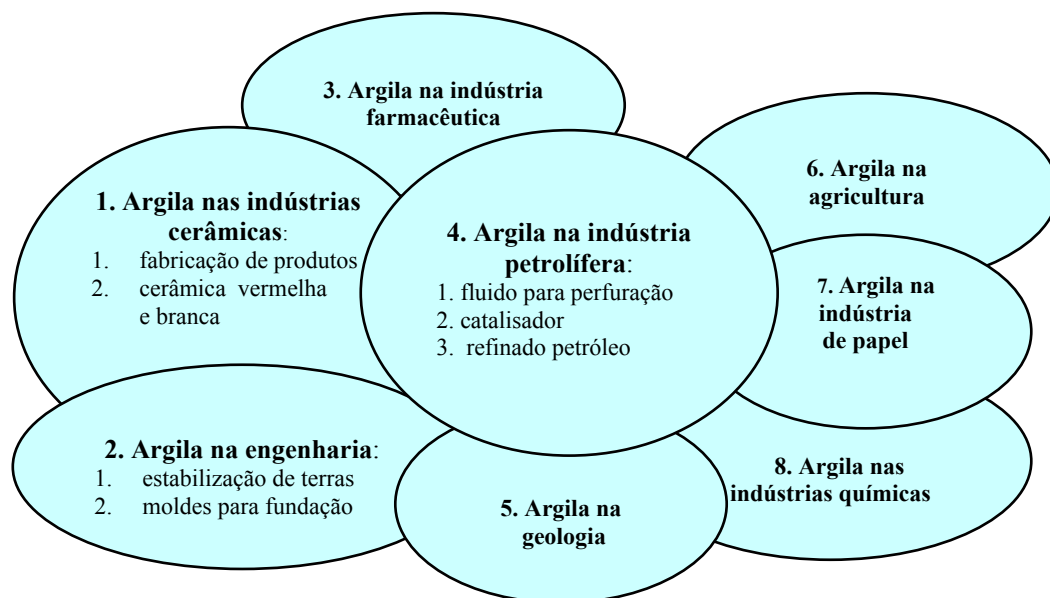


Figura 2.3: Aplicação das argilas

Os tipos de argila utilizados para cerâmica vermelha ou estrutural, são os mais ensaiados tecnologicamente no Brasil devido ao grande centro de construção civil em todo o país. São geralmente argilas recentes (quaternárias) e, às vezes, terciárias, de margens de rios, lagos ou várzeas, como também em encostas de morros, ricas em ferro e álcalis, de granulometria fina e contendo teor apreciável de matéria orgânica e plasticidade. (Norton, 1973)

A composição mineralógica dessas argilas é a de uma mistura de caulinita com ilita ou montmorilonita, sempre contendo minerais acessórios como: quartzo, mica, composto de ferro, carbonatos e outros. De modo geral as matérias-primas cerâmicas classificam-se em dois grupos: plásticos (materiais argilosos) e não plásticos (fundentes, inertes, carbonatos, talcos)(BORBA, 1996).

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos. No Brasil existem todos estes segmentos, com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção. Além disso, existem fabricantes de matérias-primas sintéticas para cerâmica (alumina calcinada, alumina eletro fundida, carbetos de silício e outras), de vidrados e corantes, gesso, equipamento e alguns produtos químicos auxiliares.

### 2.1.1.3. Tipologia das argilas do Recôncavo Baiano

Em vistas de demanda do CIA – Centro Industrial de Aratu e do COPEC – Pólo Petroquímico de Camaçari nos anos 70, a COM – Coordenação de Produção Mineral, da então Secretaria das Minas e Energia do Estado da Bahia elaborou e executou o Projeto Argila no Recôncavo Baiano (FILHO, 2001). Na década de 90 a CBPM executou outro projeto: Argilas do Recôncavo onde foram prospectados e avaliados depósitos de argilas caulínicas passíveis de utilização na indústria de revestimentos cerâmicos esmaltados, definindo o potencial da região, dando origem ao mapa geológico simplificado da bacia do Recôncavo.

Com esse estudo, em 2001 foi definido o potencial da região, entre as coordenadas 11°30'-13°00'S e 37°45'-38°45'W, com base em BARBOSA & DOMINGUEZ (1996), que apresenta a estratigrafia, da base ao topo.

→ Arqueano a Paleoproterozóico

Complexos Granulítico e Metamórfico-Migmático: ortognaisses, granitos e migmatitos

→ Jurássico

Grupo Brotas: engloba as formações Aliana e Sergi, não diferenciadas no mapa geológico:

- Formação Aliança: constituída pelos membros Boipeba (domínio arenoso) e Capaianga (domínio argiloso).
- Formação Sergi: predominância de arenitos

→ Cretáceo

Grupo Santo Amaro: constituído pelas formações Itaparica. Água Grande e Candeias, não diferenciadas no mapa geológico:

- Formação Itaparica: folhelhos, siltitos e arenitos.
- Formação Água Grande: arenitos.
- Formação Candeias: folhelhos, siltitos e lentes de arenitos.

Grupo Ilhas: constituído pelas formações Marfim, Taquipe e Pojuca, não diferenciadas no mapa geológico:

- Formação Marfim: predominam arenitos.

- Formação Taquipe: predominam folhelhos.
- Formação Pojuca: arenitos, folhelhos, siltitos e calcários intercalados.

Formação São Sebastião: predominam arenitos, com intercalações de folhelhos e argila siltítica, em três membros: Paciência (arenitos), Passagem dos Teixeiras (arenitos e argilitos multicoloridos), e Rio Joanes (arenitos e argilas silticas).

Formação Marizal: domínio de arenitos e conglomerados sobre siltitos, folhelhos e calcários.

→ Terciário

Grupo Barreiras: areias, arenitos e conglomerados pouco consolidados.

→ Quaternário

Cobertura eluvial detrítica, aluviões: areia cascalho, argila.

A estratigrafia da Bacia do Recôncavo apresentada na figura 2.4 é uma concepção de Netto & Oliveira (1985) *apud* FILHO & MÔNACO (2001).

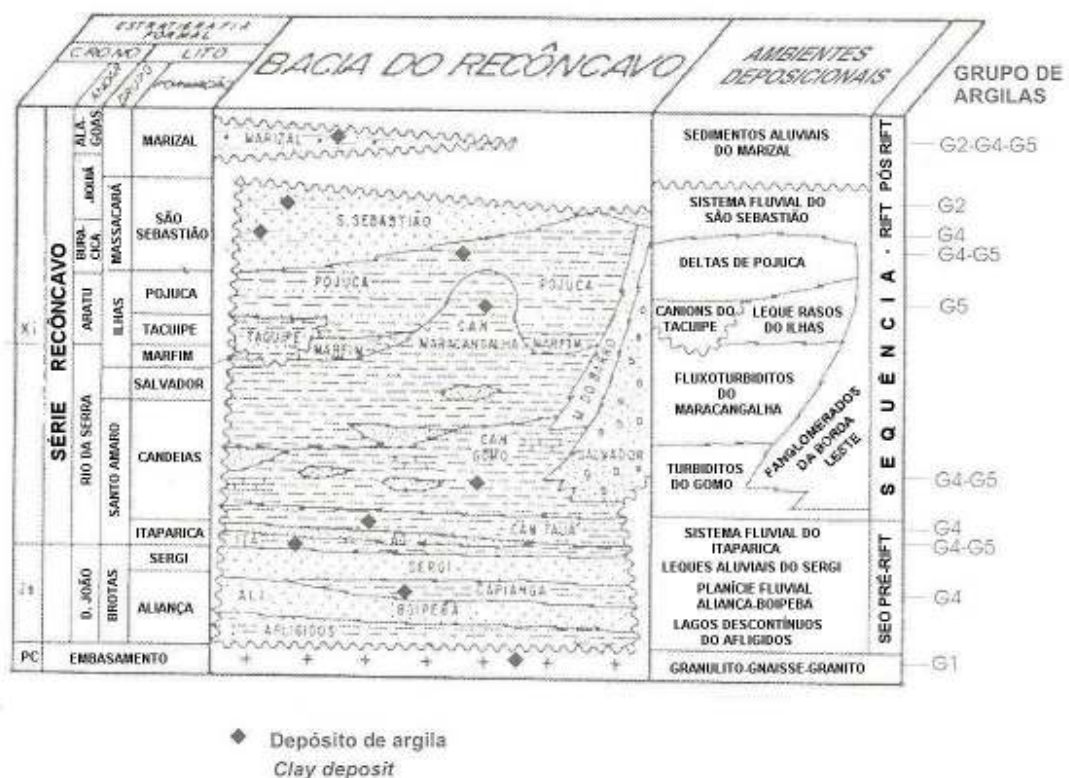


Figura 2.4: Estratigrafia da Bacia do Recôncavo (FILHO & MÔNACO, 2001)



Para evidenciar as características mecânicas e presumíveis aplicações do material, as argilas encontradas foram classificadas em seis grupos de G1 a G6, discriminadas pelas afinidades geológico-mineralógica, química e tecnológica.

Grupo G1: caulim primário – é proveniente da alteração *in situ* de leucogranitóides que fazem parte do embasamento arqueano a paleoproterozóico da Bacia do Recôncavo. Ocorre na borda leste da Bacia do Recôncavo, próximo a Sauípe. A argila G1 não foi submetida a testes tecnológicos, mas pode-se presumir que seja de queima clara, refratária e muito pouco plástica, com ampla utilização como caulim básico em produtos cerâmicos claros, cerâmica sanitária, de mesa e elétrica, revestimentos dos tipos grés e porcelanato.

Grupo G2: caulinita formacional – ocorre em camadas de argilas branca ou branco-variegada com manchas vermelhas, das formações Marizal e São Sebastião e, com menor frequência, do Grupo Barreiras. É uma argila de queima em geral clara, mas que chega a vermelha ou marrom. Apresenta plasticidade média a baixa nas amostras com maior proporção de areia, e é de natureza refratária. Os tipos mais claros têm aplicações idênticas às das argilas do grupo G1, mas com a vantagem de serem mais plásticos, com maior proporção de sílica livre.

Grupo G3: caulinita plástica de várzea – ocorre nas várzeas de rios, como o Sauípe, Encantado, Branco e Preto, na região entre Alagoinhas e Entre Rios. Tem uma superfície escura, devido à incidência de matéria orgânica. Sua cor de queima dominante varia de bege a amarelo-clara, com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , em torno de 1,1%. Sua plasticidade é relativamente alta para caulinita, e deve-se à granulometria abaixo do esperado, propriedade que gera boa conformação e resistência a seco das peças cerâmicas, com baixa retração à secagem.

- Grupo G4: ilita formacional fundentes – é de ampla distribuição na Bacia do Recôncavo, em camadas das formações Marizal, São Sebastião, Ilhas, Candeias, Itaparica e Aliança, numa faixa que se estende de Alagoinhas a Santo Amaro. Varia de verde a avermelhada, como cor de queima vermelha a marrom-escuro. As argilas deste tipo têm uma nítida característica fundente, além de plasticidade relativamente alta. Apresenta boa conformação, boa resistência mecânica a seco e, após queima, a 1.200°C – baixa absorção de água.
- Grupo G5: ilita-esmectita formacional plástica – ocorre em camadas das formações Candeias, Ilhas e Marizal. Tem a coloração esverdeada, com manchas avermelhadas. A cor de queima varia de vermelha a marrom-escuro. É também fundente, mas distingue-se das argilas do grupo G4 pelos altos valores de MgO+CaO, devido à presença de esmectita, que impõe uma elevada plasticidade às argilas do grupo 5. Essas argilas são de ótima moldagem, boa resistência mecânica a seco, e, após queima, apresentam alguma retração à secagem, e absorção de água. Mesmo com boas características fundentes e plásticas, têm o seu uso limitado em massas cerâmicas, devido aos altos teores de MgO, responsáveis pelo fenômeno de eflorescência.
- Grupo G6: argila mista de várzea – encontrada em abundância principalmente nas várzeas dos rios Joanes, Pojuca e seus afluentes, na região de São Sebastião do Passe, Mata de São João, Pojuca e com pequena parte em Candeias. Tem coloração avermelhada *in natura* e marrom-escuro após queima. É uma argila misturada, com cerca de 40% de caulinita e 40% de ilita. O restante é constituído por areia e hidróxidos de ferro. É plástica e fundente o suficiente para ser utilizada com frequência, sem outras misturas na fabricação de blocos, telhas e outras peças de queima avermelhada. Pode ser utilizada ainda na composição de massa de revestimentos semiporosos e alguns revestimentos do tipo grés, menos restritivos à queima vermelha.

### 2.1.2. Rejeitos cerâmicos (resíduos)

O homem, ao longo de sua existência, sempre utilizou os recursos naturais do planeta e gerou resíduos com pouca preocupação quanto ao futuro, já que os recursos eram abundantes e por sua vez a mãe-natureza aceitava de forma passiva os despejos realizados.

Nas últimas décadas as indústrias têm se deparado com a necessidade de introduzir em seus projetos considerações ecológicas que estejam em conformidade com as normas de proteção ao meio ambiente, objetivando a redução significativa de volume de rejeitos industriais com o reaproveitamento destes para a produção de materiais com aplicação comercial.

Os rejeitos cerâmicos são entendidos como sendo um pó fino proveniente da trituração de blocos, tijolos e telhas cerâmicas descartadas. Origina-se de uma argila ou misturas de argilas que foram extrudadas na forma de blocos (briquetes), secas e depois queimadas em alta temperatura, mas que por algum problema de processo, esse produto resultante é descartado e não comercializado. A queima pode ser feita em fornos contínuos tipo túneis, verticais, rotativos ou em fornos intermitentes do tipo de chama invertida, com objetivo de reduzir a porosidade do corpo aumentando a sua densidade, tornando o material estável. Depois de calcinados, os descartados são britados, moídos e classificados de acordo com o uso que terão. Também podemos obter rejeitos cerâmicos de tijolos refratários usados, mas, neste caso deve-se tomar muito cuidado com mistura de vários tipos de tijolos e também com contaminações que podem ser prejudiciais no uso. Convém primeiro separar os tipos de refratário (sílica, alumina, zircônia, básicos e outros). Quando adiciona-se rejeitos cerâmicos a uma massa cerâmica, precisa-se de uma maior quantidade de água para torna-la plástica, pois ele, ao contrário das argilas, não absorve água. A retração de secagem será menor, bem como a retração de queima; a resistência mecânica da peça crua diminui, mas, a resistência mecânica da peça queimada aumenta. (referências que comprovam isto). A refratariedade (resistência à temperatura) das massas com rejeitos também é maior.

A quantidade de rejeitos que pode ser introduzida numa massa cerâmica depende muito do tipo de uso que ela vai ter e, principalmente, do método de conformação que vai ser usado. Normalmente, quando a massa vai ser usada em torno, essa porcentagem não deve ser maior do que 30%, isso utilizando-se rejeitos cerâmicos moídos finos.

A utilização dos rejeitos cerâmicos em cerâmica vermelha pode ter reflexos positivos sobre todo o processo produtivo, pois por apresentar uma granulometria mais grosseira do que a

argila poderá melhorar o grau de empacotamento, além, devido à morfologia das partículas, de contribuir significativamente para facilitar a etapa de secagem.

Durante a queima, até temperaturas não superiores ao seu processamento, o deverá se comportar como material inerte. Já a sua utilização em temperaturas de queima superiores à qual foi obtido, possibilitará o desenvolvimento de reações de sinterização. Neste caso, a menor perda de massa dos rejeitos cerâmicos em comparação com as argilas também pode contribuir para uma redução de porosidade do produto final.

Para a confecção de placas, esculturas e outras peças moldadas manualmente, essa quantidade pode ser um pouco maior. Pode-se também usar rejeitos cerâmicos para dar textura às peças, usando para isso cores diferentes e granulometrias variadas.

## **2.2 Processamento cerâmico**

Toda extração começa pela legalização da jazida no Dep. Nacional de Produção Mineral – (DNPM), o qual exige o projeto do uso racional do subsolo, e o IBAMA que exige o projeto de recuperação do solo.

É altamente estratégico para o empresário pesquisar sua vizinhança: mapa geológico e cerâmico de 10 x 10 km em volta da fábrica; isso é de grande importância para a prosperidade industrial. O transporte de matérias-primas além de 10km torna-se inviável em muitas regiões.

A parte muitas vezes menos dominada do processo de fabricação é a metodologia do gerenciamento da variação das jazidas. O trabalho metódico com a matéria-prima é importante para o sucesso comercial da empresa. Exigir qualidade dos produtos finais é mais do que certo, o controle das matérias-primas é fundamental para isso, pois, na hora que aprova-se a massa dosada, estamos no início de uma fabricação tranquila.

### **2.2.1 Processo Produtivo da Indústria**

A expansão da indústria cerâmica na Bahia, na região do Recôncavo, está voltada para a produção da cerâmica vermelha, e de revestimentos, o que é justificável pelas reservas e por fatores e condições de infra-estruturas favoráveis. Reservas da ordem, como dito anteriormente, de 188 milhões de toneladas de argilas de tipologias diversas, conforme tabela 2.5.

Tabela 2.5: Reservas das argilas do Recôncavo (Moreira &amp; Conceição Filho, 2001)

<b>Tipo ou grupo de argilas</b>	<b>Localização</b>	<b>Reserva (milhões t)</b>
G1 (caulim primário)	Entre Rios/Sauípe	3,50
	<b>Subtotal 1</b>	<b>3,50</b>
G2 (caulinita formacional)	Tabuleiro (S. J. do Avena, Itanagra)	4,78
	Faz. Mucugê (S. J. Avena, Itanagra)	3,04
	<b>Subtotal 2</b>	<b>7,82</b>
G3 (caulinita plástica de várzea)	Baixa Grande (Inhambupe)	13,40
	Rio Sauípe (Entre Rios)	3,19
	Riacho Encantado (Alagoinhas)	1,26
	Rios Preto e Branco (Alagoinhas)	2,65
	Rio Aramari (Alagoinhas)	0,52
	<b>Subtotal 3</b>	<b>21,02</b>
G4 (ilita formacional fundente)	Encantado (Alagoinhas)	13,80
	São Sebastião do Passé	69,00
	<b>Subtotal 4</b>	<b>82,80</b>
G5 (argilas formacionais fundentes e plásticas)	_____	<b>Não avaliada</b>
G6 (argilas mistas de várzea)	São Sebastião do Passé inclusive Candeias e Simões Filho	73,00
	<b>Subtotal 5</b>	<b>73,00</b>
<b>Argilas do Recôncavo</b>	<b>Total</b>	<b>188,14</b>

Alguns fatores e condições de infra-estrutura favoráveis estão listados a seguir:

- diversificação e alta qualidade da matéria-prima para os vários segmentos industriais;
- nas adjacências da RMS a Bacia do Recôncavo tem cerca de 100 quilômetros de largura E-W por cerca de 150 quilômetros de extensão N-S. É grande a disponibilidade de áreas livres a serem pesquisadas ou exploradas, todas com boa gama de informações geológicas;
- mercado regional em expansão;
- facilidade de comunicação e boa infra-estrutura ferroviária, rodoviária e portuária, de modo a facilitar a exportação;
- facilidade de aquisição de terrenos para áreas de pesquisa e implantação de unidades fabris;
- incentivos do estado e dos municípios para esta atividade;
- mão-de-obra qualificada, parte da qual advém do setor de serviços prestados a distritos industriais, além de uma gama de instituições de ensino e capacitação tecnológica de níveis médio e superior tanto em Salvador como em diversos municípios vizinhos;

- outros insumos e acessórios são encontrados com facilidade nos municípios da região, a exemplo de material de embalagem e consumo, além de plena condição para manutenção de equipamentos mecânicos e elétricos.

