



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
Faculdade de Engenharia**

**APROVEITAMENTO DE REJEITOS ORIUNDOS DA EXTRAÇÃO DE MINÉRIO
DE FERRO NA FABRICAÇÃO DE CERÂMICAS VERMELHAS.**

DENYSE MEIRELLES NOCITI

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Elson de Campos
Co – Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá
2011

N758a Nociti, Denyse Meirelles
Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas / Denyse Meirelles Nociti – Guaratinguetá : [s.n], 2011.
110 f : il.
Bibliografia: f. 95-101

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Elson de Campos
Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Cerâmica (Tecnologia) 2 Argila I. Título


CDU 666.3(043)

DENYSE MEIRELLES NOCITI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ELSON DE CAMPOS
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
Unesp-Feg


Prof. Dr. DUCINEI GARCIA
Universidade Federal de São Carlos

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES
DENYSE MEIRELLES NOCITI

NASCIMENTO	18.04.1961 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	Deny Nociti Thereza Aparecida Meirelles Nociti
1994/1997	Curso de Graduação Desenho Industrial - FATEA
1998/2001	Curso de Graduação Engenharia Civil – FEG - UNESP

DEDICATÓRIA

À minha família, que nestes anos todos incentivou, apoiou, esteve ao meu lado nos momentos bons e ruins e me fez ver a importância da conclusão deste trabalho, em especial aos meus queridos filhos Ingridy, Caroliny e Caio, aos meus amados netos Pedro e João, aos meus pais e a minha irmã Claudia que onde estiverem com certeza sempre estiveram ao meu lado, aos meus irmãos e amigos Tereza e Deny e a minha querida prima Rosangela.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força e por estar ao meu lado sempre;

Ao Prof. Dr. Elson Campos, meu orientador, que com o seu brilhantismo e notável conhecimento não mediu esforços para orientação deste trabalho;

Ao prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira, meu co-orientador, pela valiosa colaboração e apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho;

À minha “eterna orientadora” profa. Dra. Rosa Maria Bittencourt que, além de amiga, foi quem me incentivou estes anos todos ajudando a transformar um sonho em realidade;

Ao Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimito, que, além de oferecer sua amizade, me ofereceu constantes ensinamentos que muito contribuíram para vencer as diversas etapas desta jornada;

A todos os professores e funcionários desta entidade que, direta ou indiretamente, ajudaram na realização deste trabalho, em especial ao Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões do Departamento de Engenharia Civil, ao Domingos Hasmann Neto, responsável pelo laboratório do departamento DMT/FEG e ao Flavio Augusto Bernardes responsável pelo laboratório do departamento DEC/FEG;

Aos meus amigos, pelo apoio moral que recebi durante a realização deste trabalho, principalmente as minha amigas e “irmãs”: Maria Inês, Sonia, Renata, Ana Helena e Mara;

À **UNESP** que, ao abrir as suas portas e colocar à minha disposição recursos físico, humano e financeiro, possibilitou o meu engrandecimento pessoal e intelectual;

À Industria Cerâmica e a Mineradora que me forneceram todo o material que foi estudado neste mestrado.

“Você pode sonhar, criar, desenhar e construir o lugar mais maravilhoso do mundo. Mas é necessário ter pessoas para transformar seu sonho em realidade”

Walt Disney

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas.** 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a avaliação da viabilidade de adicionar uma quantidade específica de rejeito proveniente da mineração de ferro na massa cerâmica, mantendo sua trabalhabilidade e minimizando um problema ambiental. Dois rejeitos foram escolhidos para esta avaliação. Estes foram fornecidos por uma mineradora que produz aproximadamente 640.000 toneladas/mês de rejeito arenoso e 450.000 toneladas/mês de rejeito lama. Na pesquisa foram usados argila e carvão provenientes da região de Guaratinguetá, que são matérias-primas normalmente utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos. As caracterizações da argila e dos rejeitos foram realizadas por meio de análises de fluorescência de raios-X, difração de raios-X, análise granulométrica, análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG). Para determinação da proporção do rejeito (arenoso ou lama) que deveria ser adicionada à massa cerâmica foram realizados ensaios de limite de liquidez e de plasticidade. Estes ensaios consideraram amostras sem adição, e, separadamente, amostras contendo diferentes porcentagens de rejeito misturado à argila. Após os testes, as proporções de 7,5% e de 5,0%, respectivamente, dos rejeitos arenoso e lama se mostraram as mais adequadas, pois mantêm a trabalhabilidade do material próxima àquela da massa cerâmica original. Após a determinação da quantidade ideal, todas as amostras foram conformadas por prensagem uniaxial e sinterizadas à 900°C, temperatura esta comparável à utilizada pela indústria cerâmica para fabricação dos blocos. Para a caracterização dos corpos cerâmicos sinterizados utilizou-se técnicas de rugosimetria, determinação de porosidade e de densidade aparentes e resistência à flexão por três pontos. Os resultados, após trabalho estatístico por meio do método de Weibull, demonstraram que a agregação de rejeitos nas quantidades especificadas permitem a fabricação de blocos cerâmicos para vedação, isto é, sem função estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: cerâmica vermelha; rejeito arenoso; rejeito lama; argila; bloco cerâmico; rejeito de mineração de ferro; reciclagem.

NOCITI, D. M. **Use of wastes from iron mining in the production of red ceramic.** 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

ABSTRACT

The aim of this experience is to evaluate the viability of the addition of a specific amount of iron mining residue into the red ceramic blend, keeping its workability and minimizing environmental problems. Two sorts of residues were chosen to be tested. Both residues were supplied by a mining company, which produces approximately 640,000 tons of sand like waste and 450,000 tons of mud waste per month. In this research we used the red ceramic blend mass and the coal from the region of Guaratinguetá; these materials are commonly used to produce clay block brick. Analyses by X-Ray Fluorescence, X-ray diffraction, granulometry, differential thermal (DTA) and thermogravimetric (TGA) were carried out in order to characterize the raw material (clay and the mining wastes). Liquid and plastic tests were done in order to determine the waste ratio that should be added to the ceramic mass. We produced samples of ceramic with and without the waste addition, tested for different ratios. After the tests, the amounts of 7.5% for the sand like residue or 5.0% for the mud residue were considered to be the most appropriate ones. All the samples were formed by uniaxial pressing and sintering to 900°C, like the temperature used to produce ceramic blocks. The three points flexural, perfilometry, porosity and apparent density tests were used to characterize the ceramics. The results, after the statistic work by Weibull method, pointed to a positive use of waste mixture into the ceramic mass. Adding the correct amount of residues in the red ceramic mass, it is possible to produce red brick for sealing purposes, in other words, with no structure function.

KEYWORDS: red ceramic; sand like residue; mud residue; clay; red brick; iron mining, waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- a) Materiais cerâmicos: telhas, tijolos, pisos, elemento vazado (Manfredini e Schianchi, 2011) – b) Materiais cerâmicos decorativos e utensílios domésticos (Campo Maior, 2011).	26
Figura 2	- Pisos e revestimentos cerâmicos (Dicico, 2011)	27
Figura 3	- a) Louças sanitárias (Comercial Teles, 2011) – b) Louça de mesa (Cerâmica Art Rio, 2011)	27
Figura 4	- Tijolos refratários (Show de telhas, 2011)	28
Figura 5	- Vermiculita expandida (OLX, 2011)	28
Figura 6	- Fibra cerâmica (Support, 2011)	29
Figura 7	- Corantes (Lado B Estudio, 2011)	30
Figura 8	- Oxido de Alumínio (Look for diagnosis, 2011)	30
Figura 9	- Cerâmica de alta tecnologia (Ceraltec cerâmica de alta tecnologia)	31
Figura 10	- Esquema do processo produtivo de produtos cerâmicos (Juliato, 1995 apud Chaves 2009)	44
Figura 11	- Moinho de bolas descontínuo (D – diâmetro interno). Adaptado de Ribeiro (2001)	49
Figura 12	- Esfera aderida à parede.	50
Figura 13	- Esquema das forças de Empuxo e Peso	58
Figura 14	- Fluxograma apresentando a preparação e as análises das amostras	63
Figura 15	- Materiais usados: (a) argila retirada do rio no Bairro Santa Luzia e (b) carvão	64
Figura 16	- Mapa geológico unidades litoestratigráficas	65
Figura 17	- Camadas de solo de onde é extraída a argila usada na cerâmica (Foto Denyse Meirelles Nociti)	66
Figura 18	- Método de seleção do solo	67
Figura 19	- Rejeitos utilizados: a) arenoso e b)rejeito lama	68
Figura 20	- Moinho utilizado: a) Moinho de bolas da marca Los Angeles e b)12 esferas de aço utilizadas dentro do moinho.	68
Figura 21	- Em (a) preparação da pasta para o ensaio de Limite de Liquidez,	72

	em (b) pasta na concha do aparelho Casagrande	
Figura 22	- Em (a) rolou-se o solo com a palma da mão, em (b) bastonetes com 3mm e aparecimento de fissuras e em (c) coloca-se o trecho fissurado do bastonete em uma cápsula de alumínio numerada.	73
Figura 23	- Em (a) preparação do material particulado, em (b) molde de aço 4340, em (c) colocação do pó no molde, em (d) distribuição do pó no orifício do molde	75
Figura 24	- Em (a) prensagem do pó – prensa uniaxial e (b) sinterização das amostras em forno mufla.	76
Figura 25	- Em (a) medida do comprimento com paquímetro digital, em (b) medido da largura com paquímetro digital.	77
Figura 26	- Balança analítica com suporte para determinação da massa imersa	78
Figura 27	- Situação típica para o ensaio de flexão de três pontos, Marca EMIC – carga 20 kgf	78
Figura 28	- Rugosímetro portátil modelo Surfctest 301 – marca Mitutoyo	79
Figura 29	- Exemplo de resultado da Seleção do Solo da argila Santa Luzia	80
Figura 30	- Difratoograma da amostra argila Santa Luzia, apresentando a identificação de quartzo, caulinita e muscovita	81
Figura 31	- Difratoograma da amostra rejeito arenoso, apresentando a identificação de quartzo e hematita	83
Figura 32	- Difratoograma da amostra rejeito arenoso, apresentando a identificação de quartzo, hematita e goetita	83
Figura 33	- Gráfico do limite de liquidez e índice de plasticidade	87
Figura 34	- ATG: a) material base, b) material base acrescido de 7,5% de rejeito arenoso e c) material base acrescido de 5% de rejeito lama	89
Figura 35	- ATD: a) material base, b) material base acrescido de 7,5% de rejeito arenoso e c) material base acrescido de 5% de rejeito lama	90
Figura 36	- Diagramas de Weibull, $\ln(\ln(1/(1-P)))$ em função do $\ln \sigma$	92
Figura 37	- Diagrama de Weibull, probabilidade em função da tensão de ruptura	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Principais minerais encontrados em jazidas naturais	45
Tabela 2	- Produção de rejeito/mês da Mineradora	47
Tabela 3	- Análise química do material particulado por fluorescência de Raios - X	84
Tabela 4	- Classificação granulométrica de partículas por peneiras	85
Tabela 5	- Caracterização das cerâmicas pelo método de contração e perda de massa	88
Tabela 6	- Valores da absorção de água, porosidade e massa específica e de rugosidade superficial das amostras.	91
Tabela 7	- Valores do módulo de ruptura e do módulo de Weibull.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing And Materials
DRX	- Difractometria de Raios-X
ATG	- Análise Termogravimétrica
ATD	- Análise Térmica Diferencial
AG	- Análise granulométrica
FRX	- Fluorescência de Raios-X
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TGA	- Thermogravimetric analysis
DTA	- Differential Thermal Analysis

LISTA DE SÍMBOLOS

#	- Meshes
ρ	- Densidade
σ	- Tensão de ruptura
σ_0	- Resistência característica do material que depende da função de distribuição
Al_2O_3	- Alumina
b	- Largura da amostra
$BaTiO_3$	- Titanato de bário
CaO	- Óxido de cálcio
$CaSO_4$	- Sulfato de cálcio
D	- Diâmetro interno do moinho
E	- Empuxo
fc	- Força centrífuga
Fe	- Ferro
g	- Aceleração da gravidade
h	- Espessura da amostra
K_2O	- Óxido de potássio
K_2SO_4	- Sulfato de potássio
L	- Vão maior
l	- Vão menor
m	- Módulo de Weibull
MgO	- Óxido de magnésio
$MgSO_4$	- Sulfato de magnésio
mi	- Massa imersa
MnO_2	- Óxido de manganês
ms	- Massa seca
mu	- Massa úmida
n	- Número de giros por minuto

Na_2O	- Óxido de sódio
NaSO_4	- Sulfato de sódio
n_c	- Frequência crítica
P	- Peso
Pi	- Peso imerso
Ps	- Peso seco
Q	- Carga aplicada
R_{3z}	- Rugosidade média no terceiro pico e vale
Ra	- Rugosidade média
Rt	- Profundidade total de rugosidade
SO_3	- Trióxido de enxofre
TiO_2	- Titânia
v	- Velocidade
V	- Volume
Vc	- Velocidade crítica
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	- Hematita

UNIDADES

°C	- Graus Celsius
g	- Grama
h	- Hora
kgf	- Quilograma
kgf	- Quilograma força
m	- Metro
min	- Minuto
MPa	- Mega Pascal = 10^6 Pascal
m ²	- Metro quadrado
mm	- Milímetro
m ² /g	- Metro quadrado por grama
s	- Segundo
m/min	- Metros por minutos
rpm	- Rotação por minuto
g/l	- Grama por litro
mesh	- Malhas por polegadas quadradas
g/cm ³	- Gramas por centímetros cúbicos
µm	- Micrometro= 10^{-6} m
TMS/mês	- Tonelada métrica seca/mês

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo	20
1.2 Estrutura de texto.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Breve história da cerâmica	23
2.2 Classificações das cerâmicas.....	26
2.3 Matérias primas	31
2.4 O material: Argilominerais.....	32
2.4.1 Origem e transformação da argila	34
2.4.2 Outros componentes da argila	35
2.4.3 Características da argila.....	37
2.4.4 Exploração das jazidas de argila.....	41
2.4.4.1 Adição de carvão à massa cerâmica	41
2.5 Processo produtivo	42
2.5.1 Esquema do processo produtivo.....	43
2.6 O minério de ferro	45
2.6.1 As reservas do minério de ferro no Brasil.....	46
2.6.2 Reabilitação de áreas alteradas.....	47
2.6.3 Moagem: método utilizado para a preparação dos rejeitos industriais	48
2.7 Caracterização do material particulado	51
2.7.1 Caracterização mineralógica pela difratometria de raios-X.....	52
2.7.2 Análise química por fluorescência de raios-X	53
2.7.3 Análise granulométrica - peneiramento.....	55
2.7.4 Análise térmica.....	56
2.8 Caracterização das cerâmicas	57
2.8.1 Perda de massa e retração linear.....	57
2.8.2 Porosidade aparente.....	57
2.8.3 Resistência mecânica e o método estatístico de Weibull	59

2.8.4 Rugosidade	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1 Materiais	63
3.1.1 Argila e carvão.....	64
3.1.1.1 Localização da jazida da argila utilizada na cerâmica	64
3.1.1.2 Método de seleção do solo	66
3.1.2 Rejeitos	67
3.1.2.1 Preparação dos materiais utilizados na pesquisa	68
3.2 Método para a caracterização dos pós	69
3.2.1 Análise de fase por difratometria de raios-X.....	69
3.2.2 Análise química por fluorescência de raios-X	69
3.2.3 Classificação granulométrica de partículas em peneiras	70
3.2.4 Análise térmica.....	70
3.3 Determinação da quantidade de rejeito a ser adicionado	71
3.3.1 Limite de liquidez e de plasticidade	71
3.4 Processamento	74
3.5 Caracterização das cerâmicas	76
3.5.1 Perda de massa e retração linear.....	76
3.5.2 Porosidade aparente.....	77
3.5.3 Resistência mecânica e estatística de Weibull	78
3.5.4 Rugosidade	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1 Material particulado.....	80
4.1.1 Método de seleção do solo	80
4.1.2 Difração de raios - X	81
4.1.3 Análise química por fluorescência de raios - X	84
4.1.4 Classificação granulométrica de partículas por peneiras	85
4.1.5 Ensaio de limite de liquidez e de plasticidade.....	86
4.2 Caracterização das cerâmicas	87
4.2.1 Contração e perda de massa	87
4.2.2 Análise térmica.....	88

4.2.3 Porosidade aparente e rugosidade	91
4.2.4 Resistência mecânica.....	91
CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	95
ANEXO A	102

1. INTRODUÇÃO

A adição de rejeitos industriais em cerâmica vermelha ou em processos na construção civil vem sendo estudada há alguns anos, sendo exemplo destes estudos: a utilização de escória de cobre na fabricação de tijolos maciços em solo-cimento (NEM 1995); a utilização de resíduos de granito em forma de pó (NEVES et al., 2000); a adição de cinza de casca de arroz (BRETANHA, 2000); o uso do lodo de curtume (BASEGIO et al., 2001); a utilização de vidro em pó (PEREIRA FILHO et al., 2002); a utilização de lama industrial proveniente do corte de mármore e granito (SEGADÃES et al., 2003); a adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro (CHAVES, 2009), o aproveitamento de resíduos industriais/artesanais de pedra sabão (RANIERI, 2011); a incorporação de rejeitos de petróleo na produção da indústria cerâmica (ACCHAR et al., 2009) e a adição de boro em tijolos vermelhos (USLO; AROL, 2004); entre outros.

O uso de novas técnicas construtivas vem ao encontro com a conscientização do ser humano da importância da preservação da natureza. Sabe-se que rejeitos industriais são problemas no mundo todo, e que a reutilização destes pode garantir um menor impacto ambiental (ACCHAR et al., 2009).

Além disso, estes rejeitos, podem ser agregados a cerâmica gerando produtos que podem ser destinados a comunidades carentes para serem utilizados em suas obras, reduzindo o custo.

Segundo Chaves (2009), o Brasil possui uma variada produção de substâncias minerais, podendo-se destacar: ferro, ouro, chumbo, prata, carvão, agregados para a construção civil, gipsita e cassiterita. A atividade de extração mineral está intimamente relacionada com o meio ambiente em virtude do grande volume de material que é extraído e posteriormente transportado, gerando impactos ambientais significativos, caracterizado principalmente pelo grande volume de rejeitos.

A preocupação com a preservação do meio-ambiente, combinada com a falta de algumas matérias-primas, está impulsionando as pesquisas para reutilização ou adição dos rejeitos em processos industriais. Em muitos casos, a reutilização de rejeitos é dificultada pelas impurezas ou contaminações incorporadas durante seu

processamento, por isso, a preocupação de um estudo prévio da utilização ou adição de rejeitos em uma queima, pois podem, por exemplo, se transformar ou liberar materiais tóxicos, tornando-se um risco para as pessoas envolvidas no processo.

Segundo Basegio et al. (2001), a indústria de materiais cerâmicos apresenta um grande potencial para absorver os rejeitos sólidos industriais. Isto ocorre, basicamente, em função da heterogeneidade das matérias-primas utilizadas, geralmente argilosas. Em condições favoráveis de temperatura e concentração de reagentes, a argila absorve e reage com os metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas, reduzindo a toxicidade do material.

Um problema que pode surgir com a adição de rejeito da mineração de ferro é o aumento de sílica, danificando os equipamentos na extrusão, vitrificando a cerâmica, diminuindo a absorção tornando-a quebradiça e aumentando a temperatura de queima que pode exigir um maior consumo de combustível.

1.1 Objetivo

Os problemas sociais e ecológicos necessitam de grande atenção e todos os países devem buscar soluções que impeçam que catástrofes ambientais atinjam as nações. Neste contexto, qualquer solução para a utilização de um rejeito sem dúvida alguma é um grande passo.