O processo de fabricação de blocos cerâmicos da região é similar às demais indústrias desse segmento. É constituído por um caixão alimentador com destorroador seguido de um misturador, laminador, extrusão através da maromba e em seguida cortadeira, saindo para secagem e posteriormente queima conforme mostra a figura 2.5.

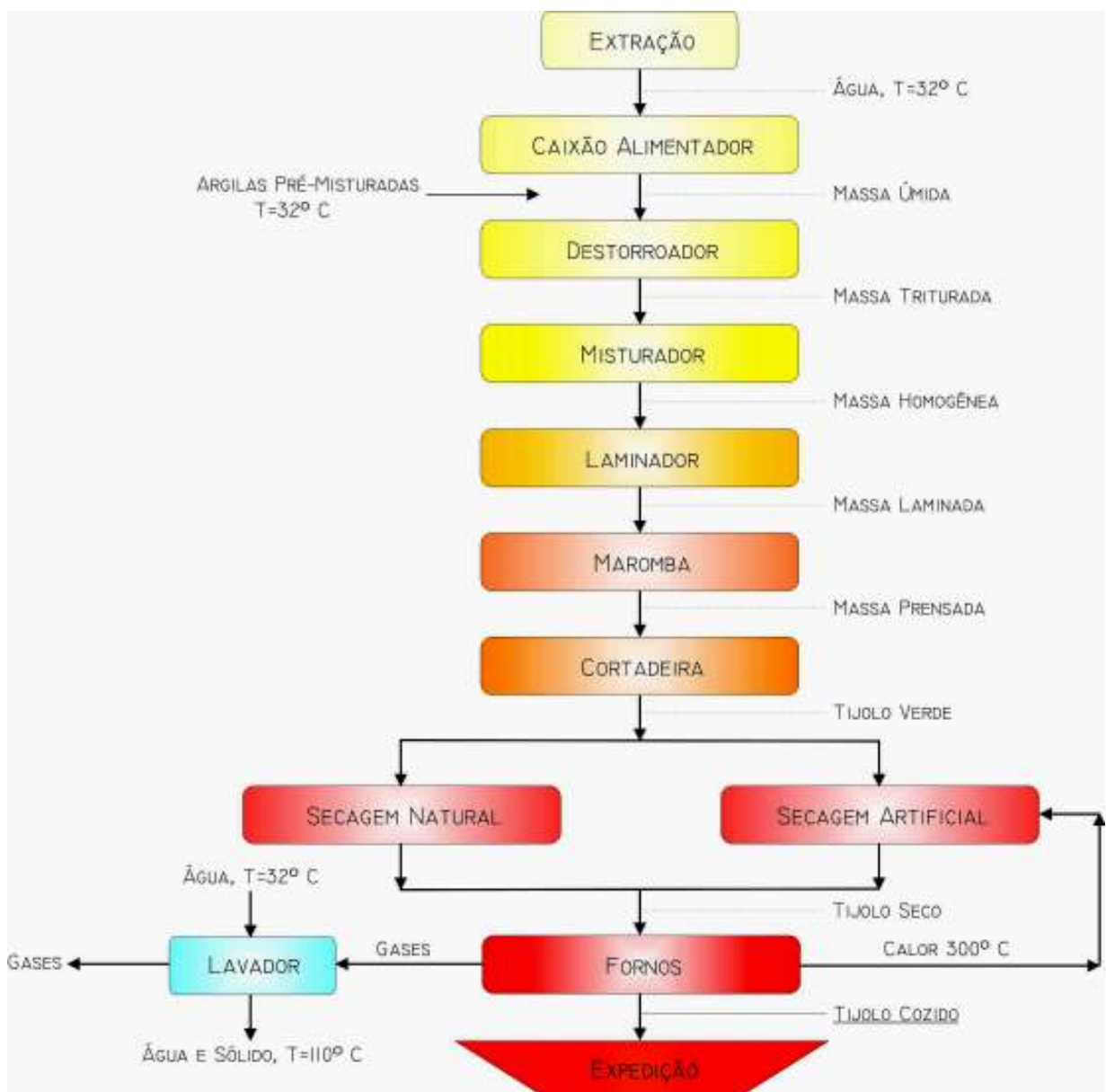


Figura 2.5: Fluxograma do processo de cerâmica vermelha

### 2.2.1.1. Extração

A extração é feita em jazida situada a aprox. 1 km das fábricas, através de máquinas tipo pá-carregadeira, sendo mais freqüente o uso de retro-escavadeira em função da utilização do incremento escavação, que são utilizadas para extrair caçambadas (volumes) com o auxílio de trator de esteira para formar camadas horizontais a fim de diminuir variação. Com o intuito de diminuir custos, certas indústrias, mantêm apenas a pá para desenvolver os dois processos (extrair e formar camadas) apesar de menor produtividade no segundo processo face à falta de uma lâmina de esteira. A figura 2.6, mostra uma jazida de argila, onde ocorre o processo de extração.



Figura 2.6: Jazida de argila (processo de extração)

As matérias-primas são levadas para a fábrica para moagem e dosagem (mistura) – após descanso vai para o caixão alimentador. O descanso é de 3 (três) a 15 (quinze) dias nos silos de hidratação. A maior parte das unidades industriais que trabalha com laminador adiciona água, segundos antes da entrada na maromba., para que fique uniformemente distribuída. Para o processo de laminação, o sazonalamento é lento, sendo que a rusticidade da argila in natura não se transforma em massa de modelar em menos de 15 (quinze) dias.

Existem duas grandes maneiras de compor a massa, que são:

- as massas predominantes em argilas laminadas;
- as massas predominantes em pós moídos ligados por argilas.

As matérias-primas plásticas são adequadas para laminar. Os não-plásticos são adequados para moer e aumentar a resistência do material queimado. Existem excelentes não-plásticos fundentes. Quanto à uniformidade, moer é melhor que laminar.

Existem três alternativas de projetos:

1. produtos laminados;
2. produtos preparados por moagem parcial;
3. produtos preparados por moagem total.
  - Alternativa – 1: preparação exclusivamente com laminadores e sem moagem
  - Alternativa – 2: preparação com uma parte magra moída em moinhos que só toleram 6% de umidade. Depois os plásticos são incorporados via laminador.
  - Alternativa – 3: preparação integral por moagem. Moendo a massa total (argilas e magros) em moinhos que toleram 12% de umidade

As três alternativas têm como resultado produtos bastante diferentes.

Todas as massas são compostas com múltiplas matérias-primas individuais. As argilas entram na fábrica com umidade entre 15% e 30%. Os magros entram com menos umidade, entre 5% a 15%. O teor de água das matérias-primas afeta o projeto da fábrica. Na alternativa 1, plásticos e magros entram “in natura”. Na alternativa 2, os não plásticos entram moídos. Os plásticos entram in natura. Na alternativa 3, a massa integral é moída, magros e argilas juntos.

Na alternativa 1, (a laminação), as massa são feitas com matérias-prima in natura. Argilas e magros em estado natural são compostos entre si, todos dosados por volume e preparados por laminador.

Na alternativa 2, os materiais não plásticos são moídos em moinhos via seca não aquecidos que só aceitam 6% de umidade. Para esse tipo de moinho é fatal ultrapassar os 6% de água. A moagem seca convencional opera com grandes tropeços. Por isso, nesta alternativa as argilas não podem ser moídas. A massa integral precisa passar por laminador, mesmo que uma parte tenha sido moída.

A massa composta de pós moídos e argilas não moídas passa por laminador, sem grandes baterias de laminadores.



Na alternativa 3 é feita a moagem integral da massa (as argilas junto com os não plásticos). A massa total é moída em moinhos aquecidos que toleram 12% - 14% de água hidratada em contínuo com sensores a montante da maromba, e não se utiliza laminadores.

Estas três alternativas influenciam profundamente o projeto.

Alternativa 1, convencional: Preparação úmida via laminador, usando matérias-primas in natura

As massas somente de argila são utilizadas para produzir produtos simples, que “toleram” partículas de 1 a 3 mm. A aparente vantagem da “massa com produtos in natura” é sua preparação simples. Preparar argilas sem moer significa sazonar, desintegrar, destorrar, ajustar água, misturar e laminar os pedriscos. Blocos com tabiques internos de 6 mm não aceitam pedriscos com tamanho acima de 1/3 do tabique. Pedriscos dentro dos tabiques geram trincas nos blocos. Pedriscos geram defeitos na face das telhas. Raízes geram trincas repetitivas nos blocos. Argilas plásticas podem ser processadas em grandes volumes utilizando a preparação “convencional” para produtos sem muito valor agregado. Uma disposição de máquinas mais ou menos como segue na figura 2.7.

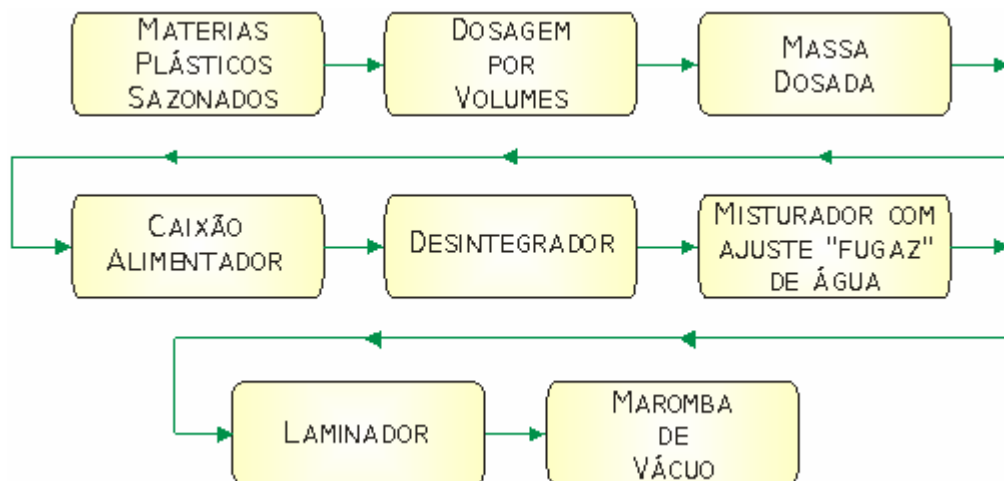


Figura 2.7: Fluxograma tradicional da disposição de máquinas

Quando temos um único misturador e um único laminador, temos o projeto de preparação rudimentar. O uso de argilas plásticas é muito comum. Tão comum que às vezes a cerâmica vermelha é denominada “cerâmica de argila”, como se toda cerâmica vermelha fosse feita de argila.

#### 2.2.1.2. Desintegrador

As argilas vêm do caixão alimentador em torrões de 20 a 30 cm. Passam pelo desintegrador, que desmancha os torrões grandes. Seu trabalho está longe de ser perfeito. Para atingir a uniformidade, precisa destorroar múltiplas vezes.

#### 2.2.1.3. Misturador Hidratador Fugaz

No misturador, facas intercaladas que giram em sentidos opostos cortam e desmancham os torrões já menores de 30cm. Na saída de um misturador, temos torrões de 2 a 5cm e uma mistura, na melhor das hipóteses, de cor uniforme. Caso a cor não seja uniforme, o produto apresentará retrações e absorções diferentes ponto a ponto (deformações).

A hidratação feita no misturador é fugaz. Em segundos, passamos do misturador ao laminador e à maromba. Com um sistema desse tipo é indispensável sazonalidade prévia durante semanas. Lote a lote o teor de água precisa ser controlado, levado até o valor desejado, aprovado, liberado.

A operação de destorroar e laminar em operações sucessivas é o desafio da qualidade de uma preparação de massa sem moagem. É fundamental chegar na maromba com uma composição química uniforme em todos os pontos do produto. Algumas empresas dão pouca importância à operação de “destorroar sucessivas vezes até a cor uniforme”. Estas empresas poderiam estar produzindo um produto que contém concentrações pontuais das matérias-primas individuais sobre a sua superfície (deformações).

#### 2.2.1.4. Laminadores

O objetivo dos laminadores é esmiuçar e desagregar os pedriscos e os torrões. Normalmente, se usam dois ou três. Cada laminador é composto de dois cilindros que se aproximam até uma distância precisa e controlada. Os pedriscos contidos na argila causam desgaste dos cilindros. A maior alimentação no centro da esteira causa desgaste na metade do cilindro. Para reduzir essa tendência, usa-se uma faca niveladora na esteira distribuindo a matérias-prima ao longo do cilindro. Deve-se utilizar quase toda a largura da esteira, evitando um número maior de retífica.

#### 2.2.1.5. Misturadores e laminadores múltiplos

Para produtos sem deformações internas é indispensável que a composição química seja uniforme na peça toda. Portanto, é importante misturar duas vezes e laminar múltipla vezes. Uma preparação bem projetada deve prever o espaço para esses misturadores e laminadores adicionais. Um mistura em múltiplas etapas caprichosamente executadas apresenta um valor inestimável para a “estabilidade da qualidade” de um produto laminado. É necessário conter e prever espaço para mais misturadores e laminadores. Na figura 2.8, têm-se a vista do laminador.



Figura 2.8: Vista do laminador

#### 2.2.1.6. Ajuste de água na extrusão

O grande objetivo: manter o teor de água constante

Uma das operações mais importantes que se efetua na unidade industrial é o ajuste do teor de água. No processo tradicional, fala-se da torneirinha, chuveirinho ou dispositivo pingador que se utiliza para acrescentar uma pequena quantidade de água, além da água já presente na massa sazoadada. Esta já deve (ou deveria) estar próxima do valor desejado. A finalidade deste ajuste (abrir e fechar a torneira) é manter o teor de água num valor constante. É grande a importância para a estabilidade dos tamanhos. Entretanto, na prática, a torneira do chuveirinho se abre ou se fecha de maneira mais ou menos “aleatória”. O ajuste é feito sem o devido controle.. Na figura 2.9 têm-se a vista do processo de extrusão e corte.



Figura 2.9: Vista do processo de extrusão (maromba)

As dimensões precisas de um bloco dependem da retração baixa. A retração de secagem baixa depende do teor de água baixo e do teor de argilito, piçarra ou folheado elevado. A retração de secagem é maior que a retração de queima. Portanto, o efeito da variação de água sobre a dimensão pode ser maior que o efeito da variação de temperatura do forno. A estabilidade do teor de água na extrusão é um dos objetivos mais importantes da unidade industrial como um todo.

É fundamental manter sempre constante o teor de água, faça chuva ou faça sol. No caso da preparação via laminador, galpão coberto durante a temporada das chuvas e chuveiro-regador durante a estiagem.

Existe ajuste prévio e ajuste final. O ajuste prévio é sazonal e existem duas maneiras de providenciar o ajuste final da água na extrusão: ajuste manual e ajuste automático.

- Ajuste Manual do teor de água na extrusão via laminador: É conduzido mantendo constante a amperagem da maromba e o durômetro, no valor desejado que corresponde ao teor de água otimizado desejado. Uma vez por turno medimos com balança o teor de água num pedacinho de massa. Verificamos a equivalência entre  $H_2O$  e amperagem.
- Ajuste Automático do teor de água na extrusão via laminador: Existem dispositivos operados por computador que medem a resistência elétrica ou a capacidade elétrica da massa. O computador abre ou fecha o dispositivo de ajuste de água.

### 2.2.1.7. Queima

A queima é uma das etapas mais importante na fabricação dos materiais cerâmicos, cujo objetivo é a ocorrência das reações e as transformações químicas e físicas dos componentes da massa, de maneira a conferir ao corpo cerâmico as propriedades necessárias à sua utilização.

Segundo SANTOS (2003), a queima dos corpos cerâmicos à base de argila processa-se normalmente entre 850°C e 1450°C, dependendo do teor de argilominerais existente na sua composição. Após esse processo, o corpo cerâmico adquire uma elevada resistência mecânica, acompanhada pela perda total de plasticidade.

Durante a queima ocorre transformações estruturais na argila, onde cada produto tem uma marcha de aquecimento e resfriamento. A queima pode ser dividida em três estágios: desidratação; oxidação e vitrificação.

Na desidratação a água contida nos poros é evaporada, com conseqüente queima de parte do carbono. A velocidade deste processo depende da quantidade de água, porosidade e textura da argila, mas, deve se levar em conta que um rápido aquecimento causa defeitos no material. Este período é completo para uma temperatura em torno de 700° C. O segundo período se completa aos 900° C, onde o material combustível é consumido, o carvão e enxofre são eliminados e o óxido ferroso se oxida a óxido férrico. A vitrificação (fechamento dos poros da argila pela queima) não ocorre nos tijolos comuns, mas a temperatura é elevada até o início da mesma (SANTOS, 1989).

Nesse item será abordado a queima, as transformações que nela ocorrem, os princípios básicos de funcionamento dos fornos contínuos e descontínuos, a condução de queima e perda de temperatura.

#### a. Transformações físicas e químicas durante a queima

Para conduzir a queima é fundamental visualizar o que nela acontece. O ATD, ensaio de análise térmica diferencial mostra as temperaturas em que ocorrem as decomposições da argila e dos elementos.

Os seguintes processos ocorrem numa seqüência de temperatura constante:

- saída da umidade residual;
- decomposição das argilas: passagem de cru a queimado inicial;

- variação brusca de tamanho na temperatura do choque térmico;
- decomposição dos carbonatos liberando cal viva que fica sem reagir;
- sinterização das partículas cristalinas soltas;
- volatilização dos sais e incorporação;
- reorganização das estruturas cristalinas;
- sinterização avançada.