O objetivo deste trabalho é a avaliação da viabilidade de adicionar uma quantidade específica de rejeito proveniente da mineração de ferro na massa cerâmica, mantendo sua trabalhabilidade e minimizando um problema ambiental, fabricar blocos alternativos de cerâmica vermelha, visando proporcionar um destino ecologicamente correto aos rejeitos e reduzindo a quantidade de argila para a fabricação destes.

Para atingir-se o objetivo, tem-se as seguintes metas:

- a) Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da argila utilizada na fabricação de cerâmica vermelha na região de Guaratinguetá e analisar o pó e a massa produzida com essa matéria prima.

b) Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de dois rejeitos, o arenoso e o lama, gerados pela mineradora, realizando ensaios como: análise de resíduos, difração de Raios X, análise química, índices de elasticidade e plasticidade, umidade, variação dimensional, absorção d'água e resistência à flexão.

c) Quantificar a porcentagem separadamente dos dois rejeitos que poderão ser incorporados na massa cerâmica para a produção dos blocos.

d) Comparar amostras da matéria prima (argila e carvão) usada na cerâmica da região de Guaratinguetá, com e sem rejeitos.

1.2 Estrutura do Texto

O texto é composto de cinco capítulos:

No primeiro capítulo tem-se a introdução: contextualização do problema, objetivose estrutura do texto.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica abordando temas como o processo de fabricação, as características da cerâmica vermelha e uma descrição sobre os rejeitos.

Os ensaios realizados fazem parte do Capítulo 3. Os experimentos definidos para a pesquisa compreendem os de Flexão, Limite de Liquidez e Plasticidade, Difratometria de Raios-X, Fluorescência de Raios-X, entre outros. Esses ensaios possibilitam a caracterização física e mecânica da matéria-prima e dos corpos cerâmicos obtidos por meio das misturas.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos experimentos, ou seja, uma análise crítica dos resultados isolados de cada ensaio e depois uma análise conjunta dos resultados para uma maior compreensão das vantagens e desvantagens da adição do rejeito a massa cerâmica.

Capítulo 5 destina-se às considerações finais onde se apresenta uma síntese das principais análises efetuadas e conclusões obtidas no desenvolvimento da pesquisa, avaliando-se o atendimento dos objetivos propostos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao falar em cerâmica, pensa-se geralmente na arte proveniente do barro, levando-se em conta a etimologia da palavra. Entretanto, sob o ponto de vista técnico seu significado é muito mais amplo, pois abrange todos os produtos derivados de uma composição de argila e outras substâncias minerais, postos ao cozimento para obter solidez e inalterabilidade, além das chamadas cerâmicas avançadas ou de alta tecnologia.

Perde-se na poeira dos séculos a memória das primeiras cerâmicas. A palavra cerâmica vem do grego. Na antiga Grécia o oleiro era chamado “Kerameus”, e “Keramos” era o nome dado tanto à argila, como ao produto manufaturado, (PILLEGI – 1958).

De acordo com Kingery (1976) e com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM - 2011) define-se que cerâmica é a arte, ciência e tecnologia de fabricar e usar peças sólidas, as quais têm como componente essencial, e são constituídas em grande parte, por materiais inorgânicos não metálicos, denominados materiais cerâmicos.

Reed (1995) define cerâmica como a mais simples e, ao mesmo tempo, a mais difícil de todas as artes. A mais simples, por ser a mais elementar; a mais difícil, por ser a mais abstrata. Historicamente, encontra-se entre as artes mais primitivas. Os vasos mais antigos que se conhecem eram modelados à mão, em barro cru, tal qual eram extraídos da terra, e secos ao sol e ao vento.

Os primeiros artefatos cerâmicos foram feitos a partir de matérias - primas naturais. Fragmentos de cerâmica têm sido associados à locais de moradia humana desde os tempos mais antigos. De fato, tais fragmentos têm ajudado aos arqueólogos na determinação de níveis culturais (NORTON, 1973, 1975).

O uso de tijolos cerâmicos em construção data de quase cinco mil anos, sendo o mais antigo material fabricado pelo homem ainda em uso. Contudo, ao invés de tornar-se antiguidade, o produto cerâmico continua sendo largamente utilizado e geralmente é o material de construção preferido pelos usuários (ROMAN¹, 1999 apud GRUN 2007).

2.1 Breve história da cerâmica

As primeiras civilizações descobriram que as argilas quando em contato com água tornavam-se plásticas e podiam ser moldadas, as peças então sofriam secagem ao Sol e depois eram endurecidas quando colocadas no fogo. A argila queimada surgiu independentemente em diversos povos, ao invés de haver se originado de um determinado local (NORTON, 1975).

No Brasil, há mais de 2000 anos, antes mesmo da sua “descoberta” pelos portugueses, já existia a atividade de fabricação de cerâmicas, representada por potes, baixelas e outros artefatos cerâmicos.

A cerâmica mais elaborada foi encontrada na Ilha de Marajó; do tipo marajoara, tem sua origem na avançada cultura indígena da Ilha. Entretanto, estudos arqueológicos indicam que a presença de uma cerâmica mais simples ocorreu na região amazônica, há mais de 5000 anos atrás. (SEBRAE, 2011).

Por outro lado, a argila sob a forma de lama ou sob a forma de tijolos de lama, misturada com folhas secas ao Sol, foi usada na construção de habitações e monumentos. Alguns destes monumentos perduram com tijolos há mais de 4000 anos. Convém referir que o uso de fornos para queima de tijolos de argila está reconhecido desde 8 a 7 milênios a. C. (GOMES², 1986 apud CHAVES, 2009).

Na Galiléia, entre os assírios, sabe-se da construção de palácios usando o tijolo cozido. Sua técnica era apurada e usavam o tijolo para as obras monumentais.

¹ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G.; ALARCON, O. Alvenaria Estrutural em Cerâmica, **Cerâmica e Informação**, v. 2-3, p. 73-80, 1999 apud GRUN, E. **Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina. 2007.

²GOMES, C. F. **ARGILAS – O que são e para que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986 apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

Entretanto para outros povos, como na Pérsia e no Egito, servia ele nas construções populares. Nas pirâmides foi usada a pedra, mas os operários viviam em casas de tijolos.

A civilização romana conquistou o mundo e levou para todo o seu império, seus conhecimentos cerâmicos. Mais tarde, este material foi valorizado pelos árabes, pois o seu uso caracteriza a arquitetura maometana. Pode-se vê-la espalhada pela Espanha, na Mesquita de Córdoba, na Porta de Bisagra, em Toledo e na Alcazaba em Granada.

A identificação de objetos cerâmicos e os processos de fabricação, usados atualmente, surpreendem pela antiguidade, especialmente as contribuições do começo da Era Cristã, em Roma e na China. Nota-se também o grande desenvolvimento na Europa no século XVIII e, finalmente, o grande desenvolvimento no fim do século XIX e começo do século XX, quando a ciência e engenharia foram aplicadas a essa arte antiga (NORTON, 1973).

Na Inglaterra, sabe-se que a partir de 1666, depois de grande incêndio que destruiu grande número de casas de madeira, o uso de tijolo passou a ser priorizado.

No Brasil, por ser um país territorialmente muito grande fica difícil determinar com precisão as regiões onde surgiram suas primeiras manifestações no domínio da olaria. O pouco que se sabe a respeito foi dado através das peças cerâmicas que nos legaram. Apesar das investigações levadas a cabo por muitos ceramógrafos, não seria possível precisar com segurança, a região exata em que se fabricaram peças de cerâmica pela primeira vez no Brasil.

Segundo Frota (1986), no Brasil o uso do tijolo aparece na época colonial. Sua fabricação artesanal remonta ao trabalho catequético dos jesuítas, a partir de 1583, quando chegando à Colônia, começaram a construção dos colégios e conventos.

Segundo Bellingieri (2005), objetos cerâmicos, tais como vasos, potes, telhas e tijolos, já eram produzidos no Brasil pelos indígenas e pelos colonizadores europeus, durante os períodos colonial e imperial. Tratava-se, entretanto, de uma produção artesanal.

A partir do final do século XIX que a cerâmica se organizou como “indústria”, em São Paulo, com o surgimento de olarias e fábricas de louças de barro, que produziam em série: telhas, tijolos, ladrilhos, vasos, potes, manilhas, etc.

A origem da cerâmica como atividade industrial teve como marco inicial as olarias, que já se faziam presentes em quase todas as cidades, e núcleos urbanos de São Paulo, desde as últimas décadas do século XIX.

Em geral, as olarias eram pequenos estabelecimentos que produziam, por processos manuais, inúmeros artigos, como tijolos, telhas, manilhas, vasos, potes e moringas.

No último quarto do século XIX a imigração italiana foi quem trouxe ao Brasil pedreiros e oleiros detentores de técnicas construtivas que deram início a história da habitação em alvenaria de tijolos em São Paulo.

A primeira fábrica de produtos cerâmicos do Brasil foi fundada em São Paulo, em 1893, por quatro irmãos franceses, naturais de Marselha com o nome de Estabelecimento Sacoman Frères, posteriormente alterado para Cerâmica Sacoman S.A., a qual encerrou suas atividades em 1956. O nome das telhas, conhecidas por “francesas” ou “marselhesas”, deve-se ao país de origem desses empresários.

A localização das empresas estava diretamente relacionada à proximidade da fonte da matéria-prima; as cerâmicas da Capital Paulista, por exemplo, estavam quase todas instaladas nas áreas de várzea do Rio Tiete, nos bairros de Água Branca e Barra Funda.

Em São Paulo, há referência de um forno e de uma olaria encontrados em uma fazenda no município de São Caetano do Sul, operada por escravos (MARTINS, 1988). Com a urbanização crescente, o surgimento dos produtos cerâmicos aumentou em todo o país e, depois da Segunda Guerra Mundial, a cerâmica vermelha experimenta grande avanço.

Entretanto, surgindo as estruturas metálicas e o concreto armado, o tijolo passa de estrutural para elemento de vedação. Posteriormente, desenvolveu-se o bloco cerâmico ou tijolo furado, reduzindo seu peso, melhorando as qualidades de isolamento térmico e acústico e aumentando suas dimensões que agilizaram o assentamento por m² na colocação. Atualmente, o material cerâmico continua presente nas lajes mistas, nas coberturas, nos pisos e recobrimento de paredes. Apesar do aparecimento de outros materiais de construção, os tijolos e blocos continuam em destaque, por sua resistência, durabilidade, estética, conforto e preço, vantagens que os

tornam competitivos no mercado. Portanto, o aproveitamento de rejeitos na produção de cerâmica vermelha é importante em função das aplicações destas.

2.2 Classificações das cerâmicas

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2011) adota a seguinte classificação:

Cerâmica vermelha – compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas), Figura 1a, e também utensílios de uso doméstico e de adorno como apresentados na Figura 1b;



Figura 1 - a) Materiais cerâmicos: telhas, tijolos, pisos, elemento vazado (MANFREDINI E SCHIANCHI, 2011).



b) Materiais cerâmicos decorativos e utensílios Domésticos. (CAMPO MAIOR, 2011).

Materiais de revestimento (placas cerâmicas) – são materiais usados na construção para revestimentos de paredes, pisos (Figura 2), bancadas, piscinas, tais como azulejos, pastilhas, porcelanato, grês e outras designações;



Figura 2 - Pisos e revestimentos cerâmicos (DICICO, 2011).

Cerâmica Branca – este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por base de cerâmica branca e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca de massa, necessária por razões estéticas ou técnicas. Com o advento dos vidrados opacificados, muitos dos produtos enquadrados nesse grupo passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características para uma dada aplicação, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração. Dessa forma é mais adequado subdividir este grupo em: louça sanitária (Figura 3a), louça de mesa (Figura 3b), isoladores elétricos, cerâmica artística e cerâmica técnica;



Figura 3 – a) Louças sanitárias (COMERCIAL TELES, 2011)



b) Louça de mesa (CERÂMICA ART RIO, 2011)

Materiais refratários – este grupo compreende uma diversidade de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperaturas e outras solicitações. Podem-se classificar os produtos refratários quanto à matéria-prima ou componentes químicos principais em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, magnésiano-cromítico, cromítico–magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, mulita, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

Isolantes térmicos – os produtos deste segmento podem ser classificados em:

a) *refratários isolantes* que se enquadram no segmento de refratários como exemplo na Figura 4;



Figura 4 - Tijolos refratários (SHOW DE TELHAS, 2011).

b) *isolantes térmicos não refratários*, compreendendo produtos como vermiculita expandida, Figura 5, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro, lã de rocha e lã ou fibra cerâmica, que podem ser utilizados, dependendo do tipo de produto, até 1100 °C;



Figura 5 – Vermiculita expandida (OLX, 2011)

c) *fibras ou lãs cerâmicas* que apresentam características físicas semelhantes às citadas no item “b”, porém, tais cerâmicas apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia que, dependendo do tipo, podem chegar à temperatura de utilização de 2000 °C ou mais. Figura 6 ilustra um tipo de fibra cerâmica.



Figura 6 – Fibra cerâmica (SUPPORT, 2011)

Fritas e corantes – estes dois produtos são importantes matérias-primas para cerâmicas que requerem determinados acabamentos.

Frita (ou vidro fritado) é um vidro moído, fabricado por indústrias especializadas a partir da fusão da mistura de diferentes matérias-primas. É aplicado na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Este acabamento tem por finalidade aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características.

Corantes constituem-se a partir de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos. Os pigmentos são fabricados por empresas especializadas, inclusive por muitas das que produzem fritas, cuja obtenção envolve a mistura de matérias-primas, calcinação e moagem. São adicionados aos vidrados ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes coloração, como mostrado na Figura 7.



Figura 7 – Corantes (LADO B ESTUDIO, 2011)

Abrasivos – são considerados como produtos cerâmicos por utilizarem matérias primas e processos semelhantes aos da cerâmica. Entre os produtos mais conhecidos podemos citar o óxido de alumínio eletrofundido, Figura 8, e o carbetto de silício.



Figura 8 – Óxido de alumínio (LOOK FOR DIAGNOSIS, 2011)

Vidro, cimento e cal – são três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

Cerâmica de alta tecnologia ou cerâmica avançada – Geralmente atribui-se ao desenvolvimento dos capacitores cerâmicos de titanato de bário (BaTiO_3) e às velas de ignição de alumina (Al_2O_3), na década de 40, o surgimento de um novo grupo de materiais chamados de cerâmicas avançadas. O aprofundamento dos conhecimentos da ciência dos materiais proporcionaram ao homem o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras e que passaram a exigir materiais com

qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou cerâmica avançada. Eles são classificados, de acordo com suas funções, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares. Os produtos deste segmento são de uso intenso e a cada dia tende a se ampliar. Como alguns exemplos, pode-se citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, como mostrado na Figura 9.



Figura 9 - Cerâmica de alta tecnologia (CERALTEC CERÂMICA DE ALTA TECNOLOGIA, 2011)

2.3 Matérias-primas

As matérias-primas necessárias à fabricação dos produtos cerâmicos originam-se na natureza. Algumas são incorporadas aos produtos em sua forma natural, outras são previamente beneficiadas e processadas.

As matérias-primas para produtos de aplicação em grande escala (tais como tijolos, concreto, refratários) recebem pouco ou nenhum processamento prévio, ao passo que aquelas que se destinam a produção de cerâmicas de alta tecnologia são intensamente beneficiadas. De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica

(2011), as matérias-primas empregadas na fabricação de produtos cerâmicos são classificadas em naturais e sintéticas.

As matérias-primas sintéticas são aquelas que, individualmente ou em mistura, foram submetidas a um tratamento térmico, que pode ser calcinação, sinterização, fusão e fusão/redução e as produzidas por processo químico.

2.4 O Material: argilominerais

Quimicamente, os minerais argilosos são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, geralmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos. Os minerais argilosos contêm também, matéria orgânica e sais solúveis (SANTOS, 1989). Esses minerais, de origem secundária, são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade do sistema argila-água (VIEIRA³ et al., 2006, apud CHAVES 2009)

Eles são a mistura de substâncias minerais resultantes, principalmente, da desagregação do feldspato das rochas ígneas e metamórfas, por ação da água e gás carbônico. Como as rochas ígneas e os feldspatos são de diversos tipos, há também diversos tipos de argilomineraias. Ocorrem, então, depósitos de natureza extremamente variada. Não existem duas jazidas de argila rigorosamente iguais. Às vezes há diferenças acentuadas até numa mesma jazida.

Os argilominerais são filossilicatos hidratados que se apresentam em forma de cristais muito pequenos (<4-8 μ m) em forma de lâminas hexagonais ou fibras. A estrutura cristalina desses minerais, com poucas exceções, consiste de um arranjo de folhas, formando as camadas, o que justifica a denominação de silicatos em folhas ou filossilicato. As camadas individuais são compostas de duas, três ou quatro folhas com

³VIEIRA, C. M. F. et al. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades de queima de cerâmica argilosa**. 17^o CBECIMat. Paraná. 2006 apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

estruturas tetraédricas de SiO_2 e estruturas octaédricas de brucita $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$. Formam-se diferentes argilominerais dependendo do tipo de combinação destas estruturas. Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água, desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica, retração linear de secagem e compactação. Os principais grupos de argilominerais são a caulinita, a montmorilonita e a illita. (GRUN, 2007).

A caulinita é o argilomineral mais comumente encontrado nas argilas. A estrutura básica é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita são as mais refratárias. A montmorilonita é caracterizada por partículas extremamente finas, sua fórmula geral é dada por $(\text{OH})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$. Sua principal característica é a capacidade para absorver moléculas de água entre as camadas e devido a isto, argilas ricas neste argilomineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade.

As illitas apresentam uma parte do silício substituído por alumínio, além de conter mais água entre as camadas e ter uma parte do potássio substituído por cálcio e magnésio. Sua composição química exata é de difícil determinação devido ao fato de apresentarem sempre contaminação por impurezas de difícil eliminação. Por possuírem potássio em sua estrutura, apresentam uma boa resistência mecânica após a sinterização.

Além dos argilominerais, as argilas têm suas propriedades definidas em função da presença de sílica, carbonatos, feldspatos, talco, micas, compostos de ferro e titânio, além de sais solúveis e matéria orgânica.

Segundo Gomes (1986), a importância e diversidade do uso das argilas são consequência de características específicas destes materiais onde se destacam:

1. granulometria muito fina e forma anisométrica dos minerais argilosos (lamelar, tubular ou fibrosa) com relação diâmetro/espessura (placas) e comprimento/diâmetro (fibras e tubos) muito elevadas;
2. diversidade química e estrutural dos minerais argilosos;

3. grande e variada superfície específica (5 a 200 m²/g); são rochas que no estado natural são finamente divididas não necessitando, em regra, de moagem para serem utilizadas;
4. capacidade de troca iônica devido essencialmente a substituições isomórficas (por ex.: Al³⁺ substituindo Si⁴⁺ e Mg²⁺ substituindo Al³⁺); os défices consequentes da carga elétrica cristalina são balanceados pela fixação reversível dos chamados cátions de troca (por ex.: Na⁺, K⁺, H₃O⁺, Ca²⁺);
5. dispersão fácil em água ou outros solventes proporcionando suspensões estáveis ou instáveis quimicamente e com uma gama ampla de propriedades reológicas;
6. inerte química e forte poder absorvente;
7. dimensão apreciável e boa homogeneidade da maior parte dos depósitos ou jazidas; beneficiação, isto é, separação fácil de impurezas utilizando em regra a via úmida e ainda a exploração fácil dos depósitos (regra geral a céu aberto).