Existem dois tipos de água:

- a água da umidade que sai por volta de 100°C e;
- a água interna do cristal da argila crua que sai entre 550 e 600°C.

Durante a saída da água de umidade o forno funciona como um secador. É importante assimilar este fato, pois se a umidade residual do secador for elevada (se estiver acima de 3%), perde-se resistência mecânica em verde e ainda tem-se que atrasar a queima para não estourar as peças.

Passagem da plasticidade crua para a não plasticidade do material queimado. A 500°C ainda existem moléculas de água dentro do cristal de argila. A água interna do cristal não pode ser expulsa a 100°C. A argila estará crua enquanto ainda possuir suas moléculas de “água cristalina”. No momento exato em que perder essa água de constituição as propriedades argilosas serão perdidas de modo irreversível. Entre 550 e 650°C acontece a passagem de cru para queimado. Fica registrada como uma absorção de calor (um pico para baixo no ensaio de ATD). Pode-se imaginar essa passagem como se fosse “uma implosão interna da estrutura”, digamos assim. O material queimado na “queima inicial” (600-700°C) é mais fraco do que o material cru do qual provém, e o material cru não esfarela. O material queimado a 550°C esfarela. O material nesta situação se encontra vulnerável contra variações bruscas de tamanho. Infelizmente, caso a areia de quartzo estiver presente, provocará realmente variações bruscas de tamanho.

De 1000°C em diante os cristais se reorganizam em novas estruturas cristalinas. O ensaio de carga acusa o aumento de resistência mecânica. A queda da absorção d'água evidencia o preenchimento dos poros da figura 2.10 com mais soldas vítreas.

A queima desenvolve uma malha de “soldas vítreas” entre as partículas cristalinas. As partículas deixam de estar soltas. A sinterização aumenta com a temperatura e com o tempo de permanência na temperatura máxima.

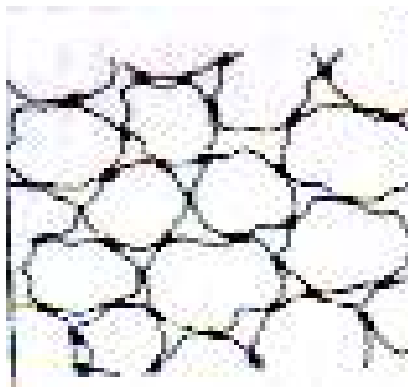


Figura 2.10: Sinterização (GIARDULO, 2005)

Pode-se destacar dois processos de sinterização de acordo com suas fases envolvidas: a sinterização por fase sólida ou convencional e a sinterização por fase líquida.

A sinterização sólida segundo KINGERY, 1960 *apud* SANTOS, 2003, pode ser dividida em três estágios, que são:

- i. estágio inicial, caracterizado pela formação de contatos interpartículas, desde a compactação seguida pela formação e crescimento de pescoços, até o ponto onde eles começam a se interferir;
- ii. estágio intermediário, caracterizado pela densificação do compacto e pelo decréscimo dos diâmetros dos poros interligados;
- iii. estágio final, caracterizado pelo isolamento e eliminação gradual da porosidade.

Na sinterização sólida ou convencional o transporte de matéria prima ocorre através do mecanismo de difusão atômica através da rede, da superfície do contorno do grão.

Na sinterização por fase líquida, é necessário que a fase seja distribuída de forma homogênea no sistema para se evitar taxa de densificação diferenciada dos corpos sinterizados. O líquido aproxima as partículas, sendo que, partículas angulares podem rotacionar permitindo seu deslizamento e arranjo espacial para uma configuração mais empacotada. Além disso, é

importante notar que o sólido deve apresentar boa solubilidade no líquido bem como o líquido deve ter alta difusividade ( KINGERY, 1960 *apud* SANTOS, 2003).

Quando a fase líquida molha as partículas sólidas, cada espaço entre ela sofre pressão capilar devido ao líquido existente entre as partículas. A densificação é uma consequência da pressão capilar através de diferentes processos que ocorrem ao mesmo tempo durante a sinterização. Com a formação dessa fase líquida, acontece uma reorganização das partículas para a formação do pescoço mais eficaz. Este processo pode conduzir uma completa densificação se o volume do líquido presente for suficiente para ocupar completamente o interstícios.

#### b. Temperaturas de queima

O grês e a porcelana são os que alcançam maior temperatura. O grês chega aos 3% de absorção d'água, enquanto que o grês porcelânico chega a menos de 0,1%. As indústrias cerâmicas de extrusão produzem grês, no caso das placas gêmeas extrudadas, e das telhas resistentes ao gelo para exportação. A seguir, têm-se a tabela 2.6 com as temperaturas típicas de queima.

Tabela 2.6: Temperaturas típicas de queima

(GIARDULO, 2005)

TEMPERATURA TÍPICA	MATERIAL/PRODUTO
600°C	Tijolos de olaria, esfarelados com sonoridade baixa
700°C	Terracota artística de artesanato
900 a 1000°C	Indústria cerâmica da extrusão em massa vermelha
1110 a 1120°C	Revestimento Poroso, 10 a 18% de absorção d'água
1140°C	Revestimento de Gres vermelho de 3% de absorção
1160°C	Revestimento cerâmico de Gres claro de 3% de absorção
1200 a 1250°C	Porcelana branca de mesa, torneada, colada ou injetada
1200 a 1250°C	Gres Porcelânico em prensas hidráulicas
1300 a 1400°C	Refratários aluminosos para altas temperaturas



### c. Fornos

Para a queima, são utilizados vários tipos de fornos, que podem ser classificados em descontínuos ou intermitentes e contínuos. Em geral, os fornos apresentam três estágios de operacionalidade: preaquecimento, queima e resfriamento.

Os fornos descontínuos são fornos de câmaras, individuais e em bateria, nos quais os produtos, a instalação para queima e de resfriamento ficam em posição fixa durante a totalidade do ciclo. O calor é gerado fora do forno e circula pelo interior, através das pilhas de material cerâmico, até a chaminé. Na maioria das vezes, o material não é queimado uniformemente, havendo até necessidade de desprezar algumas peças por falta ou excesso de queima. A boa queima do material depende da habilidade e condução do foguista, a temperatura de chaminé é maior que nos fornos contínuos e o consumo Kcal/Kg é elevado comparado com os fornos contínuos.

Tipos de fornos descontínuos:

- Fornos de parede portante: é o caso mais comum, é o chamado forno garrafão. Possui paredes maciças pesadas, portantes, com consumo elevado devido a massa das paredes portantes e precisam ser aquecidas de novo a cada queima. Elevado consumo Kcal/Kg, porém como combustível utilizado é lenha ou serragem torna-se econômico.
- Fornos sobre Rodas: é uma caixa metálica retangular apoiada sobre rodas, seu consumo é de 30 a 40 % mais baixo que o forno garrafão. Esse forno se movimenta entre dois crivos e quando se completa a queima o forno abandona um crivo.

Devido ao elevado consumo de calor requerido, para aquecer as paredes a cada queima, os modernos fornos descontínuos já não são construídos com paredes portantes pesadas.

Um forno construído com grandes massas de tijolos apresenta muita inércia térmica, isso significa que consome muitas calorias para aquecer e demora muito tempo para resfriar. A baixa inércia térmica é boa para um forno contínuo e indispensável para o funcionamento de um descontínuo.

Os fornos contínuos consistem, essencialmente, em séries de câmaras, de modo que quando uma câmara está em fogo, os gases da combustão são levados a atravessar todas as outras antes de chegarem à chaminé, havendo assim um pré-aquecimento, e conseqüente economia de combustível. Numa operação, apenas uma câmara ficara de fora para ser carregada. Os fornos contínuos podem ser do tipo: Hoffmann, túnel ou rolos.

No tipo Hoffmann, o material se mantém fixo e o fogo é móvel. O combustível utilizado é lenha, carvão, serragem, entre outros.. A combustão é realizada pelo ar quente que vem das câmaras, que por sua vez, estão em resfriamento.

Este tipo de forno tem vantagens, porque ao mesmo tempo em que ocorre a queima, verifica-se a enfora e desenfora do material e por outro lado, os gases da combustão realizam o preaquecimento do material a queimar. Outra vantagem é a recuperação de calor das câmaras que estão em resfriamento, para a zona de queima ou ainda, direto para a secagem dos produtos nos secadores. Referindo-se à altura da carga, esta não deve ser muito além de 1,5 m, pois dificulta o arranjo pelos operadores, uma vez que, esse deve possibilitar a movimentação dos gases em direção à chaminé, de tal maneira que o calor se distribua tanto na parte superior, como na inferior.

O forno tipo túnel de chama livre é constituído por uma longa galeria retilínea, com altura relativamente pequena, comparada com o comprimento, que pode chegar até 1,40 m.

Nestes fornos o material é que se movimenta, enquanto o fogo fica fixo. O material a queimar é colocado sobre vagonetas, que percorrem lentamente a galeria, de uma extremidade à outra, sobre trilhos, empurradas com velocidade contínua, por um pistão hidráulico, colocado na extremidade da entrada. Em intervalos regulares, uma vagoneta é introduzida na galeria e, na extremidade oposta outra é tirada. A velocidade das vagonetas é contínua e uniforme com relação ao tempo, salvo o tempo para retorno do propulsor que é aproveitado para se introduzir outro carro no forno. São fornos de baixo consumo K cal/Kg de produto, são baixos e largos com queimadores de teto, podendo ser construídos aos poucos em módulos. Seu controle é feito por aparelhos e dispositivos como: termopar; termômetro; cone pirométrico; e outros.

Os fornos de rolos são construídos por um tapete de rolos giratórios, possui baixo consumo de Kcal/Kg de produto e necessita de rolos especiais de silimanita (são fornos caros).

As figuras 2.11 e 2.12 mostram fornos tipo contínuo.



Figura 2.11 Forno tipo contínuo em fase de construção

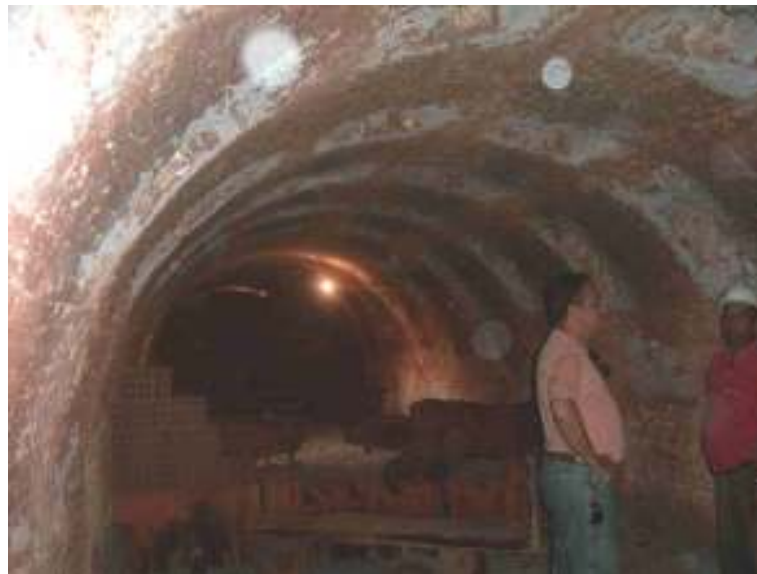


Figura 2.12: Interior do forno contínuo tipo Hoffman

O sistema de carga decorre do tipo de forno adotado. Será uma pilha com muitas camadas no caso de um forno descontínuo. Será um modelo padrão de vagoneta com gabarito no caso de um forno túnel. Serão peças entrando e saindo em ciclo rápido sobre um tapete de rolo no caso de um forno de rolos.

O forno contínuo opera com um diagrama térmico, o que possui 3 trechos bem distintos:

- a) subida ao pré-aquecimento;
- b) patamar ou manutenção de temperatura;

c) descida ou resfriamento;

Quando existem trincas de pré-aquecimento, necessita-se de um patamar de 560° C na subida. A temperatura de queima se mantém durante um número de horas que significa alta qualidade de queima.

A queima em descontínuo imita aproximadamente a forma de queima em contínuo, na subida, na queima e na passagem pela temperatura de 560° C. Na tabela 2.7 têm-se um quadro comparativo dos consumos e tempo de queima, em função do tipo de forno.

Tabela 2.7: Quadro comparativo dos consumos e tempo de queima (GIARDULO, 2005)

<b>TIPO DE FORNO</b>	<b>CONSUMO TÍPICO</b>	<b>TEMPO</b>
Forno Garrafão (descontínuo)	800 a 1000 kcal/kg	5 – 7 dias
Forno Descontínuo Leve	500 a 600 kcal/kg	4 – 5 dias
Forno Túnel (contínuo)	300 a 550 kcal/kg	24 – 30 horas
Forno de rolos (contínuo)	200 a 250 kcal/kg	35 – 50 minutos

## 2.3 Ensaio Tecnológicos

Caracterizar uma argila visando o seu uso tecnológico é conhecer a variedade de suas propriedades, o que não é um problema simples, pois necessita não só do emprego de técnicas comuns como as de mensurar as propriedades físico-químicas, como também de técnicas trabalhosas como a análise química, e sofisticadas como as de microscopia eletrônica de varredura que visa a determinação da textura de agregados naturais dos argilominerais.

Após o preparo da amostra, deve-se tomar o cuidado em todas as etapas, principalmente com a secagem.

### 2.3.1. Análise química

Segundo GOMES (1986), referindo-se aos dados da análise química:

*“Estes dados e interpretações por si, podem ser insuficientes se as características cristal químicas das espécies minerais presentes, bem como as suas quantidades relativas, não forem conhecidas. Por tal motivo, os resultados das análises químicas devem ser analisados em paralelo com os resultados provenientes da aplicação de outras técnicas tais como: difração de raio X, análises térmicas, microscopia óptica e eletrônica, análises espectroscópicas, etc.”*

Para essa forma de análise, são utilizados dois tipos: a análise racional e a análise clássica.

#### 2.3.1.1. Análise racional

Além dos argilominerais, uma argila geralmente pode conter impurezas: quartzo, feldspato, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, matéria orgânica e compostos químicos não-cristalinos ou amorfos, sendo de grande importância conhecer as porcentagens respectivas. Para as argilas de composição muito complexa, os métodos de análise química racional não oferecem resultados satisfatórios. Porém, se a argila contiver essencialmente caulinita (geralmente chamada de substância argilosa), quartzo e feldspato, então a análise poderá ser aplicada com resultados razoáveis (SANTOS, 1992).

Para o cálculo da análise racional RIES (1928) *apud* SANTOS (2003) fornece as seguintes relações:

$$\%Na_2O \times 5,60 = \% SiO_2 \text{ no feldspato sódico}$$

$$\%K_2O \times 3,83 = \% SiO_2 \text{ no feldspato potássico}$$

$$\%Na_2O \times 1,63 = \% Al_2O_3 \text{ no feldspato sódico}$$

$$\%K_2O \times 1,09 = \% Al_2O_3 \text{ no feldspato potássico}$$

$$\%Al_2O_3 \text{ total} - \% Al_2O_3 \text{ de feldspato} = \% Al_2O_3 \text{ na “substância argilosa”}$$

$$\%Al_2O_3 \text{ da “substância argilosa”} \times 1,18 = \%SiO_2 \text{ na “substância argilosa”}$$

$$\%Quartzo = \% SiO_2 \text{ da “substância argilosa”} + \% SiO_2 \text{ de feldspatos sódico e potássico.}$$

$$\% \text{Feldspato} = \% (\text{Na}_2\text{O} \times 8,45) + (\% \text{K}_2\text{O} \times 5,92)$$

$$\% \text{“substância argilosa”} = 100 - \%(\text{quartzo} + \text{feldspato}).$$

Apesar de ter sua aplicação restrita a materiais contendo apenas caulinita ou heloista, pouco quartzo e feldspato, a análise racional pode ser utilizada para a obtenção dos teores desses minerais a fim de poder calcular e preparar a massa cerâmica desejada.

### 2.3.1.2 Análise química (Clássica)

Segundo SANTOS (2003) a análise química costuma ser executada segundo o chamado método clássico, que é demorado, mas permite a obtenção de resultados bastante exatos. Ultimamente, com o desenvolvimento de técnicas modernas pode-se fazer a análise de argila usando-se métodos complexométricos e instrumentais que estão, porém, sujeitos a restrições.

As determinações usuais são: umidade, perda de fogo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mn}$ , matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e identificação dos cátions trocáveis; excepcionalmente determina-se lítio, crômio, cobalto, níquel e zinco (SANTOS, 1992).

Essa análise química é um processo muito laborioso. Modernamente, procura-se conseguir a análise química completa e unicamente por métodos instrumentais que evitem a etapa longa e trabalhosa da fusão e insolubilização da sílica, seguida por separação dos elementos, utilizando-se da espectrografia ou fluorescência dos raios X ou da espectrometria de absorção atômica. Esses métodos necessitam, geralmente, de dissolução da argila em uma matriz vítrea ou a dissolução completa em ácido fluorídrico em bombas especiais, com separações posteriores para evitar interferências. Existem ainda os métodos totalmente colorimétricos e espectrográficos ópticos.

### 2.3.2. Difração de raio X

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a técnica de difração de raios X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distância da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X.

Segundo ALBERS *et al* (2002), ao incidir um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Equação 2.1), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (características para cada fase cristalina).

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad ( 2.1 )$$

$n$  = número inteiro

$\lambda$  = comprimento de onda dos raios X incidentes

$d$  = distância interplanar

$\theta$  = ângulo de difração

A difração de raio X (DRX) é a técnica que por si só fornece informações mais amplas, precisas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes numa argila. Além disso, a DRX é uma técnica de análise não destrutiva, rápida e muito versátil (permite vários tipos de preparação e tratamento dos espécimes) (GOMES, 1986).

Dentre as vantagens da técnica de difração para a caracterização das fases, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa das fases. Porém a DRX possui o obstáculo de não se poder aplicar a minerais não cristalinos ou cristalinidade incipiente, porém, na argila, o número destes minerais é muito pouco significativo.

### **2.3.3. Análise térmica diferencial**

Este método analítico consiste no aquecimento, em velocidade constante de uma argila, juntamente com uma substância termicamente inerte (geralmente o óxido de alumínio-alfa ou coríndon), registrando diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a argila em estudo, em função da temperatura. Quando ocorrem transformações endo e exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial ou termograma. (SANTOS, 1992).