2.4.1 Origem e transformação da argila

Formada pela alteração de certas rochas, como as que tem feldspato, a argila pode ser encontrada próxima de rios, muitas vezes formando barrancos nas margens. A argila origina-se da desagregação de rochas feldspáticas, por ataque químico (por exemplo pelo ácido carbônico) ou físico (erosão, vulcanismo), que produz a fragmentação em partículas muito pequenas.

Apresenta-se nas cores branca e vermelha. No solo a fração de argila, componente comum das lamas ou barro, como são conhecidos popularmente, é constituída de minerais do grupo das argilas aos quais agregam-se hidróxidos coloidais floculados e diversos outros componentes cristalinos ou amorfos.

Os tipos de depósitos de argilas podem ser localizados em diferentes situações geológicas. Bauer (1994) enumera as principais localizações:

- a) na superfície das rochas, como resultado da decomposição superficial das mesmas;
- b) nos veios e trincas das rochas;

c) nas camadas sedimentares, onde foram depositadas por ventos e chuvas.

Segundo Gomes (1986), a argila ocorre à superfície ou mais ou menos próximo da superfície da crosta terrestre e desaparece em profundidade como consequência da ciclagem da matéria mineral durante o ciclo das rochas.

O ciclo das rochas compreende cinco fases ou estágios:

- 1- As rochas situadas em zonas profundas da crosta são trazidas à superfície por ação dos movimentos crustais que constroem as cadeias de montanhas.
- 2- As rochas expostas à superfícies sofrem intemperismo e erosão.
- 3- Os produtos do intemperismo e da erosão são transportados, particularmente pela água, a maior ou menor distância e depositados em bacias sedimentares.
- 4- Os sedimentos são cobertos e recobertos por outros, acabando por se transformar em rochas sedimentares pelo processo denominado diagénese.
- 5- Os sedimentos modificados por diagénese sofrem efeitos de metamorfismo e de granitização (é a transformação das rochas sedimentares em granitos) transformando-se em xisto, gnaisse e granito.

Os minerais argilosos só aparecem nas três fases intermediárias do ciclo das rochas e a sua formação, fundamentalmente, tem lugar na 2ª fase, isto é, por efeito do intemperismo. Na 3ª fase, isto é, na sedimentação, os minerais argilosos podem ser transformado em outros. Na 4ª fase, sob a ação da diagénese, os minerais argilosos recristalizam progressivamente, acabando por desaparecerem.

2.4.2 Outros componentes da argila

O óxido de ferro, normal nas rochas ígneas, mistura-se, geralmente, com a caulinita e produz a cor vermelha ou amarelada da maioria das argilas. Em outros casos, forma pintas ou manchas. Ele reduz a sua propriedade de ser refratária.

Os principais compostos de ferro encontrados em argilas são a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). As argilas apresentam coloração avermelhada quando o ferro está presente na forma de hematita, e cor preta quando na forma de magnetita.

A sílica é um mineral cuja composição química contém somente silício na forma de óxido, pode se apresentar de diversas formas mineralógicas, onde a mais comumente encontrada é o quartzo. É utilizado para diminuir a plasticidade, aumentar a permeabilidade da peça a verde e controlar a retração. Pode-se dizer que o quartzo é o “esqueleto” ou seja, a estrutura da peça cerâmica (GRUN 2007).

A alumina livre, conforme o tipo pode aumentar ou diminuir o ponto de fusão. Ela reduz a plasticidade e a resistência mecânica, mas também diminui as deformações. Os álcalis baixam o ponto de fusão e dão porosidade, o que vem facilitar a secagem e o cozimento, mas também reduzem a plasticidade. O cálcio age como fundente e clareia a cerâmica. Os sais solúveis são perniciosos, porque dão eflorescência de mau aspecto.

Algumas argilas apresentam, em pequena quantidade, alguns compostos solúveis em água como os sulfatos de cálcio (CaSO_4), de magnésio (MgSO_4), de sódio (NaSO_4), de potássio (K_2SO_4), dentre outros sulfatos. A presença destes sulfatos pode provocar o aparecimento de eflorescências (depósitos de sais que apresentam cores e manchas indesejáveis).

A matéria orgânica, embora aumente a plasticidade, torna a argila mais porosa.

A água é elemento integrante das argilas sob três formas:

- a) água de constituição, também chamada absorvida ou de inchamento, que faz parte da estrutura da molécula;
- b) água de plasticidade, ou absorvida, que adere à superfície das partículas coloidais;
- c) água de capilaridade, também chamada água livre ou de poros, que preenche os poros e vazios.

Há inúmeros fatores variáveis nas composições das argilas, tanto assim que se pode dizer que não há duas amostras de argilas iguais. Em consequência disso é que se encontram, entre as cerâmicas, materiais tão diferentes como a porcelana fina, os

azulejos, os tijolos, o grês cerâmico, os refratários, etc. Entre elas há materiais absolutamente impermeáveis e também filtros.

2.4.3 Características da argila

Segundo Grim⁴ (1963 apud CHAVES, 2009) geralmente são os seguintes fatores que controlam as propriedades que uma determinada argila possui:

- Composição mineralógica dos minerais argilosos e não-argilosos (qualitativa e quantitativa) e distribuição granulométrica de suas partículas;
- Natureza e teor de componentes orgânicos;
- Características texturais das argilas, tais como forma dos grãos de quartzo, grau de orientação ou paralelismo das partículas dos minerais argilosos, silicificação;
- Teor em eletrólitos, quer de cátions trocáveis, quer de sais solúveis, qualitativa e quantitativamente.

As propriedades mais importantes das argilas são a plasticidade, a retração e o efeito do calor, como menciona Bauer (1994), sendo:

a) *Plasticidade*

Um corpo plástico é definido como o que pode ser continuamente deformado, sem que sobrevenha a ruptura, não possuindo limite de elasticidade e também não podendo ser encruado a frio. É esse o caso das argilas molhadas.

Juntando-se água levemente a uma argila, notam-se duas fases. No início ela se desagrega facilmente, e no final ela se liquidifica. O ponto de limite entre essas fases, ou seja, quando a argila não mais se desagrega, mas ainda não é pegajosa, é o ponto de maior plasticidade, varia com a argila.

⁴GRIM, R. E. **Algumas aplicações industriais dos estudos fundamentais sobre mineralogia das argilas**, Cerâmica, São Paulo, v. 9, n. 4, 1963. apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

Assim, a quantidade de água necessária pode ser de 10% para as argilas “gordas” ou de alta atividade e até 50% para as argilas “magras” ou de atividade baixa. (Refere-se à capacidade de troca de cátions da fração mineral, deduzida a contribuição da matéria orgânica. Atividade baixa – menor que 24meq/100g de argila). Na realidade, o que ocorre é que as partículas coloidais sempre têm grande atração, daí a plasticidade, mas essa atração pode ser anulada se a película de água intermediária é excessiva. Nesse caso, então, desaparecem a atração e a plasticidade.

Sabe-se também que as argilas de superfície são mais plásticas que as profundas, que receberam grande pressão, existem também substâncias que aumentam ou diminuem a plasticidade das argilas. Esses fatos são aproveitados para a correção na fabricação de componentes cerâmicos. A plasticidade depende também do tamanho, formato e comportamento dos grãos e da presença de outros materiais, além dos argilo-minerais.

b) *Retração*

Quando um bloco de argila é exposto ao ar, inicialmente, a velocidade de evaporação da água é igual a que teria a mesma superfície em água. Depois, a velocidade de evaporação vai diminuindo, porque as camadas externas, ao secarem, vão recebendo a água das camadas internas por capilaridade, de modo que o conjunto tende a se homogeneizar continuamente. Por isso as quantidades de água que migra das camadas internas são cada vez menores.

Em todo esse processo, no lugar antes ocupado pela água vão ficando vazios e, conseqüentemente, o conjunto retrai-se. Essa retração é proporcional ao grau de umidade e varia também com a composição da argila: quanto mais caulinita, maior a retração. No caulim, a retração é da ordem de 3 a 11%, enquanto que nas argilas, mais magras é de 1 a 6%.

Um efeito negativo da retração é devido a sua anisotropia, resultando em deformação não uniforme do bloco. Todos os fatores que aumentam a plasticidade também aumentam a retração, mas esses são considerados positivos para a plasticidade e negativos em relação à retração, variação dimensional.

c) *Efeitos do calor sobre as argilas*

Aquecendo-se uma argila entre 20°C e 150°C, ela somente perde a água de capilaridade e a que foi usada para torna-la maleável para ser trabalhada. De 150°C a 600°C, ela perde água absorvida, e a argila vai endurecendo. Até este ponto só houve alteração física.

A partir dos 600°C, começam as alterações químicas, em três estágios. Num primeiro estágio há desidratação química; a água da constituição também é expulsa, resultando o endurecimento, e as matérias orgânicas são queimadas. O segundo estágio é a oxidação quando os carbonetos são calcinados e se transformam em óxidos. A partir do terceiro estágio, há a vitrificação fato que ocorre a partir de 950°C. A sílica, de constituição e a das areias forma uma pequena quantidade de vidro, que aglutina os demais elementos, dando dureza, resistência e compactação ao conjunto. Aparece então à cerâmica propriamente dita.

A qualidade de uma peça cerâmica depende, acima de tudo, da qualidade do vidro formado. Como nos tijolos comuns a queima chega no máximo a 900°C esta vitrificação será pequena. Já nas porcelanas, por passarem por um processo de queima mais elevado, esta vitrificação será maior.

d) *Demais propriedades das cerâmicas vermelhas*

Em relação ao “peso”, por exemplo, há cerâmicas mais leves do que a água, e outras de grande “peso”. Volume aparente é o volume de água deslocado por uma peça já saturada por 24 horas de imersão. Peso específico aparente é a relação entre o peso da peça seca ao ar e seu volume aparente. A resistência ao desgaste depende muito da quantidade de vidro formado.

A absorção de água depende da compactação, das constituições iniciais. Chama-se absorção ou porosidade aparente a percentagem de aumento de peso que a peça apresenta após 24 horas de imersão em água.

A resistência mecânica depende muito da qualidade de água usada na moldagem. O excesso de água lava as partículas menores, que com mais facilidade fundirão para formar o vidrado.

e) *Fatores que degradam as cerâmicas*

As cerâmicas podem desagregar-se e isso é normalmente consequência de agentes físicos externos, agentes químicos internos e agentes mecânicos.

Os agentes físicos mais prejudiciais são a umidade, vegetação e fogo. Os dois primeiros agem através dos poros, e deduz-se daí a importância da porosidade que é um índice da qualidade do produto e de sua duração. O fogo é também altamente prejudicial para a cerâmica comum que tem sua resistência à compressão diminuída à medida que aumenta a temperatura. Como os componentes se dilatam sem uniformidade, o calor pode facilmente desagregar uma peça.

Os agentes químicos internos também podem ser altamente perniciosos. A umidade absorvida do ar pode vir a dissolver esses sais, os quais virão a se cristalizar na superfície, ocasionando o que se chama eflorescência.

Os agentes mecânicos, por seus esforços, podem destruir as peças. Geralmente as cerâmicas têm maior resistência à compressão do que à flexão e demais solicitações. Decorre daí seu emprego basicamente em elementos construtivos que devem resistir aos esforços de compressão. As cerâmicas também devem ter boa resistência ao choque, que é tão comum no transporte e no uso.

f) *Cerâmica para a Construção Civil*

Na indústria da cerâmica de construção, deve-se distinguir dois ramos distintos: o de olaria, que compreende a fabricação de tijolos e telhas comuns, e o de cerâmica que fabrica tijolos prensados, tijolos furados, ladrilhos, telhas prensadas, refratários, lajes manilhas, tubos, etc.

A matéria-prima para tais ramos industriais é encontrada em abundância no país, o que vem facilitar seu desenvolvimento, aliando a técnica empregada o esmero na fabricação dos produtos.

2.4.4 Exploração das jazidas de argila

Um estudo das características das jazidas minerais deve ser feito para saber o teor de argila, a composição granulométrica, a profundidade da barreira, a umidade e diversos outros fatores que poderão vir a influenciar no resultado final do produto.

No caso de locais onde existe muito carbonato de cálcio ou compostos sulfurosos, por exemplo, originarão cerâmicas muito fendilhadas e, caso existam muitos materiais orgânicos, estas serão muito porosas. A pesquisa para se saber o tipo de matéria prima é importante para suprir correções que se fizerem necessária.

Ressalta-se também a importância de se fazer a previsão do volume a ser retirado para que não haja prejuízo no meio ambiente.

2.4.4.1 Adição de carvão à massa cerâmica

Segundo Pracidelli (1997) as argilas de granulometria muito fina apresentam boa plasticidade, mas precisam de uma considerável quantidade de água para desenvolver completamente essa plasticidade. Em razão do seu alto grau de compactação, os canais internos existentes entre as partículas são reduzidos, dificultando a eliminação da água durante o processo de secagem. Com isso, ocorre aumento do gradiente de umidade no interior do produto, provocando fortes retrações diferenciais e deformações, aumentando as perdas no processo de fabricação. Para estes tipos de composição, o ciclo de secagem deve ser longo, com aquecimento lento no início, o que leva à redução da capacidade específica do secador.

Os desplastificantes reduzem o grau de compactação da massa, com diminuição da plasticidade das argilas. Sua introdução nas composições argilosas reduz as contrações sofridas pela massa, tanto nos processos de secagem como de queima. Para

que possam agir com eficácia sobre as características das argilas, devem apresentar granulometria acima de 60 μm e ser usados em quantidades moderadas.

Tipos de desplastificantes mais usados:

- a) Areia, com granulometria entre 50 e 500 μm ;
- b) Chamota, com granulometria entre 80 e 800 μm que, acima de 850°C, reage com o material argiloso;
- c) Pó de carvão: usado nas massas em teores de 1 a 2% que queima entre 500 e 600°C, proporcionando porosidade e reduzindo o consumo de combustível do forno.

O carvão, assim como outros compostos orgânicos, libera calor quando entra em combustão (reação exotérmica) em temperaturas entre 400 e 600°C. O calor gerado pela combustão deste material auxilia no processo de queima do material cerâmico promovendo economia de combustível.

2.5 Processo produtivo

Nos últimos anos do século XIX e início do XX houve um processo de especialização nas empresas cerâmicas, o que gerou uma separação entre olarias (produtoras de tijolos e telhas) e cerâmicas (produtoras de itens mais sofisticados, como manilhas, tubos, azulejos, louças, potes, talhas, etc.).

Santos⁵ (2002 apud CHAVES, 2009) descreve o processo produtivo da cerâmica vermelha, da seguinte forma:

- processo da matéria-prima: coleta, sazonalidade, estoque e mistura;
- processo de beneficiamento: misturador, laminador e misturador;
- processo da matéria-prima: coleta, sazonalidade, estoque e mistura;
- processo de beneficiamento: misturador, laminador e misturador;
- processo de fabricação: extrusão, corte e prensa;

⁵SANTOS, R. S; SOUZA, G. P; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural.** Cerâmica 48. pp.115-120. 2002 apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte.** 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

- processo de queima e inspeção.

As etapas de fabricação da cerâmica vermelha podem ser resumidas do seguinte modo:

- preparação da massa: separação da matéria-prima e homogeneização;
- caixão alimentador: separação da quantidade necessária à produção;
- desintegradores: incorporação de água, com variação de seu teor entre 6% e 25%, para evitar perda de eficiência;
- misturador: homogeneização da mistura;
- laminador: a massa é então amassada em formato de lâminas;
- extrusora ou maromba: compacta a massa plástica, numa câmara de alta pressão, à vácuo, em uma forma (molde) no formato do produto desejado;
- cortador: fino cabo de aço que corta a peça na dimensão desejada;
- secagem: a secagem pode ser natural (exposição das peças ao ar livre) ou forçada (secadores intermitentes ou contínuos);
- queima: peças secas são submetidas aos fornos para adquirirem as características e propriedades desejadas, que podem ocorrer nos seguintes tipos de fornos – de chama direta, tipo caipira, garrafão e caieira; de chama reversível tipo abóboda, Catarina, corujinha e paulista; contínuos do tipo Hoffman; do tipo túnel, e do tipo plataforma (intermitentes), tipo vagão ou gaveta (todos os tipos podem queimar lenha, bagaço de cana, óleo combustível, etc.);
- estocagem e expedição: após a retirada do forno, são inspecionados em um pátio, para a seleção das peças com defeito.

2.5.1 Esquema do processo produtivo

O esquema do processo produtivo de produtos cerâmicos é apresentado na Figura 10. Neste esquema apresenta-se basicamente todo processo desde a extração até a expedição

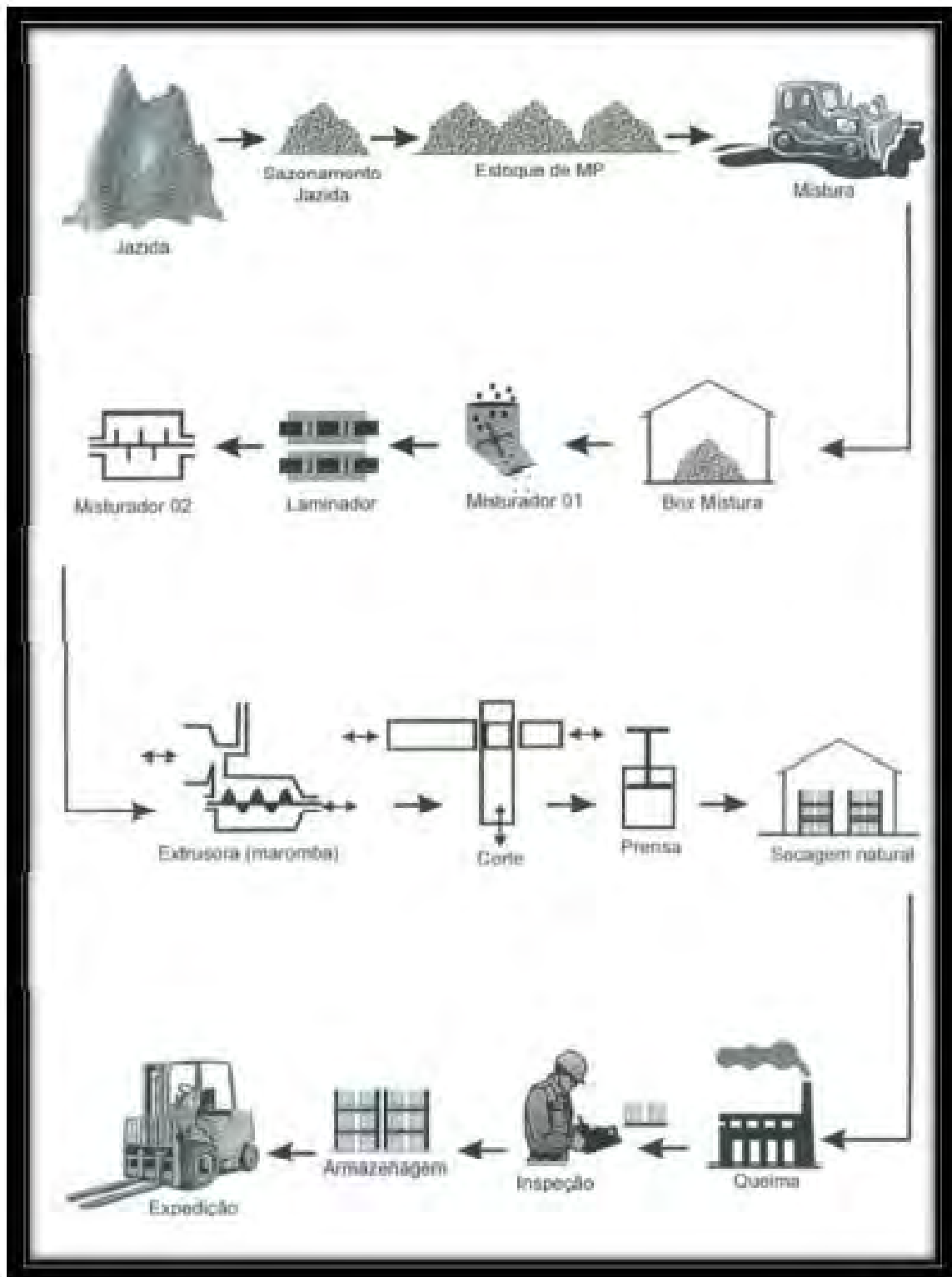


Figura 10 – Esquema do processo produtivo de produtos cerâmicos (JULIAOTO⁶, 1995, apud CHAVES, 2009).

⁶JULIATO, D. **Recomendações para implantação de uma fábrica de processamento de cerâmica vermelha.** Relatório técnico. Florianópolis, 1995 apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte.** 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

2.6 O Minério de ferro

O ferro existe na natureza geralmente sob a forma de óxidos, nos minérios de ferro, dos quais é extraído quase sempre por meio de um forte aquecimento em presença de coque ou carvão de madeira, fornos adequados, nos quais o óxido é reduzido e o ferro resultante ligado ao carbono. Forma-se assim uma liga de ferro e carbono que, depois de refinada, constitui a matéria prima para a fabricação da grande maioria das peças metálicas atualmente empregadas (COLPAERT, 1974).

Segundo Chaves (2009), o ferro (Fe) é um dos elementos mais abundantes da litosfera e se encontra na proporção de 5,6%. Existem cerca de 300 minerais de Fe, porém, somente os óxidos se encontram em concentrações elevadas e de aproveitamento mineral.

A Tabela 1 apresenta os principais minerais encontrados em jazidas naturais.

Tabela 1 – Principais minerais encontrados em jazidas naturais (CHAVES, 2009)

Minerais	Características
Hematita (Fe ₂ O ₃)	Contém 69,9% de Fe Principal mineral no Brasil Provém de sedimentos químicos que sofreram metamorfismo
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Contém 72% de Fe Fortemente magnética Encontrada em jazidas de origem magmática
Limonita (Fe ₂ O ₃ nH ₂ O)	Amorfa Formada pela alteração da magnetita e hematita
Siderita (FeCO ₃)	Mineral argiloso, raro como constituinte de minério
Pirita (FeS ₂)	É o mineral mais comum encontrado na natureza Por conter enxofre não é usado na obtenção de Fe, mas para obtenção de enxofre

2.6.1 As reservas de minério de ferro no Brasil

Segundo Ibram⁷ (2008 apud CHAVES, 2009) as reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançam 26 bilhões de toneladas, situando o país em quinto lugar em relação às reservas mundiais de 370 bilhões de toneladas. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de Fe contido no minério, o Brasil assume lugar de destaque no cenário internacional. Este fato ocorre devido ao alto teor encontrado nos minérios de hematita (60% de Fe), predominantemente no Pará (PA) e itabiritos (50% de Fe), predominante em Minas Gerais (MG). No Mato Grosso (MS) o maior teor é de minérios de hematita (63% de Fe), porém de baixa qualidade

Os rejeitos são oriundos do beneficiamento do minério de ferro. O material lavrado nas minas é o itabirito. Têm-se dois tipos de rejeito industrial no processo: o rejeito arenoso e o de lama.

O rejeito arenoso é proveniente da flotação convencional (onde ocorre a separação sílica-ferro). O rejeito de lama é oriunda da deslamagem (etapa inicial do beneficiamento) e da planta de finos (processo que tem por objetivo maior recuperação das partículas finas do ferro extraídas na desmoldagem, ou seja, o refinamento deste processo).

As características dos rejeitos variam em função do material lavrado e dos processos empregados no beneficiamento do mesmo, ou seja, da campanha que a empresa está empregando para atender as necessidades de seus clientes (maior ou menor porcentagem de sílica, de fósforo, etc.). Além disso, as características deles variam, na área de disposição/barragem, em função da distância do ponto de descarga/descarte. Maiores porcentagens de ferro, por exemplo, podem ser encontradas em amostras do rejeito arenosa localizadas mais próximas ao ponto de descarte (princípio da segregação).

⁷INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM, 2008.apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

Para amostras do rejeito fino (lama) localizadas em diversos pontos de uma área de disposição, a variação na composição química não é muito significativa, embora também ocorra.

Segundo informação da mineradora que forneceu os dois rejeitos para este trabalho nenhum rejeito é vendido. O rejeito arenoso é depositado em uma cava exaurida e nas áreas próximas de uma barragem. Por apresentar boas características de permeabilidade, o rejeito arenoso tem sido empilhado nestas áreas para estabilização/recomposição ambiental e como aterro de reforço para a desativação da barragem.

Já a lama, tem sido depositada em um reservatório, onde experimenta os processos da sedimentação e do adensamento.

A produção de rejeitos /mês é apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Produção de rejeito/mês da Mineradora

Rejeito Arenoso	640.000 TMS/mês
Rejeito de Lama	450.000 TMS/mês
TMS/mês: tonelada métrica seca/mês	

2.6.2 Reabilitação de áreas degradadas

As atividades econômicas podem causar alterações no meio ambiente. No caso da mineração, o processo industrial envolve a remoção da camada vegetal, do solo e das rochas que estão acima dos depósitos minerais. O grande desafio é a reabilitação desse ambiente. Para restaurar o equilíbrio ecológico nas áreas que sofreram o impacto de suas atividades, as empresas desenvolvem estudos e ações ambientais, em parceria com consultores externos e órgãos de ensino e pesquisa. Os programas envolvem desde a reabilitação das áreas mineradas e antigas estradas de acesso, *barragem de rejeitos e pilhas de estéril* a propostas pioneiras, incluindo o uso de bioindicadores como aves e abelhas nativas.

O trabalho de reabilitação começa com o plantio de espécies nativas, que vão atrair e manter aves e insetos polinizadores e dispersores de sementes, além de outros

animais. Existem projetos que auxiliam na manutenção da população de certas aves ameaçadas e reintroduz espécies consideradas extintas na região. Os resultados do monitoramento de fauna e flora mostram que as áreas reabilitadas já possuem bons níveis de sustentabilidade.

2.6.3 Moagem: método utilizado para a preparação dos rejeitos industriais

Segundo Ribeiro (2001) a moagem intermitente em moinhos de bolas é um processo de redução granulométrica, frequente na preparação de pastas cerâmicas (porcelana, faiança, grês, e terracota) e de vidrados. Habitualmente a sua utilização limita-se à moagem das matérias-primas vulgarmente designadas por não plásticas (ou duras), nomeadamente: areias, calcitas, dolomitas, feldspatos e fritas.

O objetivo de qualquer processo de moagem é a diminuição do tamanho das partículas de um material sólido, tendo em vista o aumento da superfície específica para melhorar a velocidade de reação de determinada matéria-prima (por exemplo, durante a queima), misturar de um modo mais uniforme vários materiais durante o processo de preparação de uma pasta e permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização (por exemplo nos corantes).

Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais ao longo do processo de fabricação, como por exemplo, no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas características finais do produto.

Os materiais refratários, por exemplo, são fabricados a partir de matérias-primas com distribuição granulométrica com tamanhos que podem variar de próximo de zero até 6 mm; as matérias-primas para fabricação de cerâmica branca apresentam grãos com tamanhos inferiores a 0,044 mm; as de cerâmica vermelha, quando há controle, possuem grãos inferiores a 0,250 mm, e os produtos de revestimento, dependendo do tipo, apresentam grãos inferiores a 0,250 mm ou 0,044 mm (Anuário Brasileiro de Cerâmica, 2002). Nas cerâmicas de alta tecnologia as matérias-primas estão na ordem de 1,0 μm . Ressaltando que hoje está em franco crescimento a nanotecnologia. A

redução das dimensões (cominuição) por subdivisão de uma partícula em duas ou mais partes pode ocorrer de várias maneiras.

De um modo geral, o rendimento da moagem é influenciado pelas características da própria matéria-prima, nomeadamente:

- dimensão e forma inicial das partículas;
- dureza do material (resistência à compressão, ao choque e à abrasão);
- estrutura homogênea ou heterogênea;
- umidade ou higroscopicidade;
- sensibilidade à variação da temperatura;
- tendência a aglomeração.

O moinho de bolas, ou moinho Alsing, é um equipamento de moagem bastante utilizado na indústria cerâmica, nomeadamente para a moagem de pastas, ou dos componentes duros. Na Figura 11 apresenta-se um desenho técnico de um moinho de bolas.

A moagem neste tipo de moinhos pode ser a seco ou úmido e o processo pode ser contínuo ou intermitente, embora o mais comum na indústria cerâmica seja a moagem intermitente e a úmido.

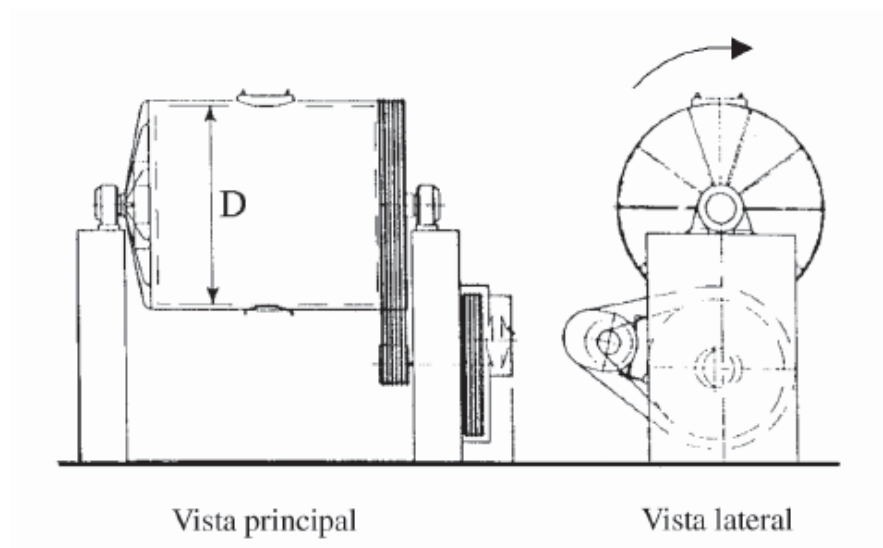


Figura 11 - Moinho de bolas descontínuo (D – diâmetro interno). Adaptado de Ribeiro (2001).

A velocidade de um moinho é determinada pela expressão (1).

$$v = \pi D n \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

sendo:

n = número de giros por minuto

v = velocidade

D = diâmetro interno do moinho

O moinho com velocidade v , comunica a um corpo moedor (bola) de massa m , aderente a parede do tamborão um par ação-reação, uma força fictícia (“força centrífuga”), conforme mostrado na Figura 30 e determinada pela expressão (2).

$$f_c = \frac{mv^2}{(D/2)} \quad (2)$$

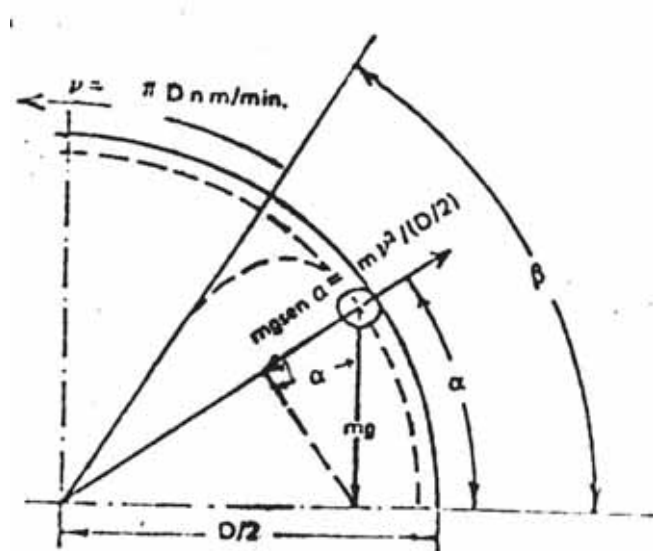


Figura 12 – Esfera aderida a parede.

O ângulo α de elevação do corpo moedor é independente da massa, ficando

$$\text{sen } \alpha = \frac{v^2}{g(D/2)} \quad (3)$$

Adotando a velocidade crítica (v_c) como o valor de $\text{sen}\alpha \approx 1$ e convertendo para m/min, tem-se:

$$v_c = 133\sqrt{D} \quad (\text{m/min}) \quad (4)$$

Para determinar a frequência crítica (n_c), tem-se:

$$n_c = \frac{v_c}{\pi D} = \frac{133\sqrt{D}}{\pi D} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (\text{rpm}) \quad (5)$$

Normalmente usa-se a frequência de rotação entre 55% e 65% da crítica, assim evitando assim, efeitos negativos como “a centrifugação e a catarata”, e atingindo o objetivo de ter um funcionamento em “cascata”.

Para determinar a carga de material a ser moído não existem regras fixas, é comum que a quantidade do material a ser moído cubra completamente a carga de moagem, quer se trate de moagem úmida ou seca.

2.7 Caracterização do material particulado

Os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente. Esses processos de fabricação podem diferir de acordo com o tipo de peça ou material desejado mas, de um modo geral, compreendem a etapa de preparação da matéria-prima e da massa. Portanto, deve ser dada uma atenção muito grande à preparação das matérias-primas.

Grande parte das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica tradicional é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Os materiais utilizados nas cerâmicas avançadas, em geral, são obtidos a partir de uma preparação muito mais criteriosa, onde se envolvem processos físicos e químicos.

A maioria das *argilas* passa pelo processo de mineração a céu aberto, ocorrendo a remoção de camada estéril e o aproveitamento da camada útil. A remoção é feita por

meio de escavadeiras, por tratores ou por aplainadores mecânicos de grande capacidade. A profundidade máxima economicamente viável da camada estéril depende do valor da camada de argila subjacente.

Argilas subjacentes a lençóis de água e minas de carvão são mineradas a partir de camadas profundas, usando métodos convencionais de perfuração com sondas até a profundidade necessária e construção de um túnel até o nível adequado. Essa técnica não é muito usada no Brasil devido a abundância de matéria-prima que pode ser minerada a céu aberto. Materiais duros como feldspato e quartzitos são minerados pelos métodos usuais de perfuração e detonação (ZAVAGLIA, 1991).

Desta forma, algumas técnicas de caracterização necessitam ser empregadas para o correto conhecimento das matérias primas que estão sendo empregadas.

2.7.1 Caracterização mineralógica por difratometria de raios- X

Segundo Arrais (2000), os constituintes inorgânicos dos solos encontram-se nas frações areia, silte e argila, com alguns compostos também no estado coloidal. As dimensões das partículas impossibilitam a identificação, sem o uso de equipamentos, das suas formas e estruturas, fundamentais na caracterização mineralógica dos materiais. Por isso são usadas as ondas de raios-X que ao atravessarem um material, a radiação incidente pode ser absorvida por este dependendo do seu comprimento de onda.

A difratometria de raios - X é uma das mais poderosas ferramentas para a análise de diversos tipos de materiais. Da pesquisa até a produção, a difração de raios - X é indispensável para a caracterização de materiais e controle de qualidade. As estruturas do reticulado são determinadas experimentalmente por meio de análises por raios - X, que também revelam a estrutura cristalina. Quando um feixe de raios X é dirigido através de um material cristalino, esses raios são difratados pelos planos dos átomos ou íons dentro do cristal. O ângulo de difração depende do comprimento de onda dos raios - X e das distâncias entre os planos adjacentes.

Como a maior parte dos minerais constituintes dos solos em geral ocorre nas frações silte (63 a 4 μm) e argila (diâmetros de grãos > 4 μm), sua identificação é feita

sobretudo com o auxílio da difratometria. Em geral os minerais com grãos relativamente grandes (maiores que as argilas), na fração silte, possuem uma estrutura cristalina bem definida, são evidenciados nos difratogramas de raios-X por picos bem definidos, estreitos e simétricos. Ao contrário dos minerais de frações menores que silte, os argilominerálias apresentam no difratograma picos poucos intensos e largos.

Em difratogramas de amostras constituídas por diversos tipos de minerais não se consegue definir de maneira clara os argilominerais, por isso faz-se necessária a separação pela sedimentação da fração argila, para análise exclusiva dela, sem então sofrer a interferência de grãos maiores.

2.7.2 Análise química por fluorescência de raios X

Uma outra forma de análise por raios X, comumente utilizada por ceramistas, é a Fluorescência de Raios - X, onde os raios - X são usados para estimular uma radiação - X característica secundária que pode ser usada para uma análise qualitativa de elementos maiores e menores com números atômicos maiores que o do sódio. Raios - X característicos são difratados pelo cristal que está sendo analisado, a intensidade e o ângulo de difração fornecem informações sobre o elemento e a sua concentração.

Segundo Emiliani e Corbara⁸ (1999 apud GRUN 2007) a análise química consiste em determinar a composição de uma matéria-prima, fornecendo os percentuais de óxidos presentes e também os valores de perda ao fogo.

A análise química pode ser realizada através de métodos químicos ou físicos. Os métodos químicos geralmente são através de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes. Os métodos físicos podem ser por meio de espectrofotometria ou ainda por fluorescência de raios-X.

⁸EMILIANI, G.P.; CORBARA, F. C. **Tecnologia Cerâmica: La Lavorazione**, volume II, Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.A., 1999 apud GRUN, E. **Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina 2007.

Atualmente, a fluorescência de raios-X é frequentemente utilizada para determinar a composição química em materiais cerâmicos por ser um método rápido, preciso e não destrutivo. De uma maneira simplificada, a interpretação de uma análise química de uma matéria-prima argilosa, segundo Más (2002), pode ser descrita abaixo:

- óxido de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O): presentes geralmente na forma de feldspatos, são fundentes e conferem resistência mecânica quando sinterizados entre 950 e 1000°C;

- óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO): são agentes fundentes e tendem a diminuir a refratariedade das peças, indicam a presença de calcita, dolomita e massas calcáreas que requerem moagem e temperaturas de sinterização aproximadamente a 1100°C;

- sílica ou óxido de silício (SiO_2): indica a presença de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos. A sílica livre corresponde ao quartzo;

- alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3): está em sua maior parte combinada, formando os argilominerais;

- óxido de ferro (Fe_2O_3): responsável pela coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas, reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem. Também diminui a resistência mecânica, mas o pouco que funde na sinterização proporciona dureza ao vidrado (BITENCOURT, 2004).

- óxido de titânio (TiO_2): desvia a cor para um tom alaranjado;

- óxido de enxofre (SO_3): pode indicar a presença de gesso;

- óxido de manganês (MnO_2): altera a cor para marrom;

- carbonatos: ajudam no branqueamento das peças, diminuem a expansão e aumentam a porosidade;

- perda ao fogo: é a diminuição de peso, até um valor constante, que indica uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Basicamente indica o teor de matéria orgânica presente na argila e a quantidade de gás e vapor que são formados durante o aquecimento, resultantes da decomposição dos carbonatos.

2.7.3 Análise granulométrica - peneiramento

A produção de tijolos e telhas depende muito das características de suas matérias-primas; por isso a extrema importância das provas experimentais efetuadas sobre as mesmas. Sabe-se que as argilas são compostas de material argiloso e materiais não-plásticos. Os materiais não-plásticos, representados essencialmente por areias, micas, óxido de ferro e outros, atuam como agentes que diminuem a plasticidade nas composições quando misturados com os materiais argilosos.

A análise granulométrica (AG) é de importância primordial para uma completa e precisa caracterização das matérias-primas (DUTRA⁹, 2007 apud CHAVES, 2009).