GIOLITO e IONASHIRO (2002), disseram que a análise térmica diferencial (ATD) consiste em uma técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância e o material referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. O registro é a curva térmica diferencial; as diferenças de temperatura devem ser colocadas e ordenadas, com as reações endotérmicas voltadas para baixo e as temperaturas nas abscissas, com valores crescentes da esquerda para a direita.

As curvas de ATD revelam mudanças de energia que ocorrem no material durante seu aquecimento ou arrefecimento. As mudanças de energia podem resultar de quatro causas principais: transição de fase, decomposições no estado sólido, reações com um gás ativo como o oxigênio (reações geralmente de superfície) e transições de 2ª ordem (mudança de entropia sem mudança de entalpia). A exemplo da caulinita bem cristalizada, a aproximadamente 950°C, há um pequeno pico endotérmico antes do pico exotérmico intenso do espinélio. De acordo com os autores, a cerca de 950°C em diante a metacaulinita se altera bruscamente formando tipo especial de alumina gama com a mesma estrutura do espinélio alumínio-silica –  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ . E a partir de 1100°C o espinélio se transforma em mulita.  $3 [\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2]$ .

Essas curvas são funções da estrutura cristalina e da composição química do material. A cada substância corresponde uma curva de ATD específica, a qual deve revelar pequenas variações cristaloquímicas.

Segundo GOMES (1986), no caso de argilas com vários componentes, argiloso ou não, a utilidade do ATD como método de diagnose pode ser restrita. Mas em certos casos, para a identificação de componentes fracamente cristalinos ou não cristalinos existentes em solos e para a identificação de matéria orgânica em argilas, a ATD é mais importante que Difração de Raios-X (DRX).

#### **2.3.4. Análise termogravimétrica**

A análise termogravimétrica (ATG) consiste no aquecimento da argila em velocidade constante em ligação com uma balança, o que permite o registro das variações da massa em função da temperatura; tem valor menor do que a ATD porque esta última detecta também transformações energéticas, tais como transformações polimórficas, como a do quartzo-alfa em quartzo-beta, que não envolvem variações na massa (SANTOS, 1992)



Esse método revela só as modificações de peso que ocorrem durante o aquecimento do material e que podem ter duas causas: decomposição ou oxidação. Apesar deste oferecer informações menos completas do que a ATD, oferece informações mais precisas.

Os termogramas dos argilominerais não são suficientes, de uma maneira geral, usados isoladamente, para a identificação da espécie mineralógica, mas permitem a classificação geral dos principais argilominerais. O caso de misturas oferece problemas, podendo ser utilizada com sucesso no estudo de reações entre sólidos e na medida de decomposição térmica de argilas e outras substâncias químicas.

### **2.3.5. Distribuição de tamanhos das partículas**

A análise da distribuição das dimensões dos grãos, denominada análise granulométrica, objetiva determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituintes do solo em relação ao seu peso seco.

Para a obtenção da distribuição do tamanho das partículas e aglomerados de pós, geralmente utiliza-se de métodos tradicionais como o peneiramento ou de equipamentos que forneçam as curvas de distribuição granulométrica. O resultado pode ser fornecido em termos de massa acumulada (porcentagem) em função do diâmetro esférico equivalente das partículas ou da distribuição modal de tamanho de partículas, e representado pela curva granulométrica.

Segundo NETO E MANSO (2003) o granulômetro a laser é o mais utilizado nos dias de hoje, trata-se de um aparelho que veio incrementar o campo da pesquisa das propriedades do solo no seu aspecto básico, possibilitando agilizar a determinação do tamanho das partículas do solo, simplificando sobremaneira o trabalho e o tempo dependido quando se utiliza o ensaio de sedimentação tradicional para se obter as mesmas informações; acrescentando-se a isto, a simplicidade de operação que o aparelho permite além da confiabilidade dos resultados.

## CAPÍTULO 3

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais e a metodologia utilizada, bem como os equipamentos e técnicas de caracterização são apresentados neste capítulo. No fluxograma, figura 3.1 está contido de forma geral, o procedimento experimental utilizado neste trabalho.

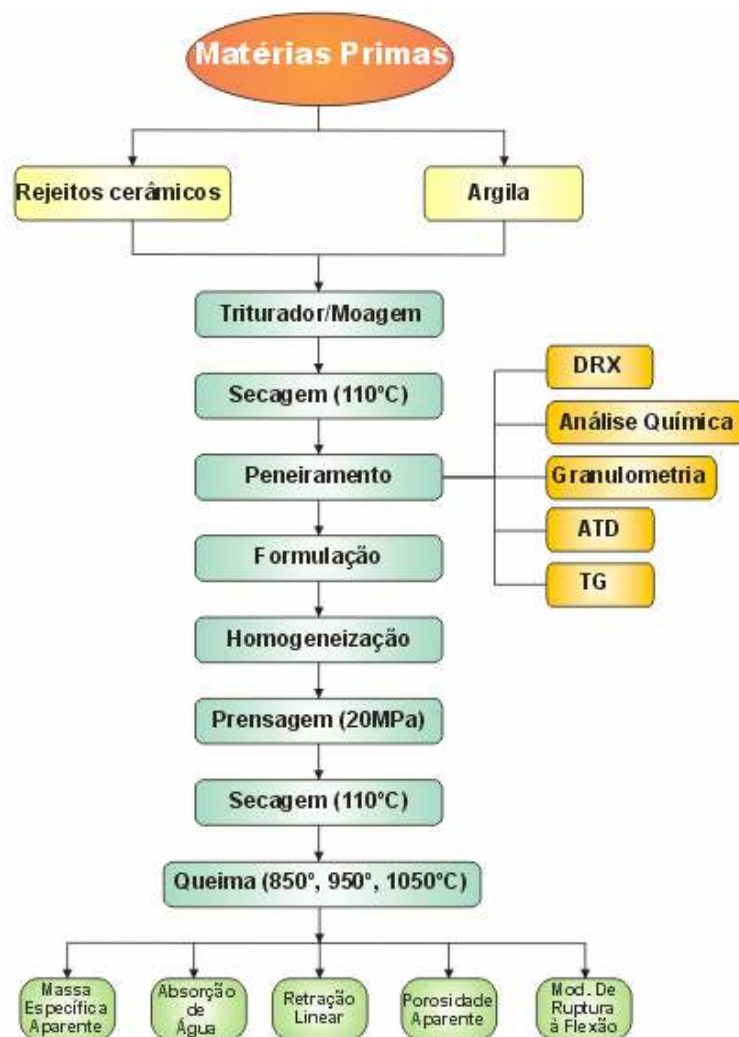


Figura 3.1: Fluxograma experimental utilizado

### 3.1 Matérias-primas

Os levantamentos regionais realizados pela C.B.P.M., conduziram à seleção de quatro depósitos de argila para uma avaliação da potencialidade da bacia do Recôncavo Baiano.

Mediante mapa geológico do Recôncavo e visando uma melhor caracterização dos materiais cerâmicos (blocos, telhas, ladrilhos, etc.) produzidos na Região Metropolitana de Salvador (R.M.S.), foi coletada amostra de argila, na região do recôncavo baiano, compreendida entre os municípios de Candeias e Camaçari, como espécie de teste piloto extensivo ao restante das jazidas, uma vez que no mapa geológico simplificado, representado na fig. 3.2, a formação da referida região é do Grupo 4 (arenitos com intercalações de folhelho e argila siltica, com trechos de argila caulinitica formacional). Em seguida, efetuada a análise química da amostra coletada, para ser submetida aos experimentos com adição dos rejeitos cerâmicos, objetivando melhorar as propriedades da massa, face às imperfeições visíveis das peças provenientes da etapa de queima da cerâmica vermelha.

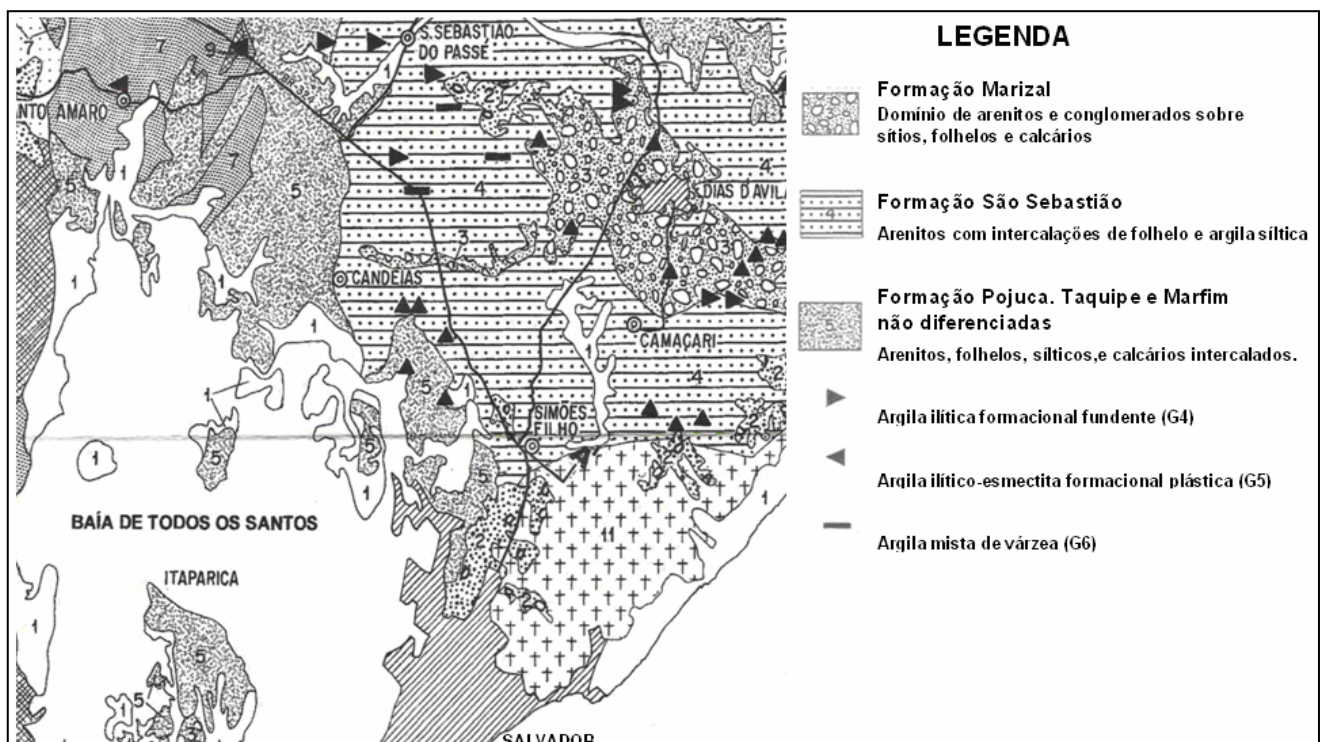


Figura 3.2: Mapa Geológico do Recôncavo Baiano (FILHO & MÔNACO, 2001)

### 3.1.1 Argila

A argila nas proximidades da Ba 523 (Fig. 3.3), situada entre a região de Candeias e Camaçari (R.M.S., do recôncavo baiano), foi coletada em forma de torrões e realizada a secagem durante sete dias, ensacada e enviada para o laboratório da UFRN, onde foi submetida ao processo de secagem em estufa à temperatura de 110°C. Sua moagem foi realizada por moinho de bolas.



Figura 3.3: Jazida de Argila – Ba-523

### 3.1.2 Rejeitos cerâmicos

Os rejeitos cerâmicos foi submetido à britagem em moinho de martelo, com grelha de 9mm de diâmetro e em seguida à moagem em moinho de bolas. O material foi de bloco e telha cerâmica. Na figura 3.4, têm-se os rejeitos cerâmicos a serem reutilizados na formulação de massas cerâmicas.



Figura 3.4: Material a ser reutilizado (rejeitos cerâmicos)

## 3.2 Preparação das amostras

Foram coletados 30 kg de cada matérias-prima acondicionados em sacos plásticos e encaminhados ao laboratório da UFRN para os respectivos ensaios. As etapas para preparação destas amostras estão descritas a seguir.

### 3.2.1. Moagem

Após a coleta, as amostras foram moídas a fim de remover os torrões. O processo utilizado foi moinho de bolas, sendo reduzidos a fragmentos de no máximo 4 mm de diâmetro. Conforme a figura 3.5, têm-se o jarro com bolas responsável pelo processo de moagem.



Figura 3.5: Jarro - moinho de bolas (processo de moagem)

### 3.2.2 Homogeneização

A homogeneização das amostras foi feita por agitação mecânica através do moinho planetário durante uma hora. Em seguida, foi realizado o peneiramento de todas as matérias-primas, inicialmente utilizando a peneira de 200mesh, para o peneiramento da argila, tendo que alterá-la, face a dificuldade no processo (volume passante). Utilizou-se assim, as peneiras de 35mesh, e 70mesh, para os rejeitos cerâmicos e argila respectivamente. As massas cerâmicas foram elaboradas a partir das formulações variando em 5, 10, 15% a concentração dos rejeitos cerâmicos em peso, conforme a tabela 3.1. Foram utilizados rejeitos cerâmicos existentes no laboratório da UFRN.

Para a dosagem das massas foi utilizada uma balança digital tipo Tecnal Mark 2200. Em seguida adicionou-se água às formulações em 10% da massa, para facilitar a conformação dos corpos de prova. Na figura 3.6, têm-se o moinho planetário.

Tabela 3.1: Formulação da mistura cerâmica (argila + rejeitos cerâmicos)

MASSAS CERÂMICAS	% EM PESO DA MATÉRIA-PRIMA		Nº de CP
	ARGILA	REJEITO CERÂMICO	
MI	100	0	18
MI +5	95	5	18
MI +10	90	10	18
MI +15	85	15	18
<b>TOTAL</b>			<b>72</b>



Figura 3.6: Moinho planetário - (processo de homogeneização das amostras)

### 3.2.3 Compactação

A compactação é uma das etapas básicas do processamento de materiais a partir do pó, na qual se obtém a forma estrutural da peça, como também as primeiras propriedades do produto. Nessa etapa foi utilizado o processo de compactação dos corpos-de-prova através de uma matriz uniaxial de aço com cavidade retangular de 60x20 mm. Em seguida foi levada a uma prensa hidráulica, marca SCHULZ, modelo PHS-15t com capacidade de operação máxima de 15 toneladas, utilizando uma pressão de compactação de 25MPa, dentro da faixa estipulada



para realização de ensaio cerâmicos (SANTOS, 1989), formando 72 (setenta e dois) corpos de prova, sendo 06(seis) por serie, com dimensões na ordem de 60x20x5mm. As figuras 3.7 e 3.8 mostram, respectivamente, a prensa PHS 15t Schulz utilizada na compactação, e o corpo-de-prova compactado.



Figura 3.7: Prensagem dos corpos-de-prova

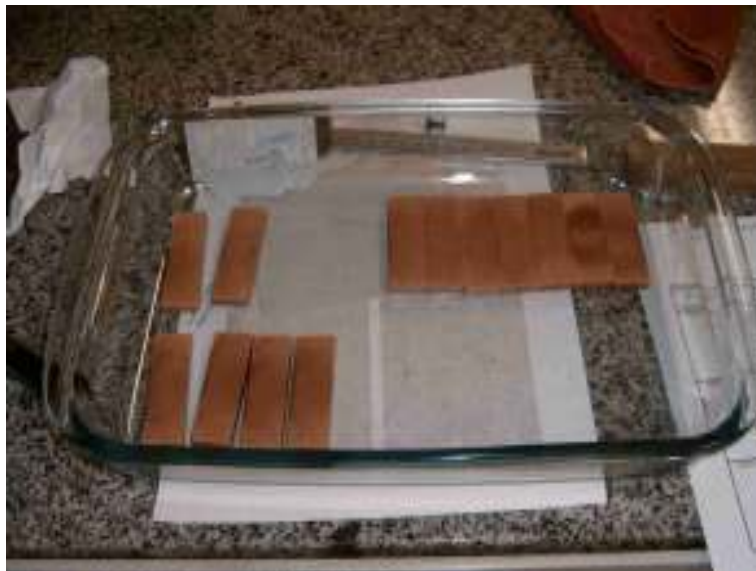


Figura 3.8: Corpos-de-prova após processo de compactação

### 3.2.4 Secagem

A secagem teve por objetivo controlar o teor de água dos corpos-de-prova cerâmicos, antes de submetê-lo ao processo de sinterização. Nesta etapa, devido à remoção da água dos meio porosos do corpo-de-prova, ocorreu uma pequena contração, do volume, desejável para



permitir uma aproximação das partículas constituintes, evitando com isso a presença de defeitos no corpo-de-prova durante a sinterização.

Embora possa permanecer ainda água nos poros ou vazios situados entre as partículas, não se verifica mais contração pelo fato das superfícies terem estabelecido bons contatos entre si. No prosseguimento da secagem, a água dos poros acaba por desaparecer sem produzir qualquer contração.

A secagem foi realizada em estufa com temperatura da ordem de 110°C, por 24 horas, conforme ilustra a figura 3.9.



Figura 3.9: Estufa utilizada na secagem dos corpos de prova

### 3.2.5 Queima

Os corpos de prova foram queimados em forno elétrico marca Linn Elektro Therm, vide figura 3.10, nas temperaturas de 850°C, 950°C e 1050°C, com isoterma de 2 horas e rampa de aquecimento de temperatura de 10°C/min. Após a queima os materiais foram caracterizados.



Figura 3.10: Forno utilizado para sinterização dos corpos de prova

#### 3.2.5.1. Curvas de gresificação

Nas curvas de gresificação constata-se variações de absorção e retração linear com a temperatura de queima, e servem para indicar a temperatura onde o material começa a densificar ou gresificar..

### 3.3 Caracterização das matérias-primas

Com todo o processo preliminar concluído, foi dado início aos experimentos com a argila, e os resíduos cerâmicos, que, por sua vez, foram submetidos a processos de caracterização física, mecânica e química.

#### 3.3.1 Análise química

Os resultados das análises químicas fornecem informações valiosas para a caracterização e também para a previsão e entendimento do comportamento das argilas, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas e tecnológicas dos materiais em questão.

A caracterização química da argila, e dos resíduos cerâmicos foi determinada pelo método semi-quantitativo da Fluorescência de Raios-X, utilizando-se o espectrômetro, Shimadzu EDX700, de energia dispersiva de fluorescência de Raios-X.