Normalmente, faz-se uma análise de 53 μm utilizando uma peneira ASTM e uma suspensão de argila em água destilada com a concentração 200g/l, mecanicamente dispersada e quimicamente estabilizada com um desfloculante. Avalia-se em seguida a porcentagem e o peso do resíduo 53 μm . Podem fazer-se outras análises utilizando peneiras de rede com malha mais larga ou até com malhas menores – caso de peneira ASTM#400 (38 μm) (Gomes, 1986).

Costuma-se fazer a classificação granulométrica de partículas através das peneiras, usualmente feitas de fios de bronze, formando uma série de *mesh* (malhas por polegadas quadradas). Peneiras de seda ou naylon são geralmente usados para material abrasivos finos, devido a sua maior durabilidade.

Para fornecer um escoamento constante do material através da peneira, o suporte deve ser vibrado de algum modo. O peneiramento pode ser feito por via úmida ou seca, sendo que para materiais muito finos, o peneiramento por via úmida é mais eficiente. Durante o peneiramento várias peneiras *são geralmente* superpostas com as mais grossas na parte superior, a fim de separar o material em várias frações.

⁹DUTRA, R. P. S. **Efeito da taxa de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007 apud CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

As argilas plásticas (denominadas industrialmente por “argilas gordas”) apresentam granulometria muito fina, isto é, grãos abaixo de 2 μm . O processamento de uma composição contendo excessivamente este tipo de argila torna-se complicado. Para facilitar o processo de fabricação, são introduzidas outras argilas (denominadas, como já foi mencionado, por “argilas magras”), que apresentam um maior teor de impurezas misturadas aos argilominerais, reduzindo a plasticidade da massa. Neste caso, há necessidade de se fazer uma mistura entre estas argilas, juntamente com os materiais não-plásticos moídos, a fim de se obter uma distribuição granulométrica adequada ao processamento e às características de qualidade do produto desejado.

2.7.4 Análise térmica

As análises termoquímicas são usadas para determinar mudanças individuais no material e reações entre materiais em um lote ou entre um material e a atmosfera. Em materiais como a argila é muito comum a determinação da chamada “perda ao fogo”, na qual uma determinada quantidade de argila é colocada no forno e a temperatura é elevada até um determinado valor, de forma que se verifique o quanto de massa é reduzida.

Análise termogravimétrica (ATG): nesta, a massa de uma amostra, em uma atmosfera controlada, é registrada continuamente como uma função da temperatura ou do tempo, enquanto a temperatura é aumentada (normalmente, linearmente com o tempo). A curva da massa, ou porcentagem da massa, em função do tempo é chamada termograma, ou curva de decomposição térmica.

As curvas de análise térmica diferencial (DTA) revelam mudanças de energia que ocorrem num material durante o seu aquecimento ou arrefecimento. As mudanças de energia podem resultar de quatro causas principais: transições 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) (GOMES, 1986).

Instrumentos de termogravimetria consistem de uma balança analítica sensível, um forno, um sistema de gás, para purga e para promover uma atmosfera inerte (algumas vezes reativos), e um microcomputador/microprocessador para controle dos instrumentos e amostragem e aquisição dos dados (SKOOG & LEARY, 1992).

2.8 Caracterização das cerâmicas

Após a obtenção das cerâmicas, com o objetivo de verificar se teriam ocorrido perdas significativas com relação a inclusão dos resíduos na matéria-prima faz-se uma série de análises comparando todas as cerâmicas obtidas

2.8.1 Perda de massa e retração linear

Como já mencionado, segundo Nascimento (2007) há três estágios característicos no processo de sinterização: no primeiro a água de constituição é expulsa do material resultando no endurecimento do mesmo; no segundo os carbonetos são calcinados e se transformam em óxidos; o terceiro corresponde ao estágio de vitrificação, iniciado a aproximadamente a 950°C, no qual a sílica presente na cerâmica forma uma pequena quantidade de vidro que aglutina os demais elementos, dando resistência, dureza e compactação ao conjunto.

2.8.2 Porosidade aparente

Segundo o Princípio de Arquimedes, um determinado corpo de massa (m), submerso, total ou parcialmente num fluido de densidade (ρ), sofre a ação de uma força dirigida de baixo para cima (contrária à força gravitacional) denominada empuxo (\vec{E}), cuja intensidade é igual ao peso da massa de fluido deslocado pelo corpo (quando tanto o corpo quanto o fluido estiverem em equilíbrio estático).

O empuxo (\vec{E}), dado pela Equação 6 e ilustrado na Figura 13, não depende do material constituinte do corpo submerso, mas somente do seu volume (V) submerso e da densidade (ρ) do fluido que o recebe.

$$\vec{E} = \rho \vec{g} V \quad (6)$$

Sendo, g a intensidade da aceleração da gravidade local.

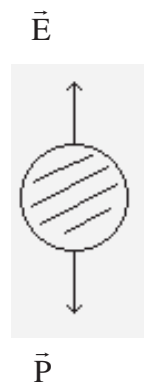


Figura 13 – Esquema das forças de Empuxo e Peso.

A força peso efetiva ou peso imerso (\vec{P}_i) experimentado por um corpo submerso é a diferença de seu peso seco (\vec{P}_s) pelo empuxo (\vec{E}), como mostra a equação 7. Observe que P_i pode ser positivo ou negativo, indicando que o tal corpo irá submergir ou flutuar, respectivamente.

$$\vec{P}_i = \vec{P}_s - \vec{E} \quad (7)$$

Como $\vec{P} = m \vec{g}$, substituindo os termos e considerando apenas os módulos dos vetores envolvidos, tem-se:

$$m_i g = m_s g - \rho g V \quad (8)$$

Como g se anula e $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ (para água destilada):

$$V = m_s - m_i \quad (9)$$

Se o corpo em questão, apresentar alguma porosidade, estas equações (7 a 9) deverão levar em consideração a diferença de peso oriundo dos poros. Isto é obtido pela fervura do corpo no líquido para que o ar dos poros seja substituído pela água.

Uma pesagem úmida (P_u) deste corpo irá fornecer, então, o peso seco do corpo mais o peso da água ($P_{\text{água}}$) contida nos poros, dado pela equação 10.

$$P_u = P_s + P_{\text{água}} \quad (10)$$

Substituindo o peso seco pelo peso úmido, na equação 8, tem-se:

$$m_i g = m_u g - \rho g V \quad (11)$$

logo,

$$V = m_u - m_i \quad (12)$$

2.8.3 Resistência mecânica e o método estatístico de Weibull

A resistência mecânica de um material pode ser descrita como o nível de tensão no qual ocorre a fratura. Uma vez que os materiais fraturam em diferentes níveis de tensão, sob carregamentos diferentes (compressão, tração ou flexão), é necessário especificar o teste utilizado na obtenção de um determinado valor (PIORINO, 1990).

O ensaio de flexão é muito utilizado, por ser relativamente barato e fácil de ser conduzido, além de produzir resultados confiáveis.

Os dois métodos normalmente utilizados para o ensaio são os carregamentos de três e quatro pontos.

Para determinar a tensão de ruptura (σ) para a seção retangular, foi utilizada uma relação extraída da teoria da elasticidade e de acordo com a maioria dos textos técnicos (CALLISTER JR, 1999; SHACKELFORD, 1992; PIORINO, 1990; PIORINO, 1998):

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{Q}{bh^2} (L-l) , \quad (13)$$

sendo:

Q = carga aplicada

h = espessura da amostra

b = largura da amostra

L = vão maior

l = vão menor

Como dificilmente em amostras diferentes do mesmo material, o tamanho, localização e a orientação do defeito crítico serão os mesmos, tem-se que suas resistências mecânicas serão diferentes. Por isso, em um material cerâmico, os valores medidos de resistência mecânica apresentam um grande espalhamento: dependem da distribuição estatística de defeitos em cada corpo de prova. Este fato constitui-se num grande inconveniente no emprego de materiais cerâmicos (CAIRO, 1990).

Várias tentativas têm sido feitas para desenvolver uma teoria estatística para a resistência de materiais frágeis. A teoria estatística mais adequada aos materiais cerâmicos foi desenvolvida por Weibull.

Ele assumiu que a probabilidade de ruptura (P) é proporcional a uma função da tensão $f(\sigma)$ e do volume do corpo isto é (CHIANG, 1997)

$$P = \int_V f(\sigma) dV . \quad (14)$$

Weibull propôs uma forma particular para $f(\sigma)$,

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (15)$$

sendo:

σ_0 = é uma resistência característica do material que depende da função de distribuição;

m = é o módulo de Weibull que é relacionado à homogeneidade do material.

Weibull obteve a seguinte expressão para a probabilidade de fratura acumulada (WU; JIANG, 2003, MONTEIRO, 2001):

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (16)$$

A partir da expressão (16) e da aplicação de logaritmo natural duas vezes, obtém-se uma equação linear descrita na equação (17) (MONTEIRO, 2001, MUNZ; FETT, 1999, MIGLIORE JR; ZANOTTO, 1993):

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1-P} \right) = m(\ln \sigma) - m(\ln \sigma_0) \quad (17)$$

Usando regressão linear é possível determinar os parâmetros m e σ_0 , o parâmetro m é a inclinação da reta e $m \ln \sigma_0$ o coeficiente linear.

Para a aplicação da estatística de Weibull é importante saber que o valor de m , segundo Piorino (1990), estabiliza em função do número de amostras, portanto, como é o caso deste trabalho, o número mínimo de corpos de prova deve ser igual a 30.

O estimador escolhido, e o mais utilizado, é dado por $P = j - 0,5 / N$, onde N é o número de amostras.

2.8.4 Rugosidade

Os defeitos de superfície são importantes na determinação da resistência mecânica de um material frágil. Desta forma a especificação do acabamento superficial através da sua rugosidade tem grande importância quando da aplicação estrutural de um material cerâmico (PIORINO,1990).

A rugosidade é formada por marcas provenientes do processo de fabricação, tais como ranhuras, estrias, escamas e crateras, ou por modificações na superfície por ação química ou corrosão (GUIMARÃES, 1999).

De acordo com Mitutoyo (1994), as ondulações e outros desvios macroscópicos são desconsiderados pelo aparelho, que analisa somente os desvios de rugosidade. Neste trabalho escolheram-se três parâmetros para a análise Ra (rugosidade média), Rt (profundidade total da rugosidade) e R_{3z} (rugosidade média do terceiro pico e vale).

Para a obtenção de valores numéricos, na análise utilizando o rugosímetro, é necessária a definição de parâmetros que permitissem a quantificação dos desvios. Vários sistemas foram desenvolvidos com esse objetivo. A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – adotou o chamado sistema M.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Neste capítulo são apresentados todos os materiais usados na pesquisa, na Figura 14, apresenta-se um fluxograma mostrando como foram realizados o preparo das amostras e os ensaios experimentais.

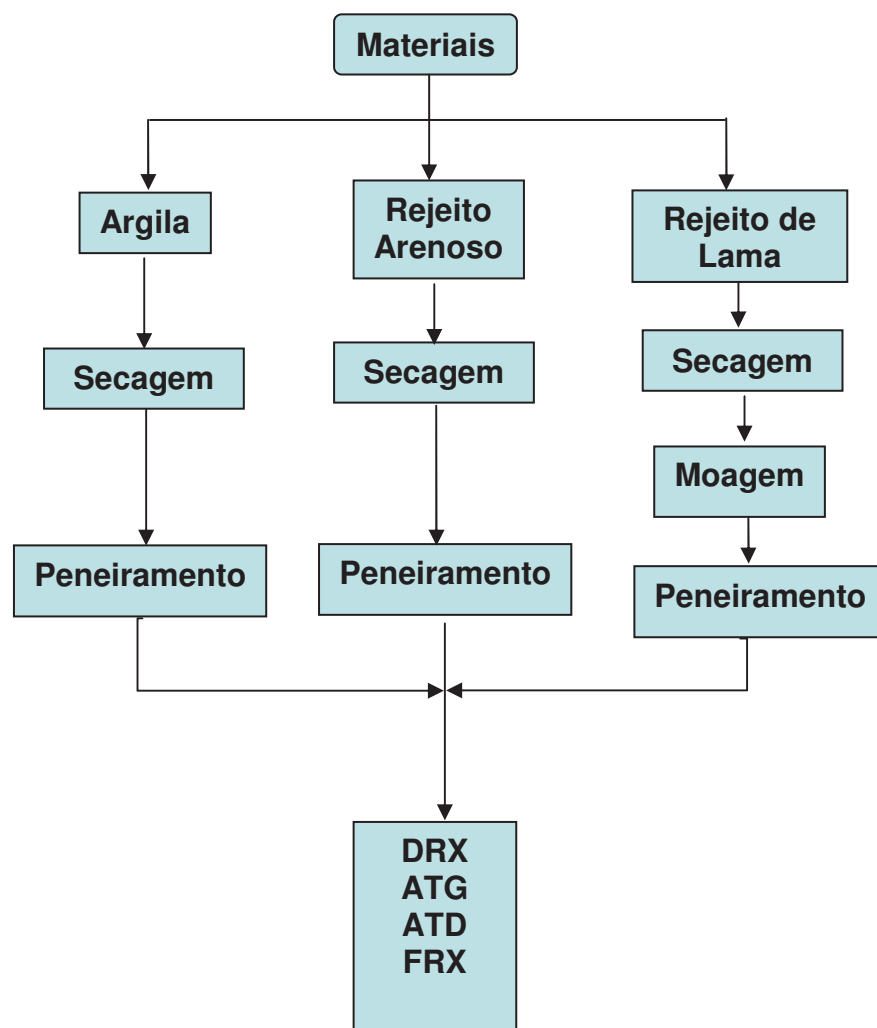


Figura 14. Fluxograma apresentando a preparação e as análises dos materiais particulados.

3.1.1 Argila e carvão

A argila e o carvão estudados foram fornecidos por uma indústria cerâmica da região de Guaratinguetá. A porcentagem da mistura argila e carvão foi mantida exatamente a que é usada na empresa, ou seja, a formulação consiste em 4% de carvão e 96% de argila. A argila é extraída de jazida do Bairro Santa Luzia em Guaratinguetá – SP. Na Figura 15 apresenta-se foto da argila e do carvão.



Figura 15. Materiais usados: (a) argila retirada do rio no Bairro Santa Luzia e (b) carvão

3.1.1.1 Localização da jazida de argila utilizada na cerâmica

Segundo Ruiz (1989), as argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha geralmente são de dois tipos: argilas inconsolidadas que ocorrem formando lentes ou bolsões nas planícies de inundações de rios e córregos e argilas ou sedimentos argilosos litificados associados a pacotes rochosos acamados.

A argila utilizada neste trabalho é uma argila ou sedimentos argilosos litificados – depósito de rochas sedimentares alterados, como pode ser visto na Figura 16.

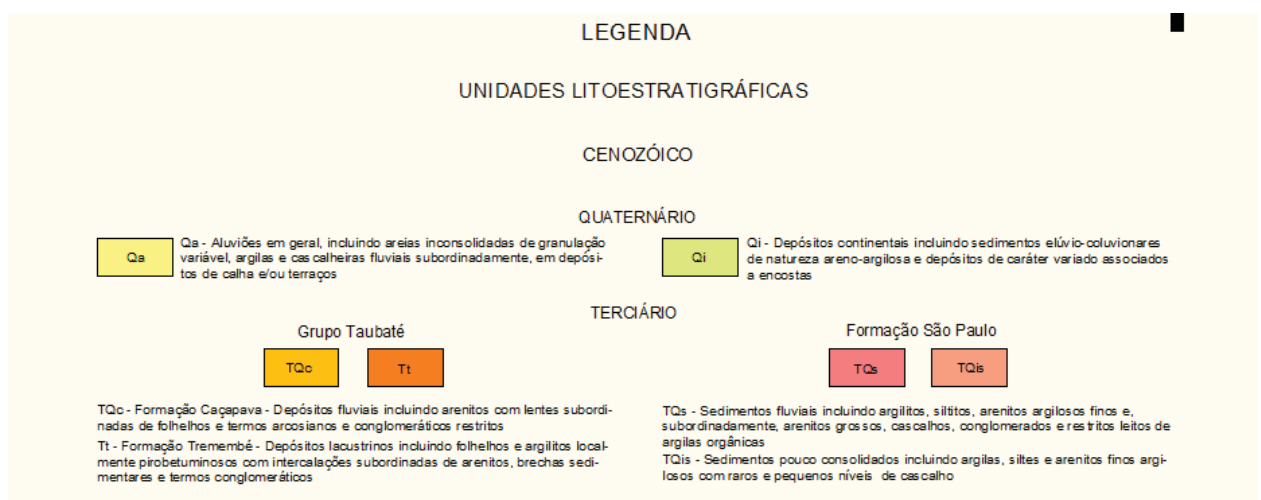
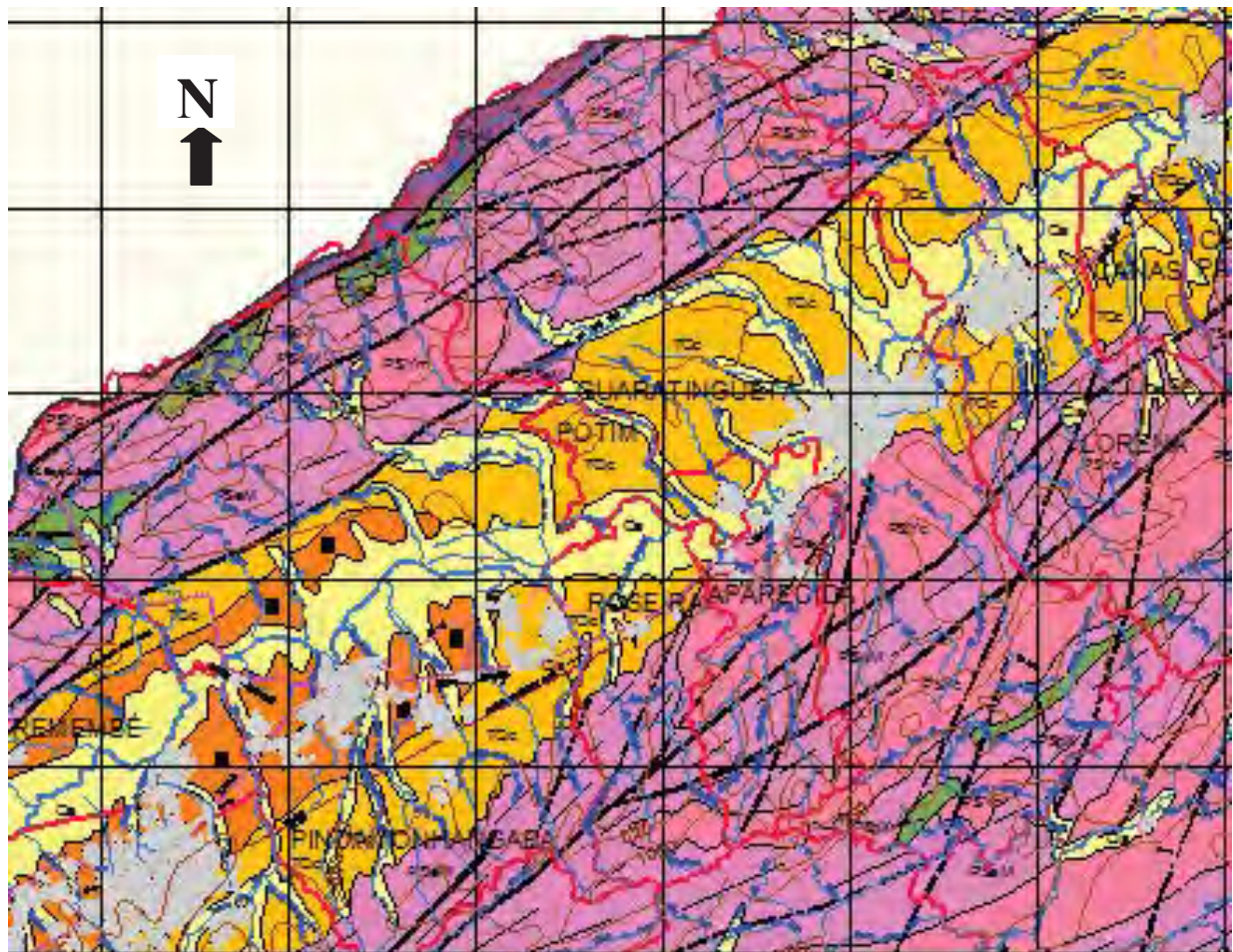


Figura 16. Mapa Geológico – Unidades Litoestratigráficas

Fonte Base: ICF Kaiser – Logos, 1999 – escala: 1:250.000

Fonte: Mapa Geológico do Estado de São Paulo - IPT

TQC – (Terciário Quaternário Caçapava): Formação Caçapava – Depósitos fluviais incluindo arenitos com lentes subordinadas de folhelhos e termos arcossianos e conglomeráticos restritos.

As argilas ou sedimentos argilosos litificados nem sempre possuem caulinita como principal argilomineral (às vezes predominam a ilita) e, frequentemente, afloram nas vertentes das encostas de colinas suaves. Trata-se, na realidade, de rochas constituídas por argilitos, siltitos, folhelhos etc. que, às vezes, podem aparecer intercalados a níveis de arenitos finos, formando uma sequencia rítmica. Essas rochas, quando alteradas, são popularmente denominadas de “taguá”. Tal denominação é típica do Estado de São Paulo e tem origem da língua Tupi-Guarani. Os ceramistas e oleiros também denominam essas argilas de “barro fraco” (RUIZ, 1989).

Na Figura 17 pode-se identificar a primeira camada como a de capeamento ou recobrimento que não tem interesse para a indústria cerâmica e a segunda parte a argila que eles usam.

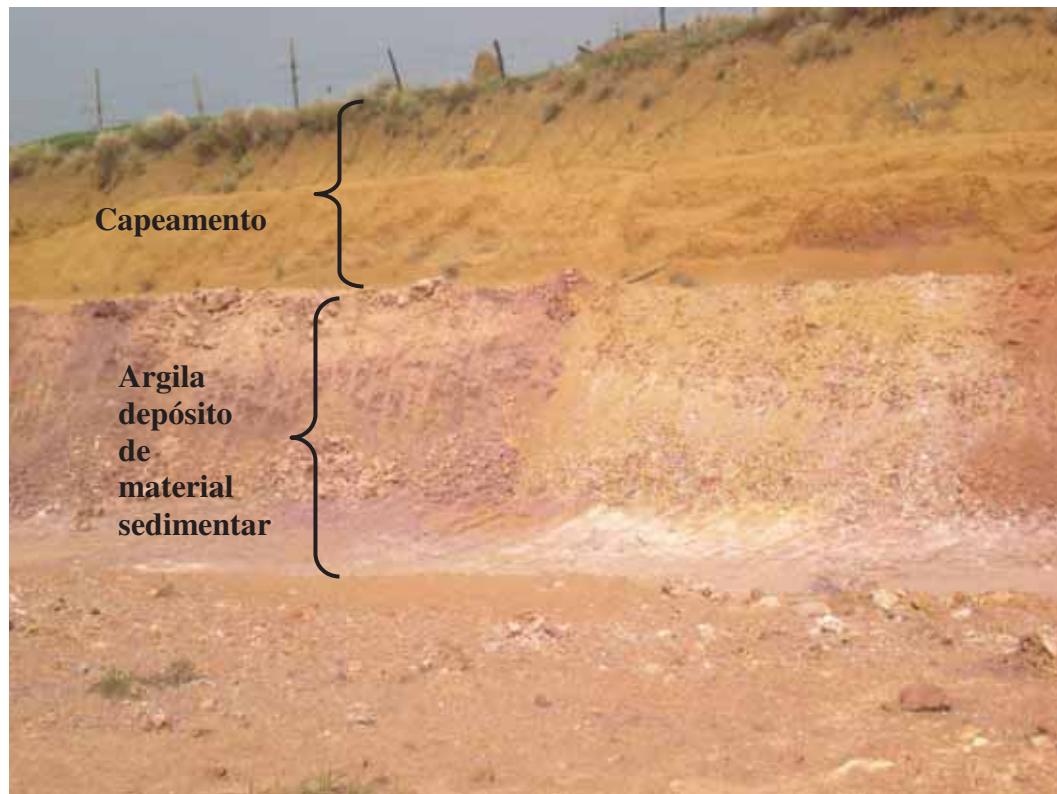


Figura 17 - Camadas do solo de onde é extraída a argila usada na Cerâmica

3.1.1.2 Método de seleção do solo

Foi utilizado o método de seleção do solo (empírico) para identificar a quantidade de material argiloso e de areia existente na argila usada pela cerâmica.

Este método é realizado da seguinte forma:

- 1 Utilizando-se um frasco transparente de boca larga, neste caso 500 mL;
- 2 Coloca-se, até a metade do frasco, o solo que se pretende utilizar;
- 3 Acrescentam-se sal, neste caso 5 g de sal, e completa-se com água;
- 4 Tapa-se o frasco, agita-se vigorosamente durante 1 minuto, e deixa-se em repouso por 30 min.

Na Figura 18 mostra-se como é estruturado o ensaio.

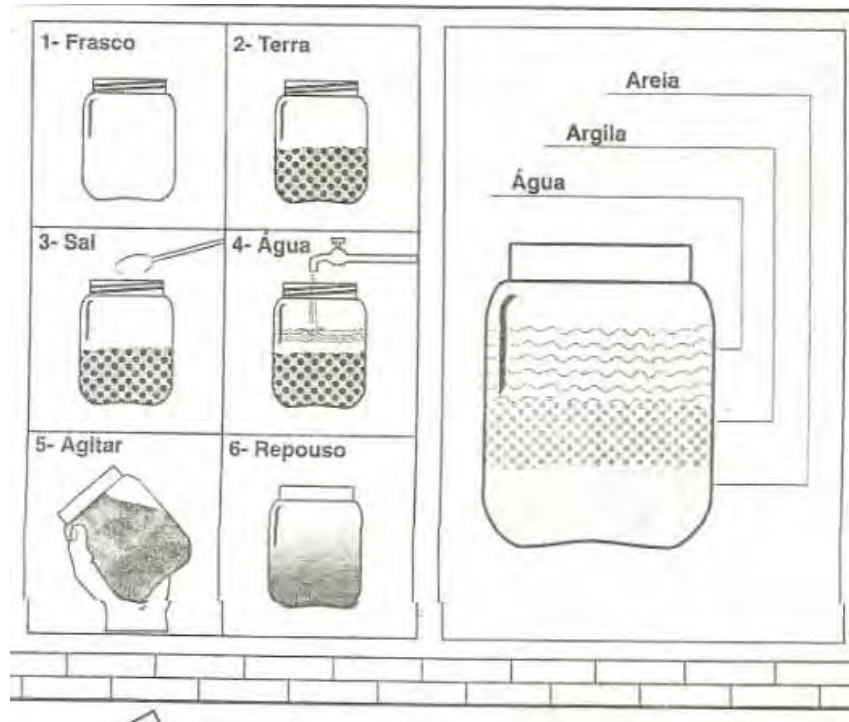


Figura 18. Método de seleção do solo – Informação adquirida na Cerâmica

3.1.2 Rejeitos

Os rejeitos da extração de minério de ferro foram fornecidos pela empresa Mineradora em tambores de 25 kg. Na Figura 19 apresenta-se as fotos dos rejeitos.



Figura 19. Rejeitos utilizados: a) arenoso e b)rejeito lama

3.1.2.1 Preparação dos materiais utilizados na pesquisa

O rejeito arenoso foi seco em estufa (110°C), por 2 horas, depois passado na peneira 40 # (abertura de 0,42 mm).

Já o rejeito de lama foi seco em estufa (110°C) por 3 horas, e permanecendo 24 horas em temperatura ambiente, depois sendo levado ao moinho de bola para ser destorroado, e por fim passado na peneira 40 # (abertura de 0,42 mm). Para o processo de moagem nos resíduos de lama foi utilizado o moinho de bolas Los Angeles (“ball mill”), Figura 20, pertencente ao Laboratório de Transporte e Estradas do Departamento de Engenharia Civil da FEG/UNESP – Campus de Guaratinguetá.



Figura 20. Moinho utilizados: a) Moinho de bolas da marca Los Angeles e b)12 esferas de aço utilizadas dentro do moinho.

3.2 Métodos para a caracterização dos pós

3.2.1 Análise de fase por difratometria de Raios X

A identificação dos componentes mineralógicos por meio da difração de raios X de pó, onde cada espécie mineral cristalina tem um modelo de difração específico, proporciona uma informação precisa, mesmo quando se tem misturas com outras espécies minerais (GOMES, 2009).

Possibilita a identificação dos minerais presentes, e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais. O equipamento de difração de raios-X é basicamente um tubo emissor de raios-X, uma câmara circular onde se situa a amostra (goniômetro) e um detector que recebe os raios difratados. A técnica de ensaio consiste em incidir um feixe de raios-X (de comprimento de onda conhecido), sobre uma camada fina de pó, que gira no centro do goniômetro. Como consequência o feixe se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difratograma (GRUN, 2007).

A análise mineralógica foi realizada no CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) da UFSCAR. A identificação de fases e de suas estruturas cristalinas foram realizadas por meio do uso de algoritmos de comparação (Software Difrac Plus da Bruker) baseado no banco de dados JCPDS.

3.2.2 Análise química por fluorescência de Raios - X

O conhecimento da composição química das matérias-primas é fundamental para que seja feita uma caracterização criteriosa, de modo que venha contribuir com informações importantes para a interpretação dos resultados obtidos (CHAVES, 2009).

Segundo Grun (2007), a análise química pode ser realizada por métodos químicos ou físicos. Os métodos químicos geralmente são feitos por meio de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes. Os métodos

físicos podem ser por de espectrofotometria ou ainda por fluorescência de raios-X. Atualmente a fluorescência de raios-X é freqüentemente utilizada para determinar a composição química em materiais cerâmicos por ser um método rápido, preciso e não destrutivo.

Esta análise foi realizada no CCDM Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar.

3.2.3 Distribuição granulométrica de partículas

O método de ensaio para a análise de distribuição granulométrica de partículas: peneiramento do material seco a 110°C em conjunto de peneiras vibratórias. Esta análise foi realizado no CCDM Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCAR.

3.2.4 Análise térmica

Uma das técnicas de análise térmica é a análise térmica diferencial (ATD) que tem como principal função indicar por picos endotérmicos ou exotérmicos a comprovação da existência de minerais essenciais às argilas e que influenciam as propriedades finais da peça (SILVEIRA & SALLET¹⁰, 2002, apud GRUN, 2007).

Para o Método de Análise Térmica foi utilizado o Equipamento Banco de Análise Térmica - BP Engenharia. Esta análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais, Departamento de Materiais e Tecnologia – FEG/UNESP – Campus Guaratinguetá.

¹⁰SILVEIRA, G. C. L.; SALLET, R.G. **Caracterização Físico-Química de Argilas do Município de Itajá-RN para Utilização em Indústria Cerâmica Vermelha**, in: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. Natal, 2002 apud GRUN, E. **Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina 2007.

3.3 Determinação da quantidade de rejeito a ser adicionado

Este trabalho, como já foi mencionado anteriormente, tem como meta principal a adição separadamente de dois rejeitos de uma mineradora à massa cerâmica de uma empresa da região de Guaratinguetá que produz blocos cerâmicos.

Como em sua maioria as cerâmicas vermelhas utilizadas na obtenção de telha, elementos vazados, tijolos, blocos, etc; são obtidos a partir de uma massa plástica (ou hidroplástica) e que esta massa não pode conter alto teor de sílica pois prejudicaria na extrusão e danificaria o maquinário e como os rejeitos possuem uma grande quantidade de sílica decidiu-se por começar esta adição em pequenas porcentagens para que não reduzisse excessivamente o limite de liquidez e de plasticidade.

3.3.1 Limite de liquidez e plasticidade

O **limite de liquidez e plasticidade** são testes empíricos baseados nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, desenvolvidos com o propósito de obter o teor de umidade e classificação de tipos de argilas em solos coesivos.

Na Figura 21 (a) e 21 (b) tem-se as fotos do ensaio. O ensaio de **Limite de Liquidez** foi realizado seguindo as etapas descritas a seguir:

- Deixou-se uma amostra de cada argila secar à temperatura ambiente por 3 dias;
- Depois de seca destorroou-se, homogeneizou-se e passou-a pela peneira 40 (abertura de 0,42 mm);
- Colocou-se em torno de 100 g em uma capsula de porcelana e adicionou-se água destilada suficiente para formar uma pasta.
- Transferiu-se parte dessa massa para a concha do aparelho, Casagrande. Alisou-se a superfície com a espátula, de forma a obter uma camada de espessura de 12 mm na seção mais profunda, e com um comprimento máximo de $\frac{2}{3}$ do diâmetro da concha;

- Com o cinzel de Casagrande, abriu-se uma ranhura ao longo do plano de simetria. O cinzel permaneceu normal à concha durante todo o movimento de abertura.
- Girou-se a manivela a razão de duas evoluções por segundo, e contou-se o número de golpes necessário para que as bordas inferiores da ranhura se unissem de 10 mm ao longo do eixo de simetria (o número de golpes devem estar entre 10 e 50, sendo 25 ± 2 golpes o número considerado ideal).
- Foram pesadas as cápsulas metálicas numeradas; foram retiradas cerca de 15 g de solo junto às bordas que se uniram, “pesou-se” cápsula mais solo úmido, colocou-se em estufa por 24 h; tornou-se a pesar para obter o teor de umidade por número de golpes (são colhidos 5 pares de valores por amostra);
- Transcreveram-se os representativos pontos de pares obtidos em papel semilogarítmico, traçou-se uma reta que melhor se ajustou aos pontos do gráfico;
- O valor do limite de liquidez do solo será o teor de umidade correspondente a 25 golpes.



a)



b)

Figura 21. Em (a) preparação da pasta para o ensaio de Limite de Liquidez, em (b) pasta na concha do aparelho Casagrande.

Os procedimentos para a realização do ensaio de **Limite de Plasticidade** correspondem:

- Deixou-se uma amostra da argila secar na temperatura ambiente por três dias;

- Depois de seca destorroou-se, homogeneizou-se e passou-a pela peneira 40 (abertura de 0,42 mm);
- Colocou-se cerca de 100 g em uma cápsula de porcelana e adicionou-se água destilada, suficientemente para formar uma pasta;
- Rolou-se o solo com a mão sobre a face esmerilhada da placa de vidro, para tanto se utilizou a palma da mão (Figura 22a);
- Interrompeu-se o ensaio quando as duas condições descritas a seguir foram atendidas simultaneamente: bastonete estiver com 3 mm e aparecimento de fissuras no bastonete (Figura 22b);
- Colocou-se o trecho fissurado do bastonete em uma cápsula de alumínio numerada e pesada, para a determinação do teor de umidade (Figura 22c);
- Repetiu-se este ensaio até obter cinco valores do teor de umidade;
- Para cada ponto determinou-se a umidade do bastonete;
- O limite de plasticidade do solo, será igual à média aritmética dos valores, determinado no item anterior.



a)



b)



c)

Figura 22 – Em (a) rolou-se o solo com a palma da mão, em (b) bastonetes com 3mm e aparecimento de fissuras e em (c) coloca-se o trecho fissurado do bastonete em uma cápsula de alumínio numerada.

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil – FEG – UNESP – Campus Guaratinguetá.

3.4 Processamento

Após a definição da quantidade de rejeito arenoso e rejeito de lama a serem acrescentados separadamente na massa cerâmica (argila e carvão) determinados pelos parâmetros encontrados nos ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade, foram produzidos três lotes de amostras: um com massa cerâmica (carvão e argila) puro, outro com massa cerâmica mais a porcentagem ideal definida de rejeito de lama e o último lote de massa cerâmica com a porcentagem ideal definida de rejeito arenoso.

Para a realização dos ensaios, como determinação da densidade e porosidade aparente, rugosidade e da resistência mecânica, optou-se pela utilização da técnica de prensagem uniaxial como a de conformação dos corpos de prova. Na *Prensagem a seco* as partículas das matérias primas são comprimidas até um volume tão pequeno quanto possível, pela aplicação de pressão, obtendo-se dois efeitos: empacotamento e agregação de partículas. Esse método é usado na fabricação de pequenos isolantes elétricos, ladrilhos, azulejos, telhas e tijolos refratários. O teor de água varia de 5 a 15%, a pressão varia de algumas unidades de MPa, para massas contendo apenas argilas, a 700 MPa para refratários especiais.

O fator de empacotamento varia com a forma das partículas, com o arranjo das partículas e com a distribuição dos tamanhos. Pode-se elevar acentuadamente o fator de empacotamento utilizando mistura de grãos com granulometria diferente.

Para tijolos refratários, nos quais se deseja obter um fator de empacotamento elevado, costuma-se utilizar partículas de três tamanhos diferentes. As misturas para prensagem de peças cerâmica branca são ricas em matérias plásticas (argilas, caulins, etc.), portanto são facilmente moldáveis. Massas contendo apenas componentes não plásticos, óxidos fundidos também podem ser prensados quando são utilizados plastificantes adequados. Compostos orgânicos, como amido, produtos derivados de

milho e ceras, podem ser adicionados à mistura para aumentar a plasticidade ou escoamento e reduzir o atrito nas paredes do molde.

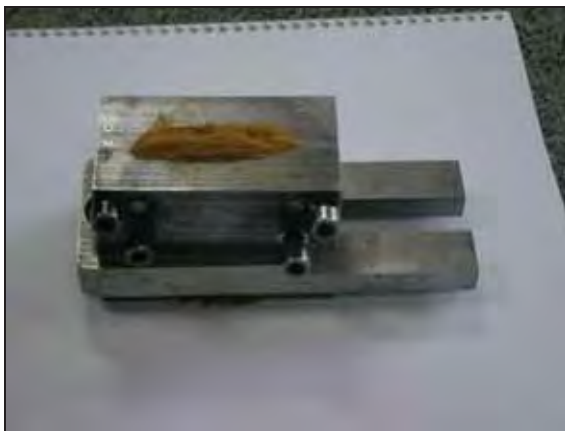
Para a conformação, o pó foi peneirado e depois adicionado água (15% em massa), em cadinho de porcelana, conforme mostrado na Figura 23 a, novamente peneirado, e então foram colocados em um molde de aço, conforme pode ser observado nas Figuras 23 b, c e d.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23- Em (a) preparação do material particulado, em (b) molde de aço 4340, em (c) colocação do pó no molde, em (d) distribuição do pó no orifício do molde.