### 3.3.2. Difração de raios X

Para analisar a mineralogia das matérias-primas, ensaios de difração de raios X foram realizadas com o material moído, com um difratômetro marca LAB X da Shimadzu, modelo XRD-6000, com varredura de  $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 80^{\circ}$ , utilizando-se radiação tipo Cu-K $_{\alpha}$  ( $\lambda = 1,54056\text{Å}$ ). A análise qualitativa das fases de cada matéria-prima, foi efetuada através da comparação do ângulo de Bragg, da distância interplanar e da intensidade relativa dos principais picos experimentais gerado no difratograma.

### 3.3.3. Análise térmica

Para avaliar termicamente as matérias-primas, utilizou-se os analisadores termogravimétrico TGA-51H e o termodiferencial DTA-50H, ambos da marca Shimadzu, alocados no laboratório de Ensaio de Materiais do CTGÁS, conforme figura 3.11. Para os dois tipos de análise, foram utilizadas massa em torno de 15 mg, com taxa de aquecimento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre, aproximadamente,  $25^{\circ}\text{C}$  e  $1200^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.11: Analisadores termogravimétrico e termodiferencial

### 3.3.4. Distribuição de tamanhos das partículas

Para a realização da análise granulométrica empregou-se a técnica de classificação de partículas por difração à laser. O equipamento utilizado foi um granulômetro à laser, modelo 920 L. A dispersão se deu no tempo de 60 em ultrassom.

## 3.4. Características após a queima

Dentre estas características destacam-se a retração linear, resistência mecânica, absorção de água, porosidade e sua massa específica.

### 3.4.1. Retração linear

Corpos feitos a partir de argila sofrem, usualmente, redução de tamanho (retração) após secagem e após a queima. A retração após secagem é consequência da eliminação de água utilizada na formação do corpo. Ao ser eliminada a água e ao surgirem os vazios por ela deixados, ocorre uma aproximação das partículas em consequência das forças de atração eletrostática, provocando o que se chama de aglomeração ou adensamento. Após a queima, a retração é consequência do fenômeno de sinterização.

Foram medidas as dimensões dos corpos de prova antes e após queima. Em seguida suas retrações lineares foram calculadas através da equação 3.1, (SANTOS, 1989). Se o resultado da equação for negativo, significa que houve retração, do contrário, expansão.

$$R_q (\%) = \frac{(L_o - L_i) \times 100}{L_i} \quad (3.1)$$

Onde:

$R_q$  = Variação da retração linear em porcentagem após a queima.

$L_o$  = Comprimento inicial, antes da queima,

$L_i$  = Comprimento do corpo de prova após a queima.

### 3.4.2 Absorção de água

A capacidade de absorção de água do corpo sinterizado está relacionada com a quantidade de água em percentagem, que o corpo absorve após queima.

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s) \times 100}{P_s} \quad (3.2)$$

Onde:

AA = Absorção de água (em %)

P<sub>u</sub> = Peso do corpo saturado (em gr)

P<sub>s</sub> = Peso do corpo de prova seco, após queima (em gr)

### 3.4.3 Porosidade aparente

A porosidade aparente é a indicada em percentagem entre o volume de poros abertos do corpo de prova em relação ao seu volume total. Ela estabelece a gama técnica de coedura de um produto e o respectivo grau de sinterização (GOMES, C. F. 1986).

Determina-se a porosidade aparente de um corpo através da seguinte equação (3.3):

$$PA(\%) = \frac{(P_u - P_s) \times 100}{(P_u - P_i)} \quad (3.3)$$

Onde:

PA = Porosidade aparente (em %)

P<sub>u</sub> = Peso do corpo de prova saturado (em g)

P<sub>s</sub> = Peso do corpo de prova seco, após queima (em g)

P<sub>i</sub> = Peso do corpo de prova imerso em água (em g)

Os corpos de prova foram todos imersos em água, pelo método de balança hidrostática, a fim de calcular a porosidade aparente.

### 3.4.4 Massa específica aparente

A massa específica aparente é a razão entre o peso do corpo de prova seco (em g) e o seu volume (em cm).

A MEA foi determinada de acordo com Souza Santos (1989), utilizando-se a seguinte equação (3.4):

$$\text{MEA (g/cm}^3\text{)} = \frac{P_s}{(P_u - P_i)} \quad (3.4)$$

$P_u$  = Peso do corpo de prova saturado (em g)

$P_s$  = Peso do corpo de prova seco, após queima (em g)

$P_i$  = Peso do corpo de prova imerso em água (em g)

### 3.4.5 Resistência Mecânica

A resistência à flexão ( $\sigma_f$ ) determina o valor da carga que, aplicada ao corpo de prova, causa uma ruptura no mesmo após o aumento uniforme desta.

A resistência à flexão é analisada por testes de flexão em três pontos, segundo SANTOS (1989).

A resistência à flexão foi calculada pela equação 3.5, segundo método proposto por Vicat.

$$\sigma_f \text{ (MPa)} = \frac{3PL}{2ah^2} \quad (3.5)$$

Onde:

$\sigma_f$  = Resistência à flexão

$P$  = Carga atingida no momento da ruptura (em N)

$L$  = Distância entre os apoios (em mm)

$a$  = Largura do corpo de prova (em mm)

$h$  = Altura do corpo de prova (em mm)

Os corpos de prova foram medidos nas três dimensões e o ensaio se procedeu utilizando uma máquina de ensaio universal Shimadzu, com capacidade máxima de carga de 600Kg, conforme a figura 3.12.

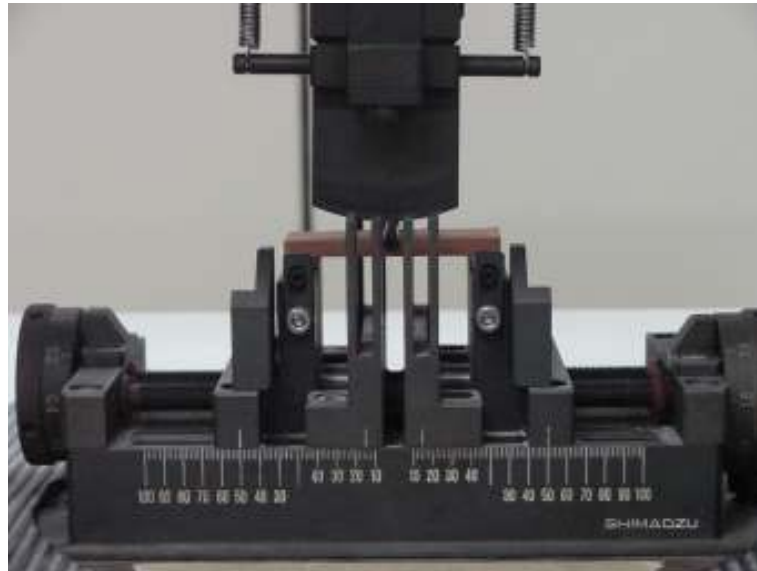


Figura 3.12 Ensaio de resistência mecânica (Shimadzu)

### 3.4.6. Temperatura de fusão

A estimativa da temperatura de fusão de uma massa cerâmica pode ser obtida a partir da fórmula de Schuen:

$$T_{\text{fusão}} (\text{°C}) \approx (360 + \%MI \cdot Al_2O_3 - RO) / 0,228 \quad (3.6)$$

onde:

MI → Percentual de composição de cada matéria-prima (argila e rejeitos cerâmicos) na massa cerâmica.

RO → Somatório dos percentuais em peso dos óxidos ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $2O$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$  e  $CuO$ ) presentes na composição das matérias primas utilizadas na formulação das massas cerâmicas.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Caracterização dos pós

##### 4.1.1. Análise Química

Na tabela 4.1 estão apresentados os resultados obtidos nas análises químicas da argila, e dos rejeitos cerâmicos. A argila apresentou grande concentração de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além desses óxidos, apresentou também elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (10,296%), o que caracteriza a argila como “vermelha”, com baixa concentração de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ , indicando que a argila é de natureza não carbonática, tendo 14,75% de componentes fundentes, o que justifica sua queima em baixa à média temperatura.

Tabela 4.1: Composição química em peso das matérias-primas

ÓXIDOS PRESENTES	CONCENTRAÇÃO EM PESO (%)	
	ARGILA	REJEITOS CERÂMICOS
$\text{SiO}_2$	52,373%	57,880%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22,703%	24,442%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10,616%	10,296%
$\text{K}_2\text{O}$	5,180%	3,900%
$\text{TiO}_2$	1,084%	1,546%
$\text{MgO}$	2,004%	1,164%
$\text{MnO}$	0,167%	0,198%
$\text{So}_3$	0,089%	0,138%
$\text{CaO}$	2,681%	0,123%
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,105%	0,104%
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,069%	0,056%
$\text{ZrO}_2$	0,067%	0,055%
$\text{CuO}$	0,034%	0,035%
$\text{ZnO}$	0,029%	0,020%
$\text{Nb}_2\text{O}_5$	0,019%	0,015%
$\text{Y}_2\text{O}_3$	0,020%	0,014%
$\text{NiO}$	0,033%	0,013%
$\text{Na}_2\text{O}$	2,678%	-
$\text{SrO}$	0,049%	-



Os rejeitos cerâmicos utilizados, além das concentrações elevadas de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentaram elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (10,616%), o equivalente em óxido como  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , e  $\text{Na}_2\text{O}$  também aparecem com concentrações significativas, o que possivelmente acarretarão maior fundência, quando os rejeitos cerâmicos foram incorporados a massa.

#### 4.1.2. Difração de Raios X

De acordo com os picos característicos, foi constatado que a argila, da região entre Candeias e Camaçari, é constituída de três fases: caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ); ilita ( $(\text{K}_3\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ ) e quartzo  $\text{SiO}_2$ . Todavia, ao considerar o resultado da análise química e comparar ao difratograma, verifica-se que o quartzo tem o pico mais intenso e majoritário dessa matéria-prima, seguido da caulinita. A presença do Fe está provavelmente relacionado-a fase magnetita, cujo pico de difração, encontra-se em  $2\theta$  aproximadamente  $35^\circ$ , que se sobrepõe o pico da ilita. Na figura 4.1, apresenta-se o difratograma de raios x de argila da região entre Candeias e Camaçari .

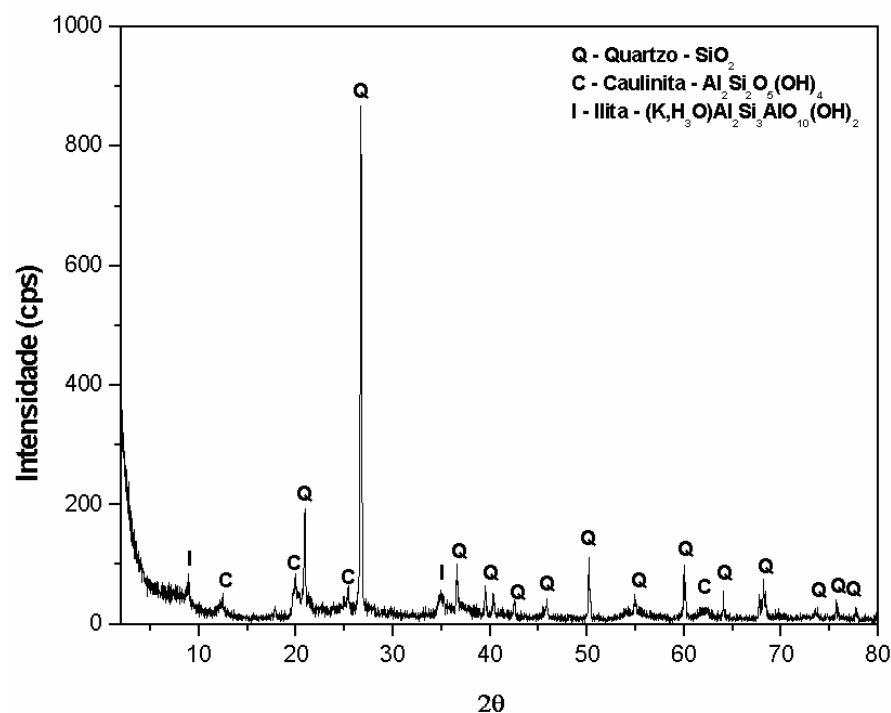


Figura 4.1: Resultado do DRX da argila

O mineral não argiloso presente é o quartzo, podendo haver outros compostos presentes em concentrações não identificáveis claramente, face à técnica DRX. Na figura 4.2, apresenta-se o difratograma de raios x dos rejeitos cerâmicos.

Pode-se verificar que os rejeitos cerâmicos utilizado é constituído de diversas fases, dentre elas a illita e albita, o que indica que a argila utilizada era rica deste argilomineral, e que eles não foram completamente queimados. Além dessa fase identificou-se a fase da cordierita ( $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ ), mineral obtido quando a argila é queimada e o quartzo ( $SiO_2$ ), constituinte existente antes da queima da massa. A presença de Fe na análise química deve está relacionado com a presença das fases da hematita e magnetita, identificadas a partir dos picos na posição  $2\theta$  entre  $33^\circ$  e  $35^\circ$ . Geralmente os picos dos compostos de ferro (hematita e magnetita), são mais largos, pois, são fases de baixa cristalinidade.

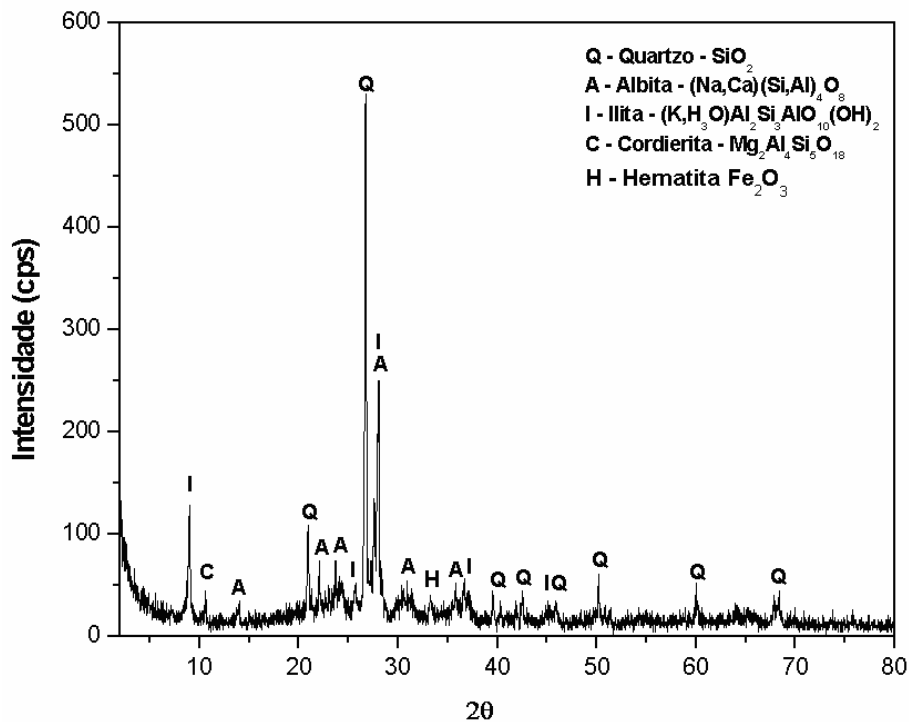


Figura 4.2: Resultado do DRX dos rejeitos cerâmicos

#### 4.1.3. Análise Química racional das matérias-primas

A partir da análise racional, realizada através de um software desenvolvido no laboratório de materiais da UFRN, programa MIDS (MORAES, 2004), verificou-se a fração total de argilominerais de 64,84% na argila e 73,18% nos rejeitos cerâmicos. O quartzo livre apresentou 24,41% e 11,79% para a argila os rejeitos cerâmicos, respectivamente, enquanto que outros acessórios perfazem 10,74% para argila e 15,03% para os rejeitos cerâmicos, como mostra a tabela 4.2.

Tabela 4.2: Análise racional das matérias primas

Constituinte mineralógico	Concentração de argilominerais (%)	
	Argila	Rejeitos Cerâmicos
Caulinita	30,53	-
Albita	-	20,68
Ilita	34,31	52,50
<b>Fração Argilomineral</b>	<b>64,84</b>	<b>73,18</b>
Quartzo livre	24,41	11,79
Minerais acessórios	10,74	15,03

#### 4.1.4. Análise Térmica

Nas figuras 4.3 e 4.4 constata-se os resultados das análises termogravimétrica (TG) e termodiferencial (ATD), realizadas na argila. Na figura 4.5 nota-se perda de massa (TG), até 100°C com 2% de perda correspondente à água de hidratação, a perda de massa entre as temperaturas de 100° e 400°C correspondente à queima da matéria orgânica e entre as temperaturas de 400° a 750°C eliminação de hidroxilas (OH) e carbonatos (CO<sub>3</sub>) transformação de hidróxidos e carbonatos em óxidos.