As amostras foram prensadas uniaxialmente (30 MPa), utilizando uma prensa hidráulica, conforme apresentada na Figura 24 a. As amostras foram sinterizadas em forno elétrico tipo mufla, até a temperatura de 900°C, com taxa de 5°C/min e patamar de 1 h. Temperaturas na ordem de 900°C são as comumente utilizadas nas empresas cerâmicas. Para comparar a retração linear e a perda de massa das amostras, fez-se um

estudo retirando amostras do forno durante o aquecimento. Para a sinterização usou-se um forno elétrico da EDG, conforme apresentado na figura 24 b

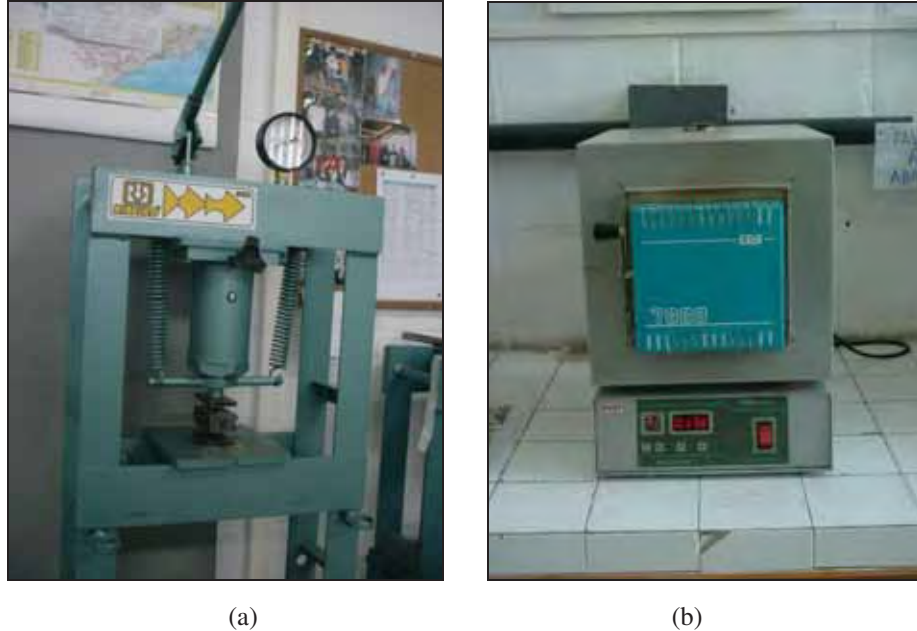


Figura 24- (a) Prensa uniaxial em que se conformou as amostras, (b) Forno mufla utilizado para a sinterização.

O processamento dos corpos de prova foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos – FEG – UNESP – Campus Guaratinguetá

3.5 Caracterização das cerâmicas

Após a obtenção das cerâmicas, com o objetivo de verificar se teriam ocorrido alterações com relação a inclusão dos resíduos na matéria prima, fez se uma série de análises comparando todas as cerâmicas obtidas.

3.5.1 Perda de massa e retração linear

Durante as etapas de calcinação e sinterização foram realizadas as medidas de massa e de comprimento dos corpos de prova, permitindo obter as porcentagens para a

perda de massa e retração. Na figura 25, são apresentadas as fotos das medidas realizadas durante a determinação da retração linear.

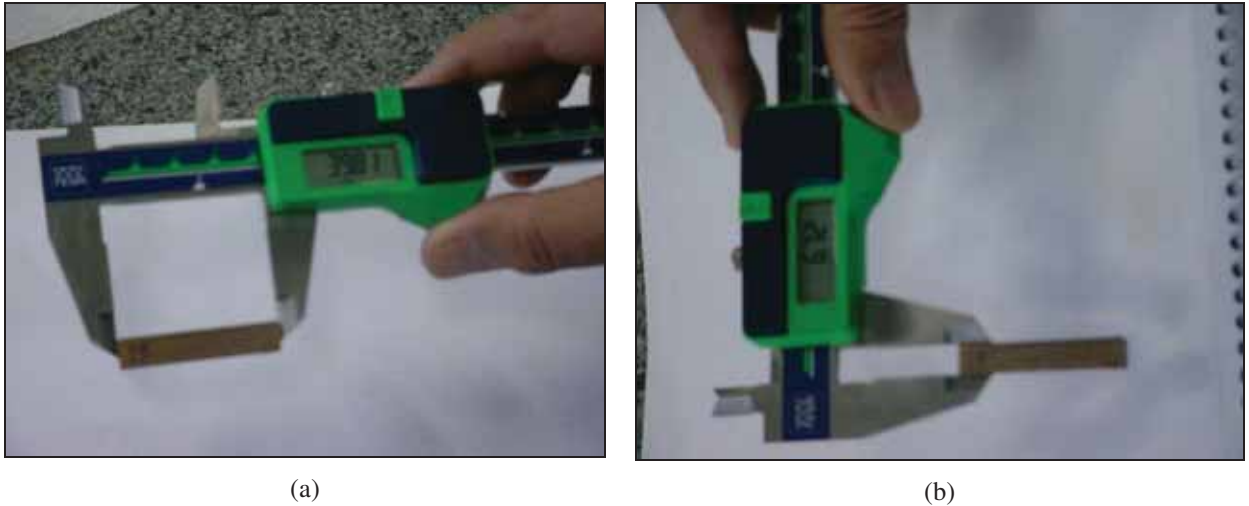


Figura 25- Em (a) medida do comprimento com paquímetro digital, em (b) medido da largura com paquímetro digital.

3.5.2 Porosidade aparente

O método e o protocolo utilizados foram extraídos da norma ASTM C20-00 (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – C20-00, 2000), baseado no princípio de Arquimedes..

Todas as medidas foram realizadas à temperatura ambiente, usando-se uma balança analítica (Figura 26) e assumindo a densidade da água destilada $1,0 \text{ g/cm}^3$.

As amostras foram medidas em diferentes situações, como segue:

- Massa imersa (m_i) – a amostra é colocada em água destilada e ferve por 2 h, dentro de um recipiente sem contato com as paredes. Depois da fervura, a amostra esfria, em temperatura ambiente e por 24 h, sempre dentro da água, sendo então medida a massa. Esta medida é realizada em um suporte imerso em uma vasilha com água destilada, sobre uma balança.
- Massa úmida (m_u) – após a determinação da massa imersa, a superfície da amostra é levemente enxugada com um pano, e então determinada à massa.

- Massa seca (m_s) – após estas etapas, seca-se a amostra em estufa a 110°C por 1h e após 15 min de repouso em um dessecador determina-se a massa.



Figura 26 – Balança analítica com suporte para determinação da massa imersa.

O processo para a obtenção dos resultados da porosidade aparente foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos – FEG – UNESP - Campus Guaratinguetá.

3.5.3 Resistência mecânica e o método estatístico de Weibull

Para a determinação da resistência mecânica fez-se o uso do ensaio de flexão de 3 pontos, e para cada tipo de processamento ensaiou-se 30 corpos cerâmicos. A determinação do módulo de ruptura por flexão em cerâmica vermelha é comum, como os trabalhos realizados por Vieira (2000), Grun (2007) e Teloeken (2011). Na Figura 27 apresenta-se uma foto do momento do ensaio de flexão.



Figura 27 – Situação típica para o ensaio de flexão de três pontos, Marca EMIC .

Os ensaios de flexão por três pontos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos Bloco I – FEG – UNESP – Campus Guaratinguetá.

3.5.4 Rugosidade

Neste trabalho a medição da rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro da Mitutoyo, SURFTEST 301, Figura 28, onde uma ponta de diamante percorre uma trajetória retilínea na superfície da peça. A trajetória, incluindo as irregularidades, analisada pelo aparelho indica um valor numérico ou imprime um gráfico com o perfil da rugosidade.



Figura 28 –Rugosímetro portátil modelo SurfTest 301 – marca Mitutoyo.

As medições da **Rugosidade** foram realizadas no Laboratório de Metrologia – FEG – UNESP – Campus Guaratinguetá.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discutidas as características dos materiais particulados e das amostras sinterizadas.

4.1 Material particulado

4.1.1 Método de seleção do solo

Na Figura 29 mostra-se a foto obtida após o ensaio de seleção do solo, que é um ensaio comparativo. O solo dentro do frasco divide-se em duas partes: no fundo, areia e em cima a argila.

Segundo as observações dos ceramistas, é considerado bom o solo que apresentar as duas camadas (areia e argila) iguais, e melhor ainda, se a camada de areia for um pouco maior que da argila. Se o resultado for diferente, dever-se-á misturar ao solo, quantidade suficiente do mineral carente, até a obtenção de uma mistura com as proporções recomendadas.

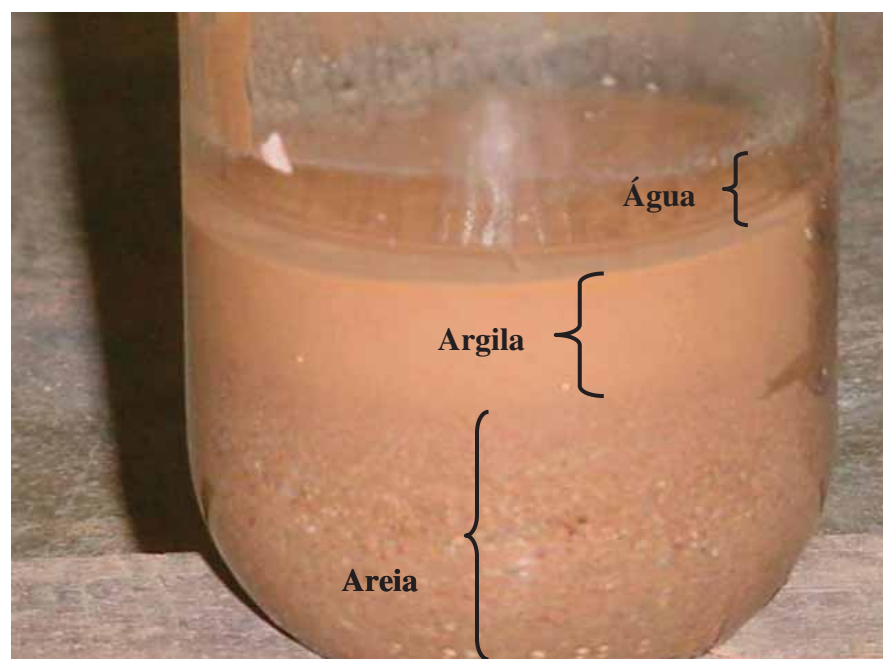


Figura 29. Exemplo de resultado do ensaio de seleção do solo da argila Santa Luzia.

Portanto, pode-se observar que a porção de argila é menor do que a de areia, o que significa um solo fácil de ser manuseado.

4.1.2 Difração de Raios - X

Na Figura 30 mostra-se o difratograma, a temperatura ambiente, da argila de Santa Luzia. [A identificação de fases (estruturas cristalinas) propriamente dita foi realizada por meio do uso de fichas apropriadas]. Por meio da identificação dos picos mais relevantes, observou-se a presença de caulinita, quartzo e muscovita, típicos da argila da região.

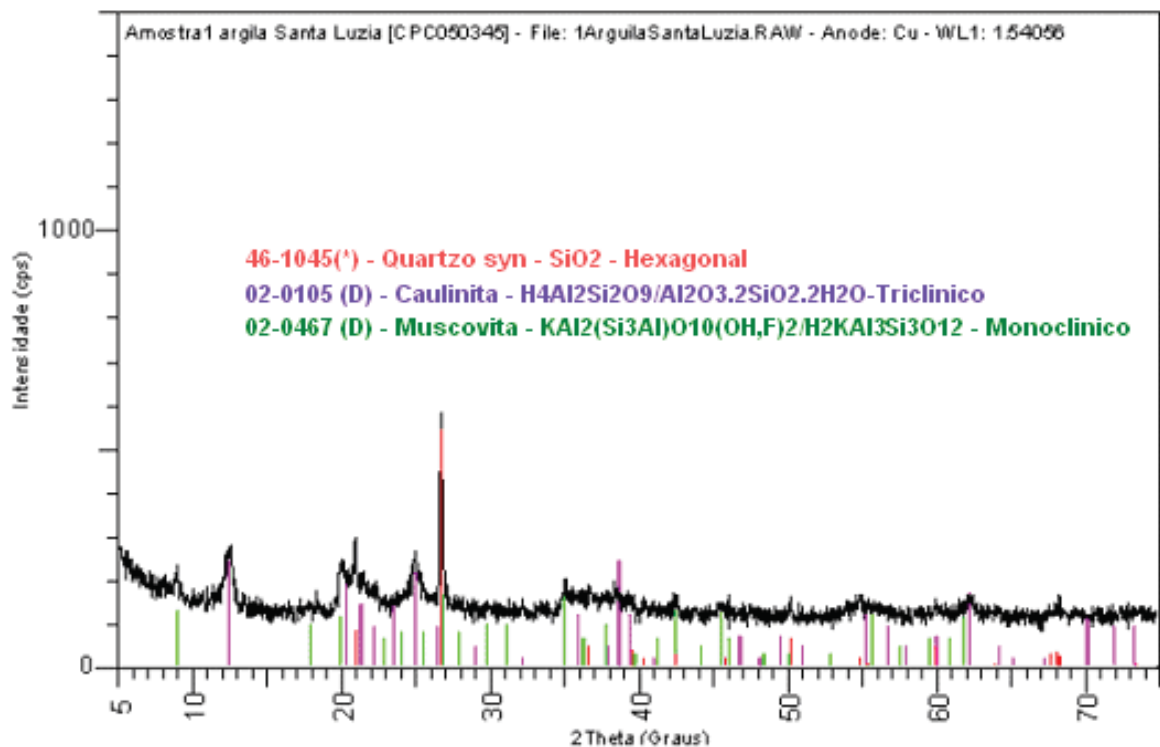
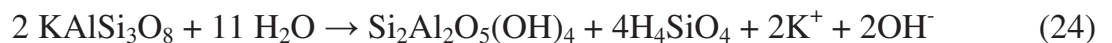


Figura 30 – Difratograma da amostra argila Santa Luzia, apresentando a identificação: quartzo, caulinita e muscovita.

O quartzo é uma das formas cristalinas da sílica (SiO₂), as outras duas são cristobalita e tridimita (raras na natureza). O quartzo possui estrutura cristalina trigonal

composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), pertencendo ao grupo dos tectossilicatos.

A caulinita é um argilomineral de alumínio hidratado, 1:1, formado pelo intemperismo gerado pela hidrólise parcial, em condições de drenagem menos eficientes, onde todo o potássio é totalmente eliminado pela quebra pela água, e 66% da sílica permanece no mineral, formado por meio da seguinte reação:



A caulinita (silicato de alumínio hidratado, com 39,5% Al_2O_3 - 46,5% SiO_2 - 14,0% H_2O) é matéria prima-básica da indústria cerâmica, para a fabricação da porcelana, louça sanitária etc.

A moscovita é um mineral do grupo dos filossilicatos (micas), com fórmula molecular ideal:



A moscovita caracteriza-se pela clivagem basal bem marcada e distingue-se da biotita em amostra de mão por ser incolor. De acordo com as impurezas presentes, a moscovita pode ser incolor (mais comum), marrom ou rósea. É um mineral muito comum nos granitos.

Na Figura 31 apresenta-se o difratograma do rejeito arenoso, e como era previsto, observa-se claramente a presença de quartzo (SiO_2) e também a presença de hematita (Fe_2O_3).

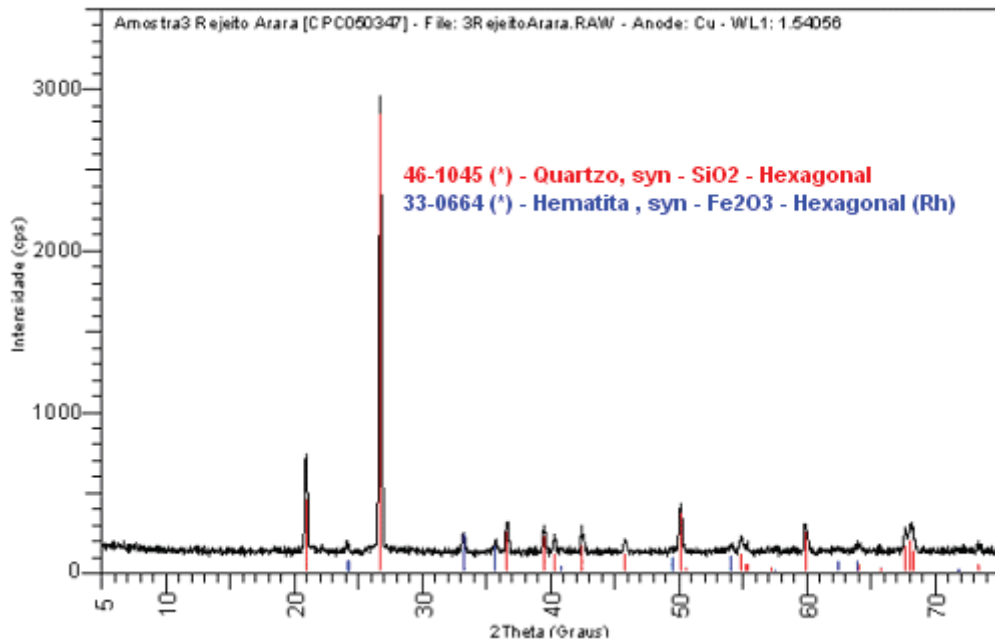


Figura 31 - Difratoograma da amostra rejeito arenoso, apresentando a identificação de quartzo e hematita.

A hematita é um mineral cuja fórmula química é dada por Fe₂O₃, um dos diversos óxidos de ferro.

Finalmente, na Figura 32, apresenta-se o difratograma do rejeito lama, neste caso além do quartzo e da hematita, nota-se, também, a presença da goetita.

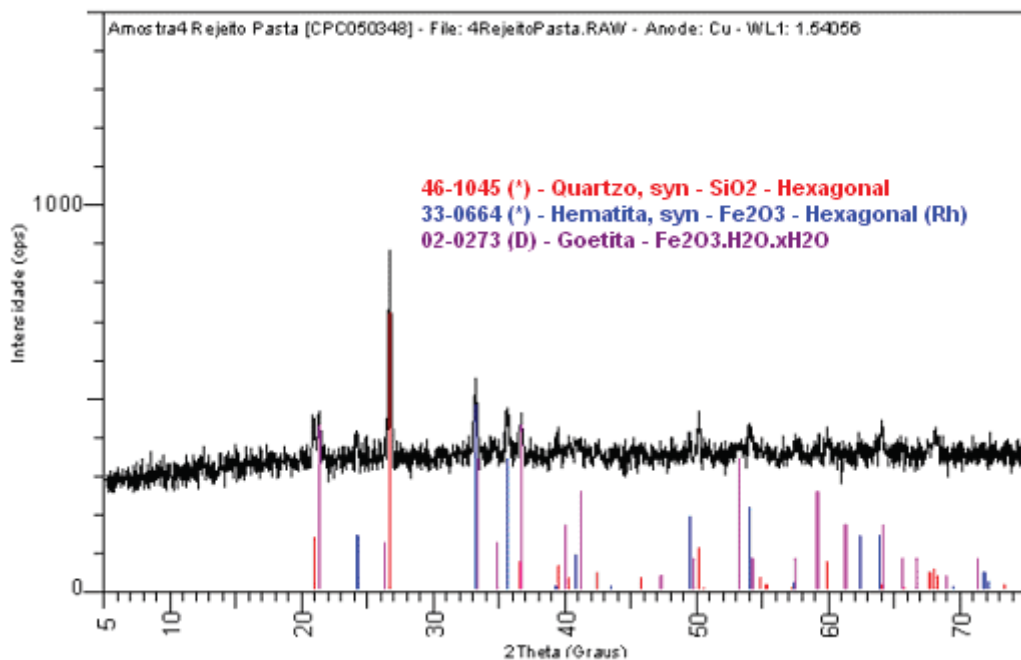


Figura 32. Difratoograma da amostra rejeito lama, apresentando a identificação de quartzo, hematita e goetita.

A goetita é um mineral de óxido de ferro, com fórmula química $\text{FeO}(\text{OH})$ que pode ocorrer em vários tons de castanho, laranja, amarelo e vermelho, o que faz variar da mesma forma a sua risca. É opaco e tem brilho adamantino. Este mineral aparece sob a forma de um agregado cristalino fibroso.

4.1.3 Análise química por fluorescência de Raios - X

Os resultados apresentados na Tabela 3 confirmam e quantificam o que foi observado na difração de raios-X. Com relação à argila, observa-se a presença em grande quantidade: de alumina (Al_2O_3), que tende a aumentar refratariedade da amostra (VIEIRA, 2000); de óxido de ferro Fe_2O_3 , que segundo Bitencourt (2004) e Grun (2007), é responsável pela coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas, reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem e, além disso, também diminui a resistência mecânica, porém o pouco ferro Fe_2O_3 que funde na sinterização proporciona dureza ao vidrado.