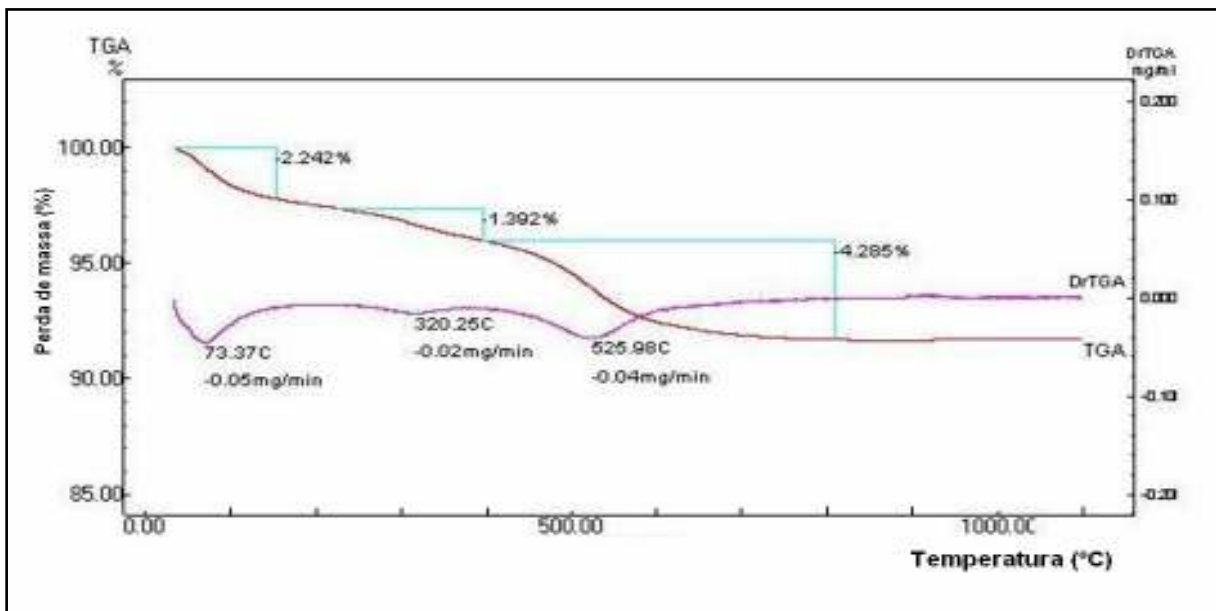


Figura 4.3: Curva termogravimétrica (TG) da argila

Na figura 4.4, apresenta-se um pico endotérmico entre as temperaturas de 20° e 100°C, indicando perda de água de umidade. Com o resultado apresentado, pode-se concluir que o pico exotérmico, em aproximadamente 105°C corresponde à redução da água higroscópica, incorporadas naturalmente à argila. Entre as temperaturas de 200°C e 400°C, ocorre um pico,

mal definido, indicando provavelmente a liberação da  $\text{CO}_2$ , em consequência do processo de oxidação da matéria orgânica presente na argila. A maior perda de água estrutural da caulinita ocorreu entre  $400^\circ$  e  $600^\circ\text{C}$ , conforme indica o pico endotérmico a  $480,54^\circ\text{C}$  (processo de desidroxilação). Nesta mesma faixa de temperatura pode-se observar ainda, um pico próximo dos  $570^\circ\text{C}$ , mal definido, indicando provavelmente a transformação polifórmica do quartzo-alfa em quartzo-beta. Na faixa de  $800^\circ$  a  $900^\circ\text{C}$ , observa-se um pico exotérmico situado à  $850,79^\circ\text{C}$ , onde nessa temperatura ocorre a formação da fase do espinélio de sílica-alumina. Sua composição, dado ao pequeno tamanho das partículas, é de difícil determinação, mas, encontra-se na faixa entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . A aproximadamente  $1040^\circ$  apresenta-se um pico exotérmico mal definido indicando a formação de fase da mulita mais a cristobalita. A caulinita tem reação Si/Al na proporção 1/1, e a fase mulita, nessa temperatura, é do tipo  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  na proporção 3/2, que, segundo (CHAKRAVORTY & GHOSH *apud* BARBA, 2002) tem a seguinte reação de decomposição:

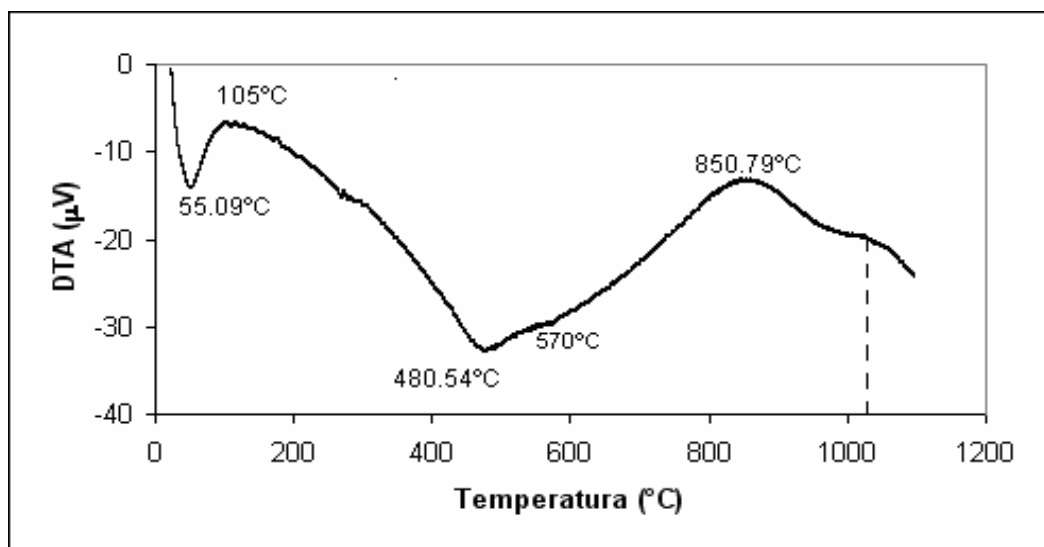
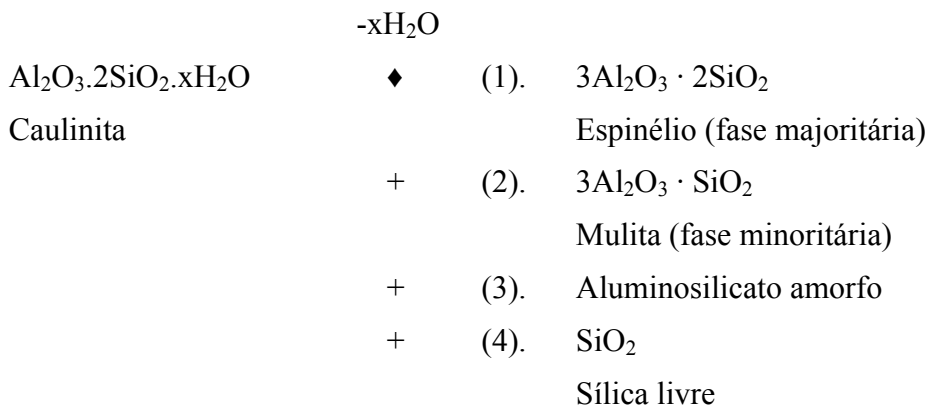


Figura 4.4: Curva termodiferencial (ATD) da argila

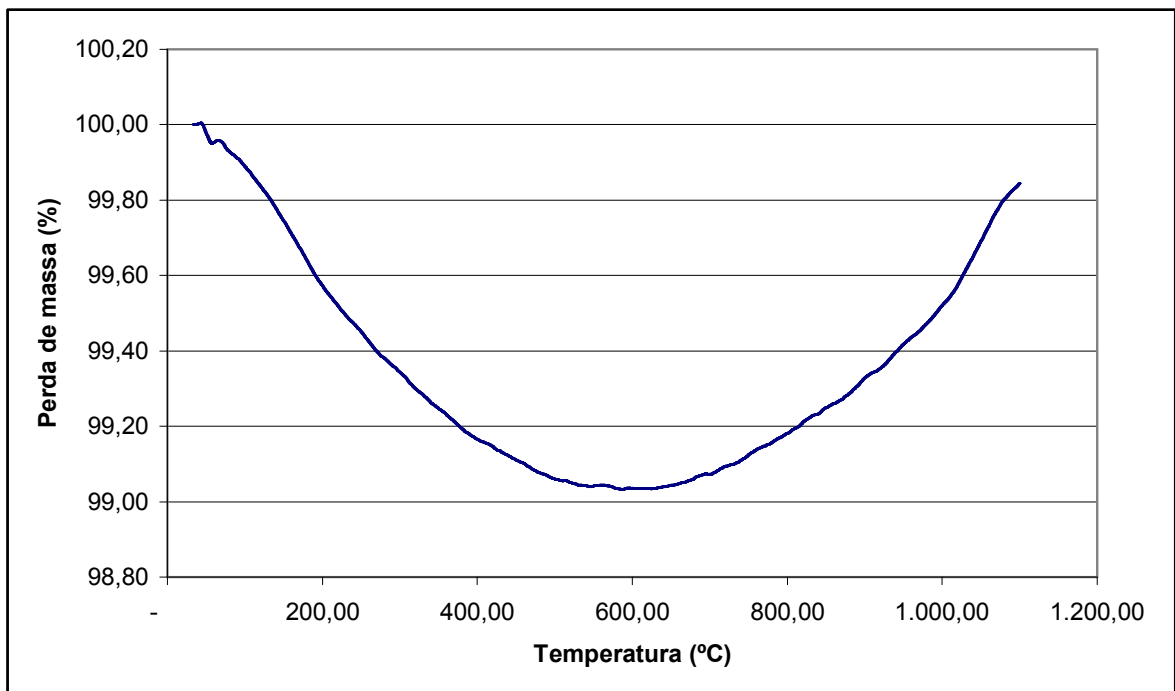


Figura 4.5: Curva termogravimétrica (TG) dos rejeitos cerâmicos

Conforme se pode observar na figura 4.5., o comportamento térmico gravimétrico dos rejeitos cerâmicos é de perda de massa baixa, por se tratar material que havia sido sinterizado. A variação entre as temperaturas 50°C e 600°C foi de 0,99%. O rejeito, por ser em produto de telhas e blocos sinterizados, deveria apresentar estabilidade quanto a variação de massa, contudo, pelo gráfico gerado na análise, percebe-se que tal fato não ocorreu, podendo ter explicação no caso de reidratação do material amorfo, mas, não se pôde definir as transformações ocorridas durante a análise.

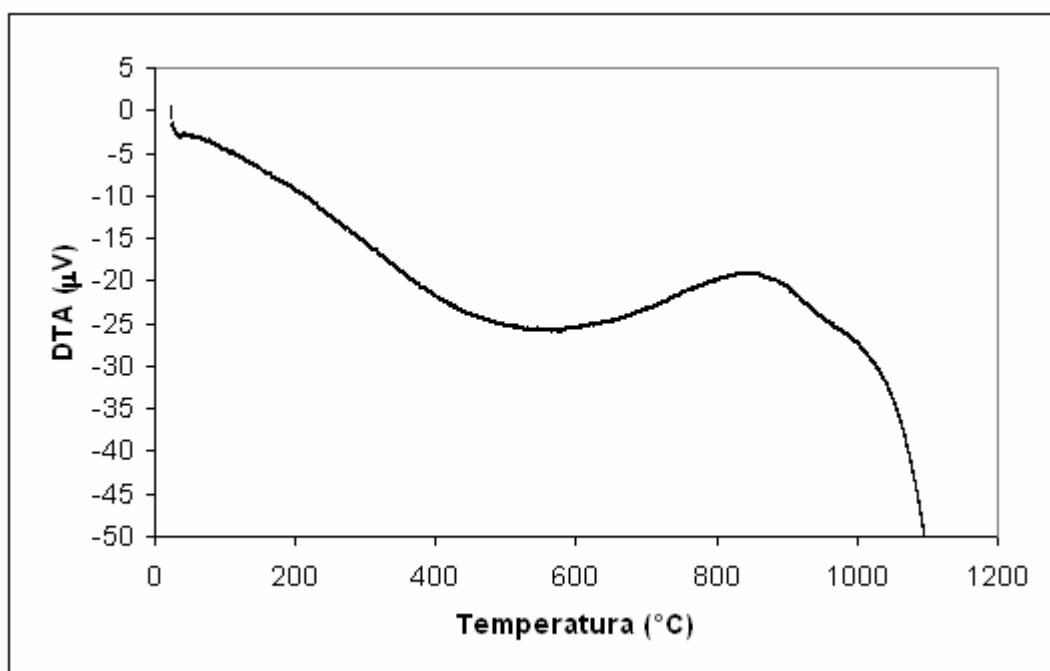


Figura 4.6: Curva termodiferencial (ATD) dos rejeitos cerâmicos

O que se pode observar no resultado da análise térmica diferencial realizada nos rejeitos cerâmicos, conforme mostra a Figura 4.6, é que há ausência de picos bem definidos não se podendo assim determinar todas as transformações ocorridas. Entretanto, acima da temperatura de 900°C observa-se que o gráfico sofre uma queda brusca o que pode, por sua vez, estar determinando o início da fusão do material, visto que o argilomineral ilita é majoritário e sua fusão o início de sua fusão se dá em torno de 900°C a 1050°C.

#### 4.1.5. Granulometria

Nas figuras 4.7 e 4.8 têm-se resultados da análise granulométrica da argila e dos rejeitos cerâmicos, respectivamente.

Verifica-se que a argila, apresentou após moída uma granulometria entre 0,3μm e 400μm, dos quais 15% do seu volume em uma granulometria inferior a 2μm, 54% entre 2 e 20μm e 31% acima de 20μm. O D<sub>50</sub> e D<sub>90</sub> apresentaram diâmetro de 9μm e 200μm, respectivamente. O diâmetro médio de partículas para argila é igual a 46,49μm.

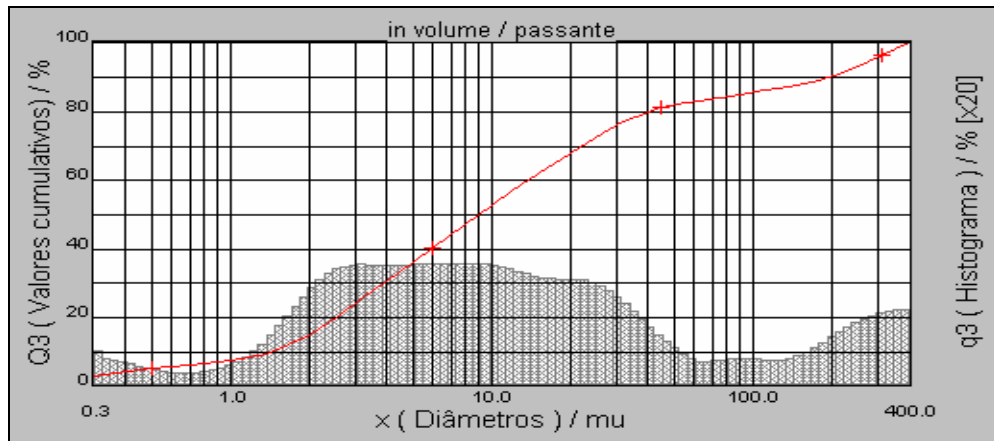


Figura 4.7: Distribuição granulométrica fracional e acumulada da argila

Os rejeitos cerâmicos apresentaram granulometria entre  $0,32\mu\text{m}$  e  $40\mu\text{m}$ , dos quais 42% em volume têm granulometria inferior a  $2\mu\text{m}$ , 55% entre 2 e  $20\mu\text{m}$  e 3% têm acima de  $20\mu\text{m}$ . O  $D_{50}$  e  $D_{90}$  apresentaram diâmetro de  $2,7\mu\text{m}$  e  $16\mu\text{m}$ , respectivamente. O diâmetro médio para os rejeitos cerâmicos é de  $5,48\mu\text{m}$ .

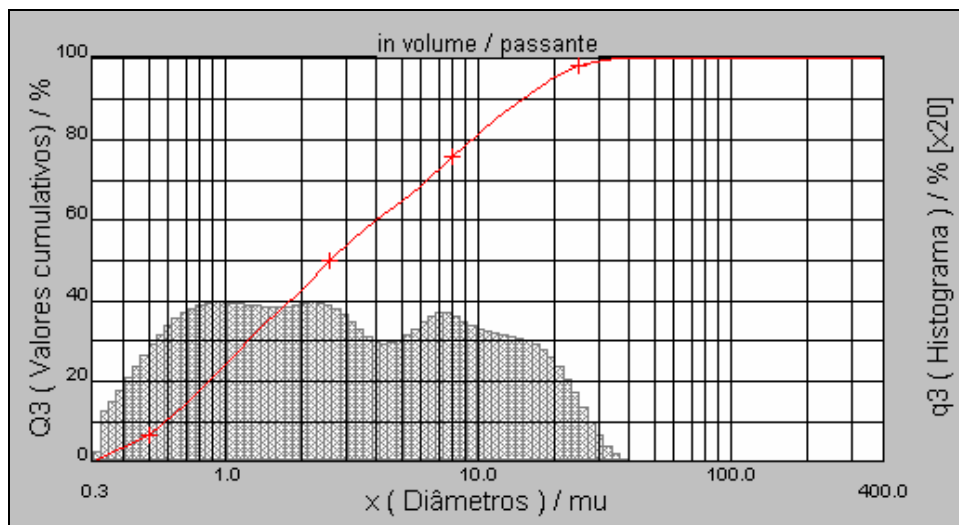


Figura 4.8: Distribuição granulométrica fracional e acumulada dos rejeitos cerâmicos

Após análise racional, comparando com a granulometria, a fração de argilomineral varia na faixa de 64% a 73% e não apresenta correspondência direta entre o percentual abaixo de  $2\mu\text{m}$ . Isso deve-se ao estado de floculação que se encontra o material. A tabela 4.3 apresenta de forma simplificada a distribuição granulométrica nas porcentagens do diâmetro do grau do volume passante.

Tabela 4.3: Porcentagem do diâmetro das partículas das matérias-primas estudadas.

Matéria prima	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	Distribuição granulométrica (% do volume passante)		
		$\emptyset \leq 2\mu\text{m}$	$2\mu\text{m} < \emptyset \leq 20\mu\text{m}$	$\emptyset > 20\mu\text{m}$
Argila	46,49	15%	54%	31%
Chamote	5,48	42%	55%	3%

A partir da tabela 4.3, pode-se perceber que o tamanho médio das partículas para os rejeitos cerâmicos encontra-se abaixo do usual em mercado. Isso é fato positivo, visto que, quanto mais fina é a granulometria de uma massa, mais rápida ocorrem as reações de sinterização, o que contribui diretamente com a diminuição do tempo e da temperatura de queima, proporcionando, desta forma, menores custos de produção.

## 4.2 Caracterização dos sinterizados

Os resultados das propriedades cerâmicas dos corpos de prova após a queima nas temperaturas de 850°, 950° e 1050°C em forno elétrico, com adição de 5, 10 e 15% em peso de rejeitos cerâmicos, são mostrados nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, sendo utilizados 06 (seis) corpos-de-prova para cada formulação. A partir dos dados, foram elaborados os gráficos da retração linear, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à flexão.



Tabela 4.4: Caracterização das formulações à temperatura de 850°C

Formulação	Temperatura de queima			
	850 °C			
	RLQ(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )
Argila 100%	0,717 ± 0,076	16,003 ± 0,394	30,337 ± 0,468	1,896 ± 0,018
Argila 95% Rejeito 5%	0,794 ± 0,051	17,54 ± 1,304	32,437 ± 1,597	1,853 ± 0,044
Argila 90% Rejeito 10%	0,735 ± 0,007	16,95 ± 0,447	31,675 ± 0,662	1,868 ± 0,011
Argila 85% Rejeito 15%	0,353 ± 0,048	16,81 ± 0,524	31,439 ± 0,69	1,871 ± 0,017

Tabela 4.5: Caracterização das formulações à temperatura de 950°C

Formulação	Temperatura de queima			
	950 °C			
	RLQ(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )
Argila 100%	2,032 ± 0,216	15,236 ± 0,312	29,534 ± 0,471	1,939 ± 0,009
Argila 95% Rejeito 5%	1,8605 ± 0,096	15,618 ± 0,245	29,984 ± 0,373	1,92 ± 0,006
Argila 90% Rejeito 10%	1,9017 ± 0,079	15,426 ± 0,647	29,689 ± 0,866	1,925 ± 0,025
Argila 85% Rejeito 15%	1,607 ± 0,043	14,86 ± 0,162	28,796 ± 0,306	1,938 ± 0,007

Tabela 4.6: Caracterização das formulações à temperatura de 1050°C

Formulação	Temperatura de queima			
	1050 °C			
	RLQ(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )
Argila 100%	7,278 ± 1,693	10,601 ± 0,117	22,481 ± 0,249	2,121 ± 0,004
Argila 95% Rejeito 5%	7,2425 ± 3,621	11,521 ± 5,774	23,96 ± 12	2,081 ± 1,041
Argila 90% Rejeito 10%	7,1374 ± 0,114	9,6697 ± 0,328	20,799 ± 0,558	2,151 ± 0,015
Argila 85% Rejeito 15%	6,9272 ± 0,702	9,6808 ± 1,233	20,706 ± 2,055	2,144 ± 0,054

#### 4.2.1. Retração Linear

A partir das tabelas 4.4 a 4.6, foi elaborado o gráfico de retração linear em função da temperatura para as diversas formulações, conforme a figura 4.9.

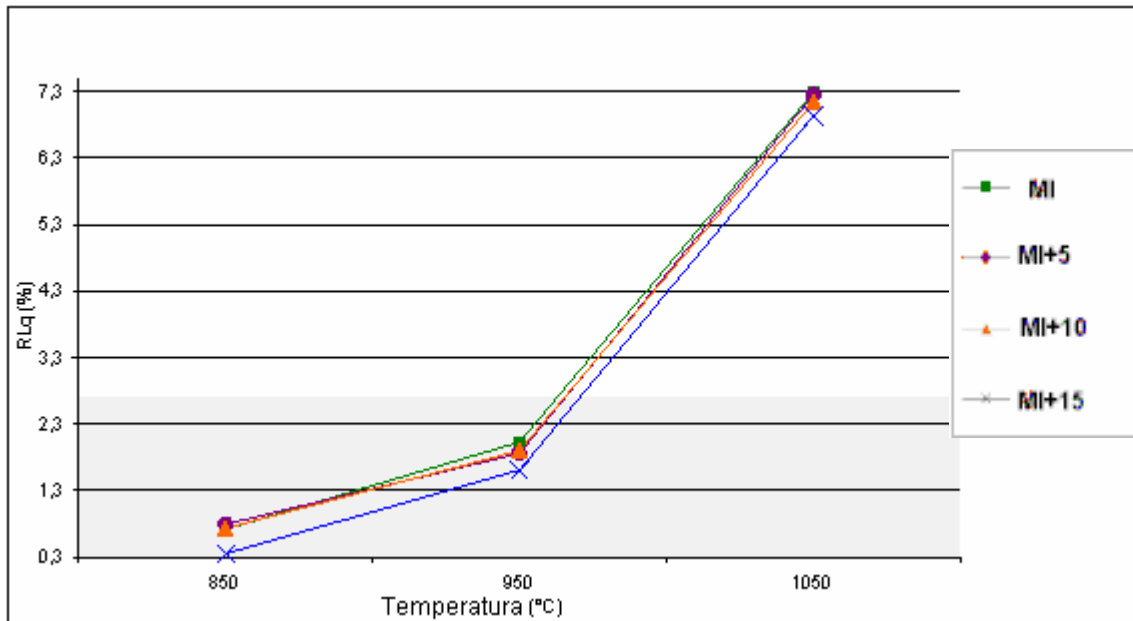


Figura 4.9: Retração linear em função da temperatura para diversas formulações

Pôde-se constatar que para todas as formulações ocorreu um pequeno aumento de retração linear, ou seja, a medida que aumenta a temperatura, aumenta-se o valor da retração linear. Entre 850° e 950°C a formulação com 15% em peso dos rejeitos cerâmicos apresentou resultados significativos em relação às demais formulações. A partir da temperatura de 950° os valores da retração linear aumentaram bruscamente. Este comportamento é atribuído ao processo de vitrificação.

#### 4.2.2. Absorção de água

A partir das tabelas 4.4 a 4.6, foi elaborado o gráfico de absorção de água em função da temperatura para as diversas formulações, conforme a figura 4.10.

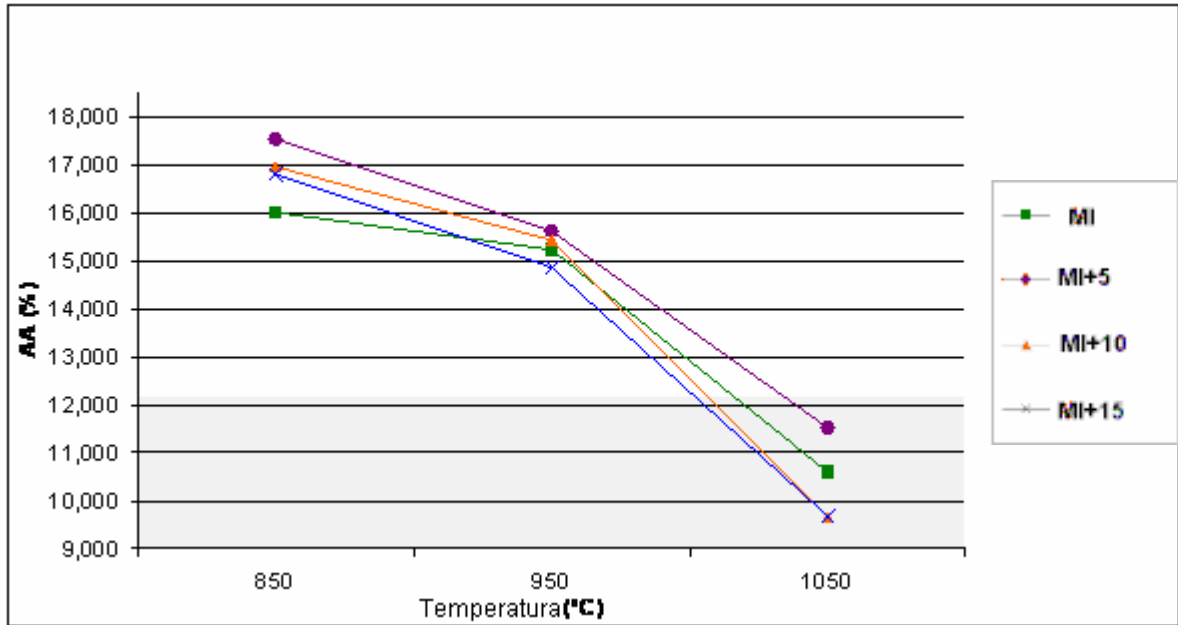


Figura 4.10: Absorção de água para as diversas formulações

Nota-se que, à medida que aumenta a temperatura, a absorção de água diminui e que, para a formulação com 15% em peso de rejeitos cerâmicos são apresentados valores de absorção de água menores entre as temperaturas de 950° e 1000°C, comparadas com as demais formulações. Observa-se também, que, para cada temperatura investigada, a adição de rejeitos cerâmicos pouco afeta a absorção de água em relação à argila pura.

#### 4.2.3. Porosidade aparente

A figura 4.11 representa o gráfico da porosidade aparente em função da temperatura de queima, a partir de dados das tabelas 4.4 a 4.6.

Pôde-se notar que, com o aumento da temperatura, há uma diminuição da porosidade. Os melhores valores para a porosidade aparente foram encontrados para a formulação 15% em peso de rejeitos cerâmicos nas temperaturas entre 950° e 1000°C, coincidindo assim com os melhores valores da absorção de água.

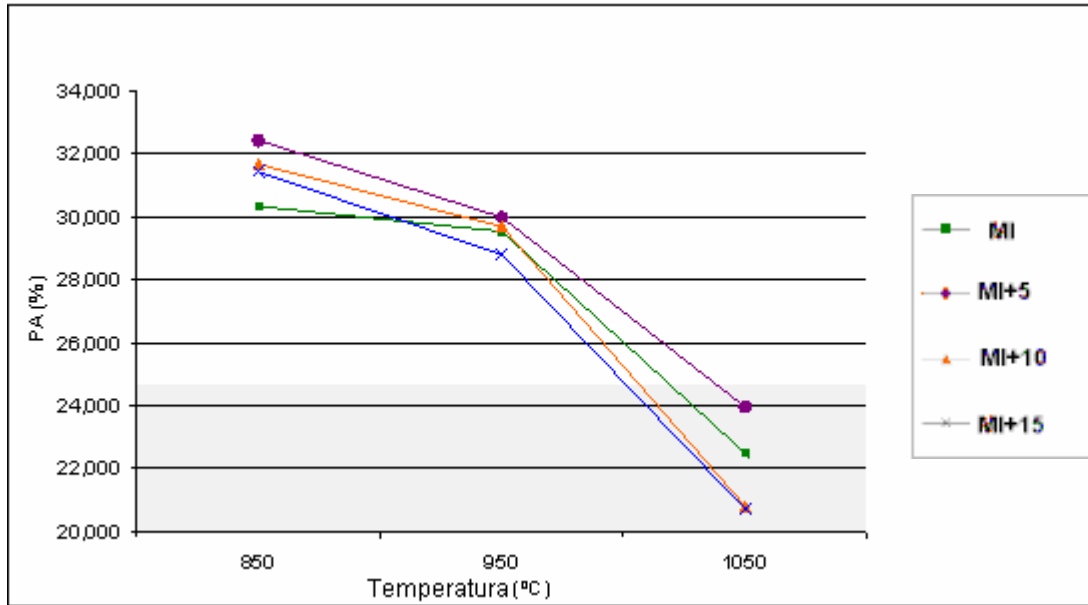


Figura 4.11: Porosidade aparente para as diversas formulações

#### 4.2.4. Massa específica aparente

A partir das tabelas 4.4 a 4.6, foi elaborado o gráfico da massa específica aparente em função da temperatura para as diversas formulações, conforme a figura 4.12. Pôde-se notar que com o aumento de temperatura há um aumento de massa específica aparente.

A massa cerâmica inicia o processo de sinterização em torno de 850°C. O aumento brusco na massa específica acima de 950°C deve-se ao início da formação de fase líquida que rapidamente preenche os poros dos corpos cerâmicos.

Melhores valores de massa específica foram constatados para a formulação 15% em peso de rejeitos cerâmicos à 950°C.

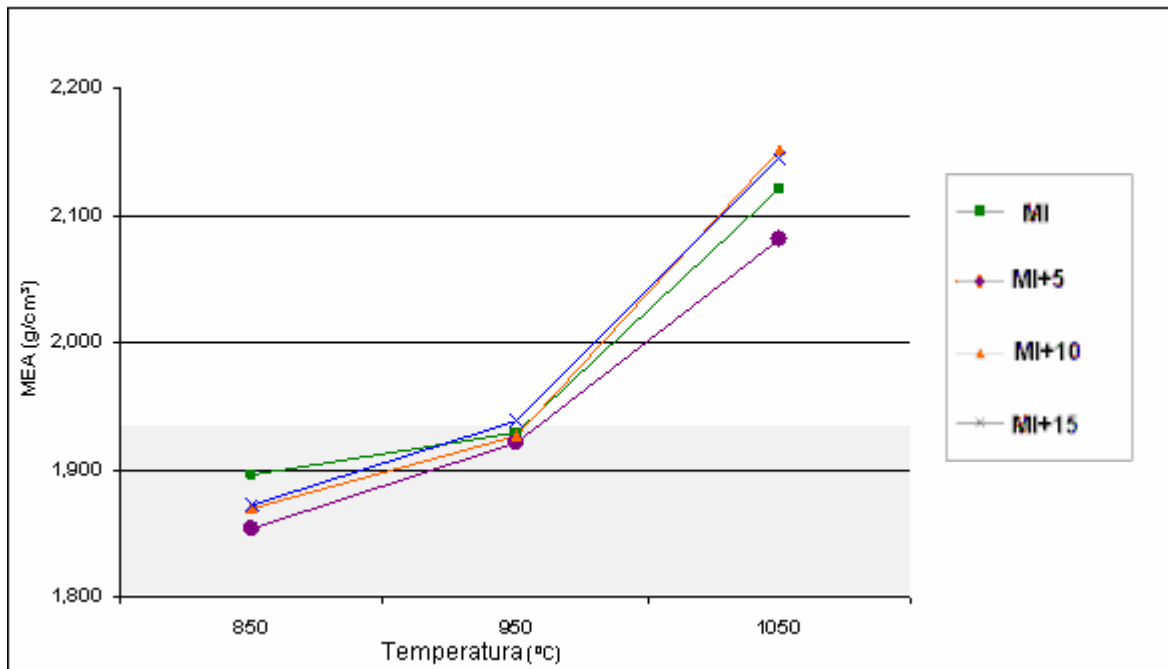


Figura 4.12: Massa específica aparente para as diversas formulações

#### 4.2.5. Resistência mecânica

A partir dos dados da tabela 4.7, que representa os valores da resistência mecânica dos corpos cerâmicos sinterizados, para várias temperaturas, foi elaborado o gráfico de resistência mecânica à flexão para diversas formulações, conforme figura 4.13.

Tabela 4.7: Resistência mecânica à flexão em três pontos

Temp. (°C)	Valores de $\sigma_f$ (Mpa)			
	MI Argila	MI+5	MI+10	MI+15
850	6,97 ± 0,52	7,16 ± 1,74	8,81 ± 1,48	9,76 ± 1,16
950	7,67 ± 0,52	8,42 ± 0,38	10,72 ± 1,51	12,73 ± 0,48
1050	8,53 ± 1,36	13,09 ± 1,31	15,76 ± 2,43	17,70 ± 2,39

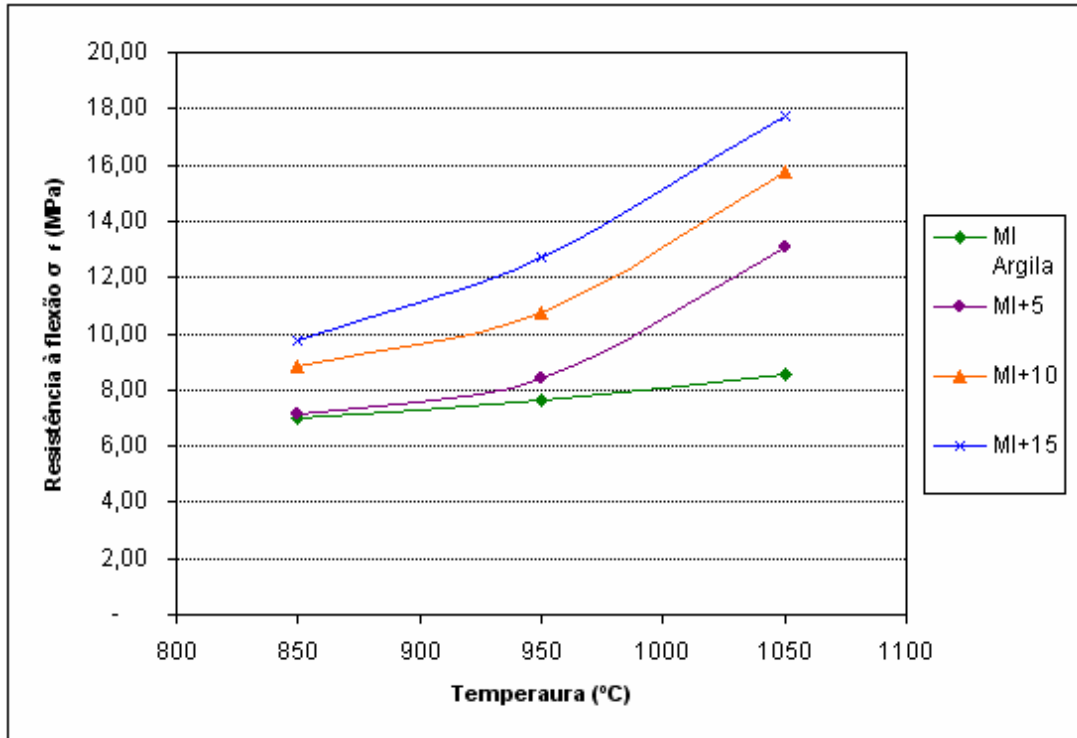


Figura 4.13: Resistência mecânica à flexão

Pôde-se constatar que a resistência mecânica aumenta com o aumento da temperatura de sinterização. A argila se manteve valores de resistência quase constante, enquanto que os corpos com incorporação dos rejeitos cerâmicos aumentaram significativamente os valores da resistência mecânica comparados aos da argila, destacando-se as formulações MI+10 e MI+15.

### 4.3 Estudo do ciclo de queima

A otimização de temperatura ideal de queima pode ser obtida através do estudo de gresificação da massa cerâmica sinterizada. Esta análise foi obtida através do estudo gráfico, onde se utilizou como parâmetro a retração linear (RL) e a absorção de água (AA), para identificar o ponto otimizado de queima, em consonância com a ABNT:NBR 12570-1 estabelece para blocos cerâmicos que a AA não deve ter valores inferiores a 8% e nem superiores a 22%.

As figuras 4.14 a 4.17 representam as curvas de gresificação, no forno elétrico, para várias temperaturas de sinterização com porcentagem ponderal de 5, 10 e 15% em peso de rejeitos cerâmicos.

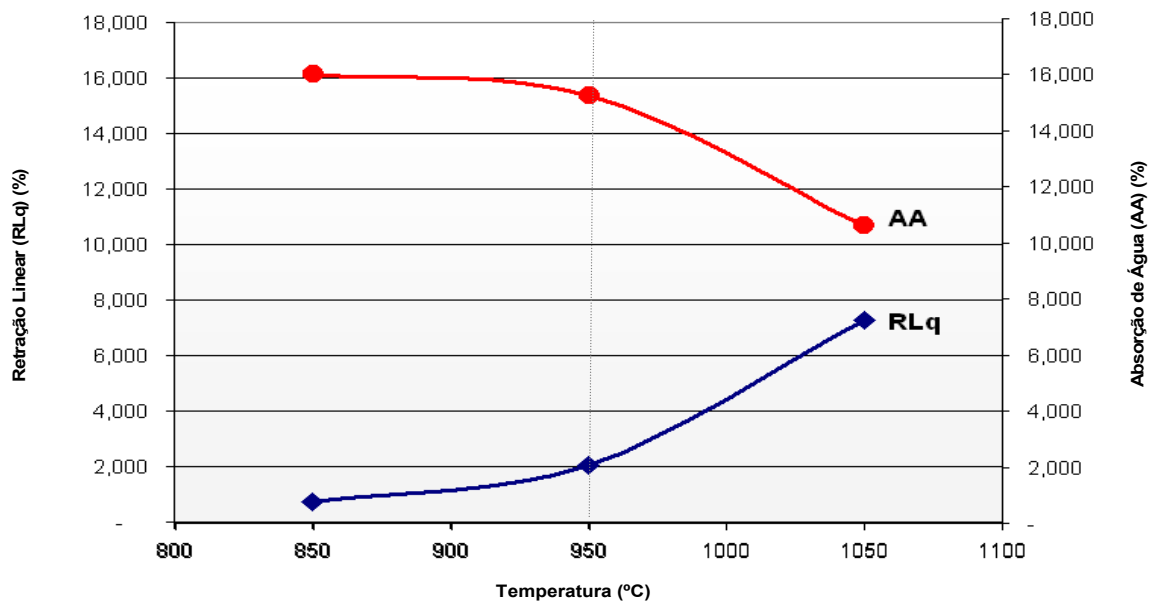


Figura 4.14: Curvas de Gresificação 100% argila

Os corpos sinterizados sem adição dos rejeitos cerâmicos (100% argila) apresentaram 0,7% de retração linear a uma temperatura de 850°C e 10,6% de absorção de água a uma temperatura de 1050°C. Considerando a temperatura média para queima de 950°C, tem-se um percentual de absorção de água de 15,2% e retração linear de 2,0%.

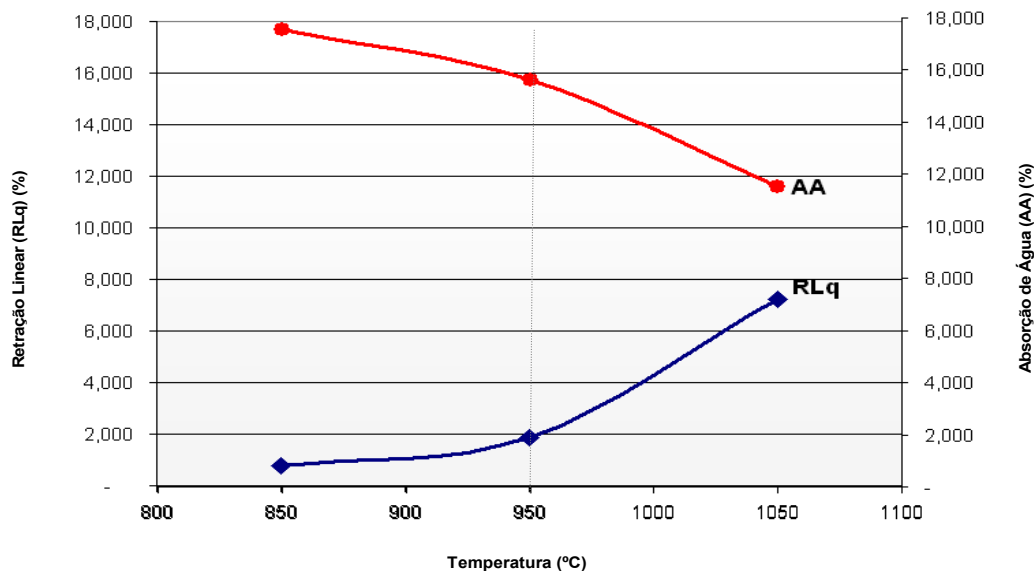


Figura 4.15: Curvas de Gresificação 5% em peso dos rejeitos cerâmicos

Os corpos sinterizados com 5% do seu peso de rejeitos cerâmicos apresentaram 0,8% retração linear a uma temperatura de 850°C e 11,2% de absorção de água a uma temperatura de

1050°C. Considerando a temperatura média de 950°C, tem-se um percentual de retração linear de 1,9% e absorção de água de 15,6%.

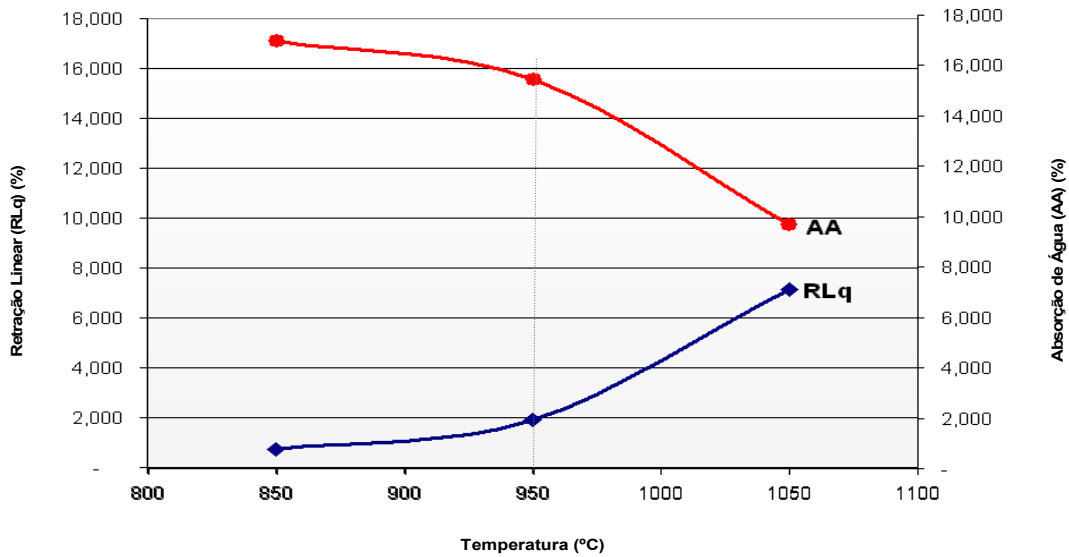


Figura 4.16: Curvas de Gresificação 10% em peso dos rejeitos cerâmicos

Os corpos sinterizados com 10% do seu peso de rejeitos cerâmicos apresentaram 0,7% retração linear a uma temperatura de 850°C e 9,7% de absorção de água a uma temperatura de 1050°C. Considerando a temperatura média de 950°C, tem-se um percentual de retração linear de 1,9% e absorção de água de 15,4%.

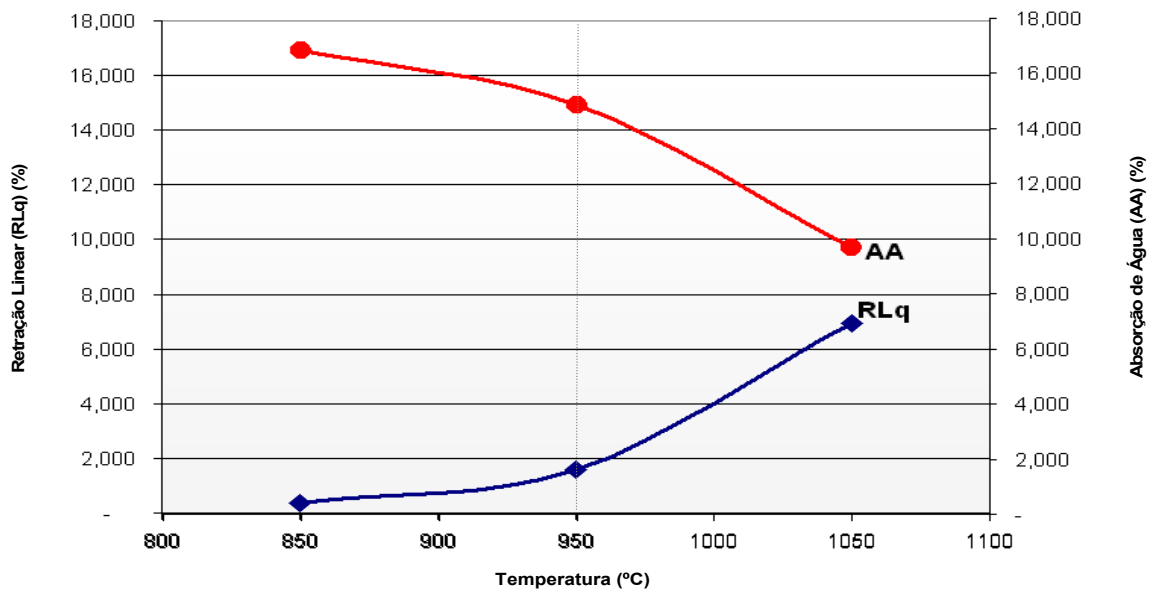


Figura 4.17: Curvas de Gresificação 15% em peso dos rejeitos cerâmicos



Os corpos sinterizados com 15% do seu peso de rejeitos cerâmicos apresentaram 0,3% retração linear a uma temperatura de 850°C e 9,7% de absorção de água a uma temperatura de 1050°C. Considerando a temperatura média de 950°C, tem-se um percentual de retração linear de 1,6% e absorção de água de 14,9%.

Analisando as curvas de gresificação pôde-se constatar que as massas sinterizadas à 950°C, contendo 15% em peso de rejeitos cerâmicos, foram as que apresentaram melhor valor para gresificação, comparadas com as outras formulações.

Com os resultados dos ensaios de Fluorescência de raios X foram calculados os valores dos coeficientes de Schuen para as massas cerâmicas aqui analisadas, conforme tabela 4.8.

Tabela 4.8: Estimativa de temperatura de fusão a partir da fórmula de Schuen

Óxidos presentes	Concentrações em peso (%)					
	Argila	Rejeitos Cerâmicos	Massa M	Massa MH5	Massa MI+10	Massa MI+15
SiO <sub>2</sub>	57,880	52,373	57,880	57,605	57,329	57,054
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,442	22,703	24,442	24,355	24,268	24,181
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,296	10,616	10,296	10,312	10,328	10,344
K <sub>2</sub> O	3,900	5,180	3,900	3,964	4,028	4,092
TiO <sub>2</sub>	1,546	1,084	1,546	1,523	1,500	1,477
MgO	1,164	2,004	1,164	1,206	1,248	1,290
MnO	0,198	0,167	0,198	0,196	0,195	0,193
SO <sub>3</sub>	0,138	0,089	0,138	0,136	0,133	0,131
CaO	0,123	2,681	0,123	0,251	0,379	0,507
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,104	0,105	0,104	0,104	0,104	0,104
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,056	0,069	0,056	0,057	0,057	0,058
ZrO <sub>2</sub>	0,055	0,067	0,055	0,056	0,056	0,057
CuO	0,035	0,034	0,035	0,035	0,035	0,035
ZnO	0,020	0,029	0,020	0,020	0,021	0,021
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	0,019	0,015	0,015	0,015	0,016
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,014	0,020	0,014	0,014	0,015	0,015
NiO	0,013	0,033	0,013	0,014	0,015	0,016
Na <sub>2</sub> O	-	0,049	-	0,002	0,005	0,007
SrO	-	2,678	-	0,134	0,268	0,402
<b>Σ Óxidos (RO)</b>			<b>75,142</b>	<b>75,094</b>	<b>75,047</b>	<b>74,999</b>
<b>Temperatura de fusão (°C)</b>			<b>1356,579</b>	<b>1356,407</b>	<b>1356,235</b>	<b>1356,063</b>

Com os resultados obtidos com os cálculos dos coeficientes de Schuen e análise das inclinações das curvas de gresificação (retração linear) das massas estudadas, verificou-se que não houve alteração significativa da refratariedade nas amostras com adição de rejeitos cerâmicos.

## CAPÍTULO 5

---

### 5 CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados obtidos no presente trabalho, verificou-se que é possível gerar produtos de qualidade utilizando a combinação do resíduo cerâmico com a argila do Recôncavo Baiano. Isto facilitou a etapa de secagem e permite uma redução significativa da retração linear e absorção de água, além dos benefícios ambientais, vez que minimizam-se os impactos negativos causados à natureza pelos rejeitos cerâmicos produzidos no Recôncavo. Como conclusões específicas destaca-se:

1. a argila estudada apresenta uma composição química rica em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , com baixa concentração de Cão e é mista com concentrações de ilita e caulinita similares;
2. com o aumento do teor de rejeitos cerâmicos na massa cerâmica observou-se menores valores de retração linear. Esse fato está relacionado ao fenômeno de transformação química mineralógica durante a queima de material não-plástico;
3. com a adição de 15% em peso de rejeitos cerâmicos nas massas formuladas, entre as temperaturas 950° e 1050°C, observou-se valores de absorção de água em relação à argila pura. Esse fato está relacionado à menor perda de massa dos rejeitos cerâmicos em comparação com a argila. Um fenômeno inverso acontece com a massa específica aparente, devido ao fechamento da porosidade aberta;
4. com a incorporação de rejeitos cerâmicos, foi observado que entre as temperaturas de 850° e 950°C a absorção e a retração linear sofreram alterações, e a partir de 950° ocorreu uma mudança brusca no momento da retração linear e redução de absorção de água em função do processo de vitrificação;
5. os corpos com incorporação dos rejeitos cerâmicos aumentaram significativamente os valores da resistência mecânica comparados aos da argila. Verificou-se que a resistência mecânica acompanhou o teor de rejeitos

6. analisando as curvas de gresificação pôde-se constatar que as massas sinterizadas à 950°C, contendo 15% em peso de rejeitos cerâmicos (MI+15), foram as que apresentaram melhor valor para gresificação. Verificou-se que não houve alterações significativas na refratariedade em todas as amostras.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. adição de outras matérias-primas (caulim, resíduos de chaminés, e outros) na massa cerâmica, visando melhorias em suas propriedades e maior aceitação comercial;
2. estudo do ciclo de reutilização dos rejeitos cerâmicos na formulação de massas, a fim de garantir suas propriedades e melhoria do produto final;
3. estudo de sinterização de massa cerâmica com adição de rejeitos cerâmicos em outras localidades do Recôncavo Baiano, visando diversas aplicações.

## REFERÊNCIAS

1. ABC – Associação Brasileira de Cerâmica. <http://www.abceram.org.br> - 2006.
2. ALBERS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B., BOSCHI, A. O.. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios-x. São Carlos, SP, 2002.
3. BORBA, Cristina D. G. ; NETO, Joao B. R. ; OLIVEIRA, Antônio P. N. ; ECHUDE, Elza C. F. ; ALARCÓN, Orestes E. Estudo de matérias-primas fundentes. Cerâmica Industrial, 1 (34-39) Março/Abril, 1996.
4. BARBA, Antônio; FELIÚ, Carlos; GARCIA, Javier. Matérias primas para la fabricación de suportes de baldosas cerâmicas, 2ª edición, Castellon, Espanha, 2002.
5. BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. (1996) Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Salvador, Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, SGM. 400 p.
6. CARDOSO, B.R. VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S.N.. Cerâmica Informação, 2002.
7. ELIAS, A Fabricação de Materiais Cerâmicos, Econotermia Cerâmica, S.L., Barcelona, 1995
8. FILHO, Conceição, V.M.;Moreira, M. D., Projetos argilas cerâmicas do Recôncavo: textos e mapas. Salvador, CBPM, 2001.
9. FILHO, Conceição, MONACO, Valter. Deposito de Argila no Recôncavo Baiano, Companhia Baiana de Pesquisas Minerais, Salvador, CBPM, 2001.
10. FREITAS, Fernando César Garcia de Freitas. Análises termográficas na queima de cerâmica vermelha, em fornos intermitentes a gás GLP, da região de Ceará-Mirim. Natal, RN, 2003.
11. GIARDULO, Paschoal, Caio, O nosso livro de cerâmica, Pólo Produções, 1ªed., São Paulo, 2005
12. GIOLITO, I. e IONHASHIRO, M.. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. São Paul-SP, 2002.
13. GOMES, Celso F.. A Argila “o que são e pra que serve”. Lisboa-Portugal, 1986.

14. GUETO, Juan Morales, Tecnologia de los Materiais Cerâmicos, Comunidad de Madrid; Diaz de Santos, 2005
15. MACHADO, Miriam F., MACHADO, Sandro L.. Mecânica dos Solos I: Conceito Introdutório, Salvador, Ba, 2004.
16. MELO, Maxymme M.. Formulação e caracterização de massas de grês Porcelanato preparadas a partir de matérias-primas Naturais do rio grande do norte e com adição de Chamote de telhas, Natal, RN, 2006.
17. NETO, Pedro M., MANSO, Edison A.. Uma abordagem da granulometria da argila porosa colapsível de Brasília utilizando o granulômetro a laser, Goiânia-GO, 2003.
18. NEVES, L.E.. Estudo Prático de argilas por didratometria de Raios-X – Boletim Técnico da Petrobrás, 1968.
19. NORTON, F. H.. Introdução à tecnologia cerâmica, São Paulo; Edgar Blucher, 1973.
20. RIES, H. Clays: Occurrence, properties and uses. 3ª ed. Wiley, 1928.
21. SÁNCHEZ, Muñoz, L.; Cava, S. da S.; Paskocimas, C. A.; Cerisuelo, E.; Longo, E.; Carda, J. B. Modelamento do processo de gresificação de massas cerâmicas de revestimento. Castellon, Espanha, 2002.
22. SANCHEZ, Muñoz, L.; Carda, J. B. Matérias Primas y aditivos cerâmicos, Castellón, Espanha, 2003.
23. SANTOS, Antônio C. P. Queima de cerâmica vermelha em fornos a gás resistivo. Dissertação de mestrado. Natal, RN, 2003.
24. SANTOS, P.S., BER KAPEZ, I. E., SOUZA SANTOS, H.L.. Características físico-químicas e cerâmicas de argilas e caulins do nordeste de Pernambuco, São Paulo-SP, 1989.
25. SANTOS, Pérsio S.. Ciência e tecnologia das argilas. Ed. Edgard Blücher. São Paulo-SP, 1992.
26. VARGAS, Milton, Introdução à mecânica dos solos, São Paulo, Ed. Da USP, 1977.
27. VICENTI, J., VILANOVA, D.L., MADRUGA, T.P. e BERGMANN, C.P.. Anais do 55º Congresso anual de ABM, Rio de Janeiro, RJ, 2000.
28. VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S.N., FILHO, J. D.. Cerâmica Industrial, Rio de Janeiro, 2001.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)