Tabela 3. Análise química do material particulado por fluorescência de Raios-X

Composição	Argila (%)	Rejeito arenoso (%)	Rejeito de lama (%)
SiO_2	51,08	75,42	41,15
Al_2O_3	27,94	0,23	1,76
Fe_2O_3	8,07	23,72	53,83
TiO_2	1,36	0,02	0,05
CaO	0,05	0,05	0,13
MgO	0,44	0,10	0,18
Na_2O	0,09	0,13	0,10
K_2O	1,36	0,02	0,06
P_2O_5	0,07	0,01	0,08
MnO	0,01	0,01	0,07
Cr_2O_5	0,01	0,01	0,01
Perda ao Fogo	9,51	0,29	2,59

Na argila observa-se ainda a presença de uma quantidade considerável de TiO_2 , que normalmente tende a gerar uma cor mais alaranjada (GRUN, 2007 e CAVALCANTI, 2009). Observa-se também os fundentes óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O): óxido de cálcio (CaO) e óxido magnésio (MgO), com maior presença de K_2O .

A perda ao fogo da argila chega a 9,5%, comum para a argila desta região. Observa-se ainda que a perda ao fogo do rejeito lama é maior que o arenoso, isto ocorre porque o rejeito lama apresenta maior quantidade de material orgânico e água. Por esta razão foi necessário um maior tempo de secagem e moagem deste material.

Pode-se perceber que a composição dos rejeitos são “ricos” em sílica e óxido de ferro, o rejeito arenoso possui cerca de 75% de SiO_2 e o rejeito lama 53% de Fe_2O_3 . Portanto, a quantidade de rejeito a ser agregado ao material base não pode ser elevada, pois, como já foi mencionada uma quantidade elevada de sílica, além de ser danoso ao equipamento, reduz a plasticidade da amostra. O excesso de óxido de ferro, além de alterar a coloração, pode reduzir a resistência mecânica da amostra.

4.1.4 Classificação granulométricas de partículas por peneiras

Na Tabela 4 pode-se observar o resultado da classificação granulométrica utilizando peneiramento. Este resultado mostra a distribuição granulométrica do material particulado e a seco.

Tabela 4. Classificação granulométrica de partículas por peneiras

Abertura (μm)	Malha (#)	Retido (%)		
		argila	Rejeito arenoso	Rejeito lama
590	30	23,68	1,88	3,97
250	60	27,60	0,52	11,43
149	100	20,49	10,15	72,12
74	200	15,68	38,30	8,90
	Fundo	12,55	49,15	3,57
	Total	100,00	100,00	100,00

Os resultados demonstram que o rejeito arenoso apresenta partículas mais finas, praticamente o material só foi retido na peneira de 74 μm . A argila apresenta uma quantidade grande de material “arenoso”, visto que 71,77% ficaram retidas nas peneiras maiores que 74 μm , uma vez que as argilas tem granulometria próxima a 5 μm .

4.1.5 Ensaio de limite de liquidez e plasticidade

Para definir a quantidade ideal de rejeito a ser adicionado a massa cerâmica partiu da noção de conformação ou seja, as amostras produzidas com a adição dos rejeitos deveriam apresentar valores de limite de liquidez e de plasticidade similares ao material de referencia (96% e 4% de carvão). Para isso utilizou-se o Critério do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Na Figura 33, apresenta-se o gráfico de limite de plasticidade em função do limite de liquidez. Os pontos discutidos neste gráfico referem-se a valores obtidos da adição de rejeito arenoso e rejeito lama no material de referência (Anexo A). A adição desses rejeitos a massa cerâmica está representada no gráfico, como:

Material de Referência:

- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão)

Variação de rejeito arenoso

- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 1% arenoso
- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 2,5% arenoso
- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 5% arenoso
- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 7,5% arenoso

Variação de rejeito de lama

- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 1% de lama

- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 2,5% de lama
- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 5% de lama
- Material base (96% de argila Santa Luzia mais 4% de Carvão) mais 7,5% de lama

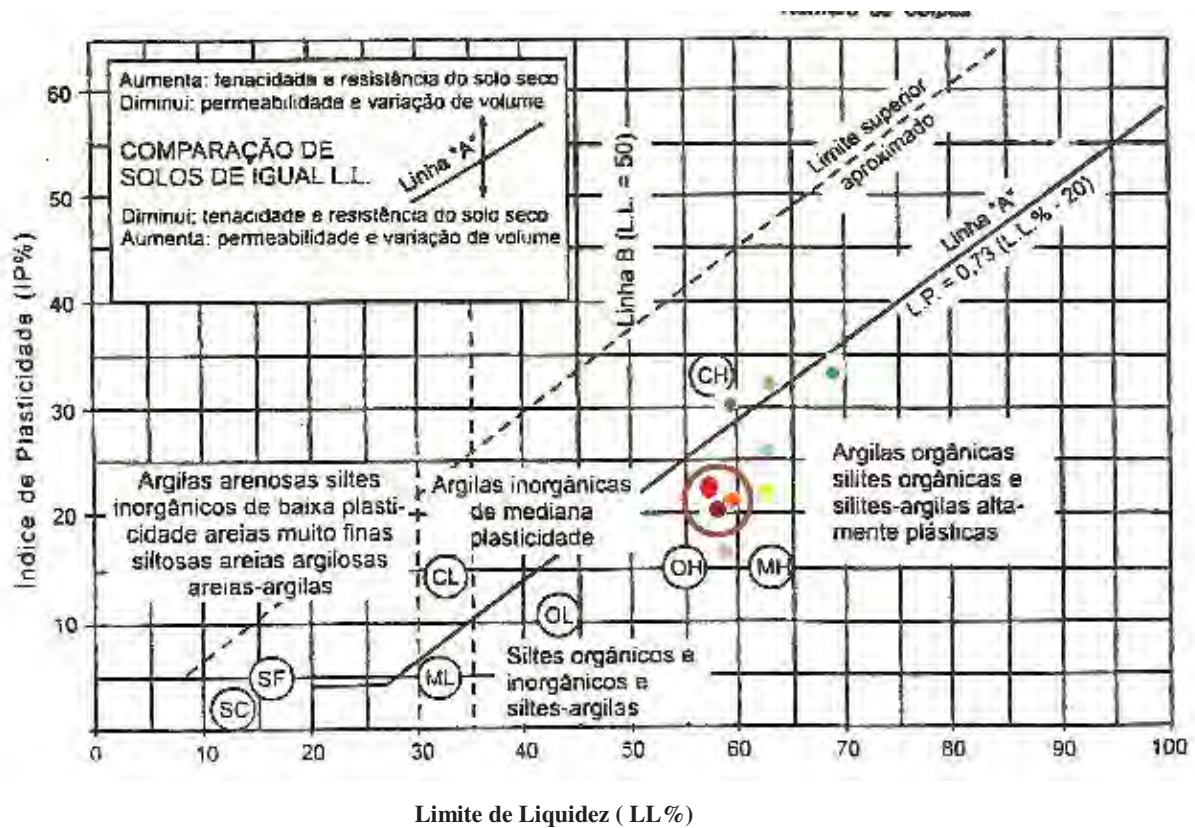


Figura 33. Gráfico do limite de liquidez e índice de plasticidade.

Conclui-se que para a confecção das amostras cerâmicas, levando em consideração o objetivo de se obter uma massa plástica, agregando a maior quantidade possível de rejeitos, mais próxima daquela que vem sendo utilizada na empresa cerâmica, o ideal seria adicionar 5% de rejeito lama, ou 7,5% de rejeito arenoso.

4.2 Caracterização das cerâmicas

4.2.1 Contração e perda de massa

A adição de rejeitos não alterou o comportamento das amostras com relação a perda de massa e retração linear.

Na Tabela 5, são mostrados alguns valores de temperatura nos quais foram feitas as medidas de comprimento e massa. Pode-se observar que os valores se mantiveram praticamente iguais, portanto, o uso destes rejeitos, na porcentagem especificada, não produzirá cerâmicas com dimensões finais diferentes.

Tabela 5. Caracterização das cerâmicas pelo método de contração e perda de massa.

Perda de massa (%)				
amostra	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
base	1,66 ± 0,09	3,7 ± 0,25	7,87 ± 0,10	12,25 ± 1,80
arenoso	1,69 ± 0,12	3,50 ± 0,73	7,61 ± 1,37	10,67 ± 0,77
lama	1,83 ± 0,12	4,11 ± 0,27	8,03 ± 0,17	11,04 ± 0,15
Retração linear				
base	0,15 ± 0,11	0,01 ± 0,06	0,87 ± 0,21	1,00 ± 0,14
arenoso	0,24 ± 0,24	0,16 ± 0,36	1,42 ± 0,11	1,96 ± 0,18
lama	0,42 ± 0,13	0,04 ± 0,12	0,81 ± 0,31	0,97 ± 0,27

4.2.2 Análise térmica

Na Figura 34 são apresentadas as curvas da análise termogravimétricas. Observa-se que as curvas são similares, com perda de massa em torno dos mesmos valores de temperatura de 140°C, 300°C e 560 °C. Segundo (VIEIRA, 2000) os valores iniciais estão relacionados à eliminação da água. A perda de massa entre 220°C e 400°C estão relacionados à carbonização de matéria orgânica e perdas do grupo OH provenientes de hidróxidos. A perda de 420 a 630°C já está relacionada à dissociação da água de constituição dos argilominerais.

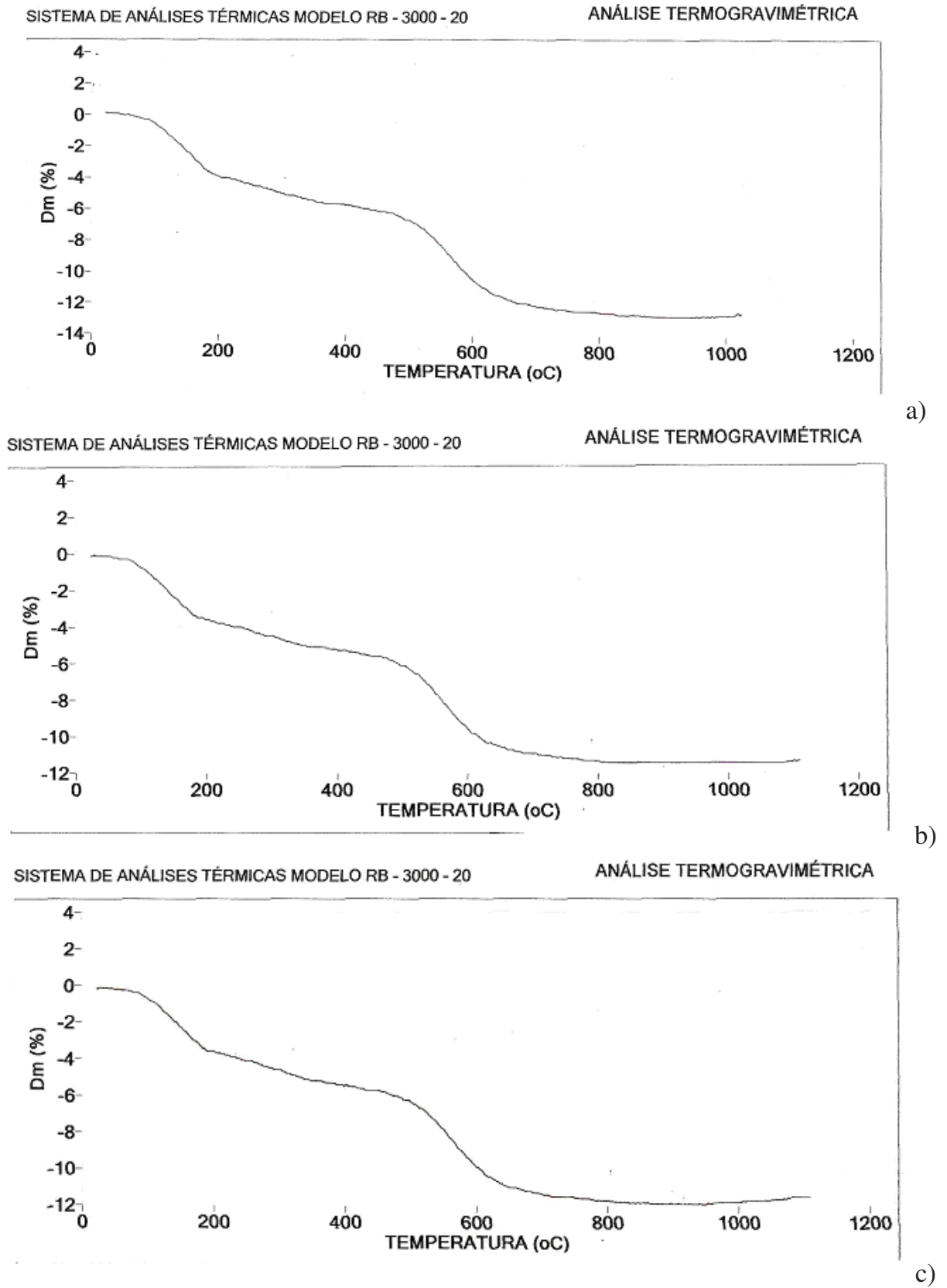


Figura 34. ATG: a) material base, b) material base acrescido de 7,5% de rejeito arenoso e c) material base acrescido de 5% de rejeito lama.

Nas curvas da análise térmica diferencial, Figura 35, observam -se dois picos endotérmicos em torno de 150 °C e 580 °C. Segundo Viera (2000) e Souza (1978) referem-se a perda de água e a liberação coordenada aos cátions e/ou perda de hidroxilas, provenientes de eventuais hidróxidos. Observa-se também um pico exotérmico 920 °C que segundo Vieira (2000) está relacionado à nucleação da mulita ortorrômbica e formação de espinélio silício-alumínio, com provável decomposição de pequena quantidade de carbonatos.

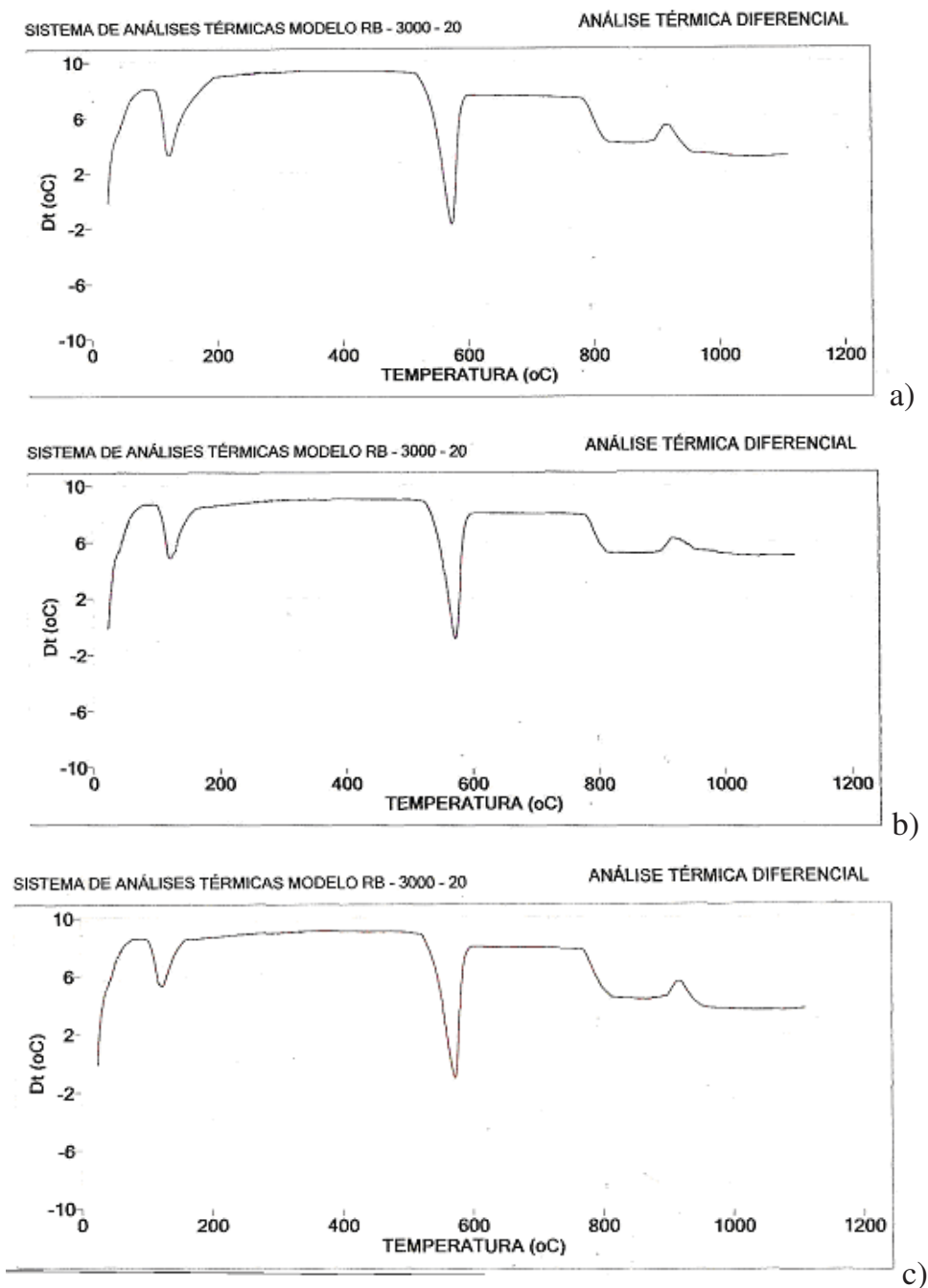


Figura 35. ATD: a) material base, b) material base acrescido de 7,5% de rejeito arenoso e c) material base acrescido de 5% de rejeito lama.

4.2.3 Porosidade aparente e rugosidade

Na Tabela 6 são apresentados os valores da análise de absorção de água segundo o Princípio de Arquimedes e os valores da rugosidade, estes valores são importantes para utilização em cerâmica vermelha, sendo relevante a informação dos valores de absorção de água, que estão dentro dos valores da literatura (VIEIRA, 2000; GRUN, 2007; TELOEKEN, 2011); os valores de rugosidade não apresentam alterações significativas com a adição dos rejeitos, ou seja, superficialmente, não tendem a diminuir a resistência mecânica das amostras, com relação à falha de Griffith.

Tabela 6. Valores da absorção de água, porosidade e massa específica, e de rugosidade superficial das amostras

Absorção de água			
Amostra	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm³)
Base	20,76 ± 0,89	36,48 ± 0,94	1,76 ± 0,04
c/ rejeito arenoso	20,28 ± 0,70	35,90 ± 0,80	1,77 ± 0,02
c/ rejeito lama	21,13 ± 0,83	37,07 ± 0,88	1,76 ± 0,03
Rugosidade			
Amostra	Ra (µm)	R_{3z} (µm)	Rt (µm)
Base	3,10 ± 1,32	5,35 ± 3,33	26,80 ± 10,37
c/ rejeito arenoso	3,96 ± 1,90	4,66 ± 2,29	39,05 ± 21,29
c/ rejeito lama	4,28 ± 2,49	4,70 ± 2,79	43,32 ± 20,13

4.2.4 Resistência mecânica

Nas Figuras 36 e 37 são mostrados os diagramas de Weibull da amostra base e das amostras com adição de rejeitos, apresentando as curvas do $\ln(\ln(1/(1-P)))$, em função do $\ln \sigma$ e da Probabilidade (P) em função da tensão de ruptura (σ), em MPa, respectivamente.

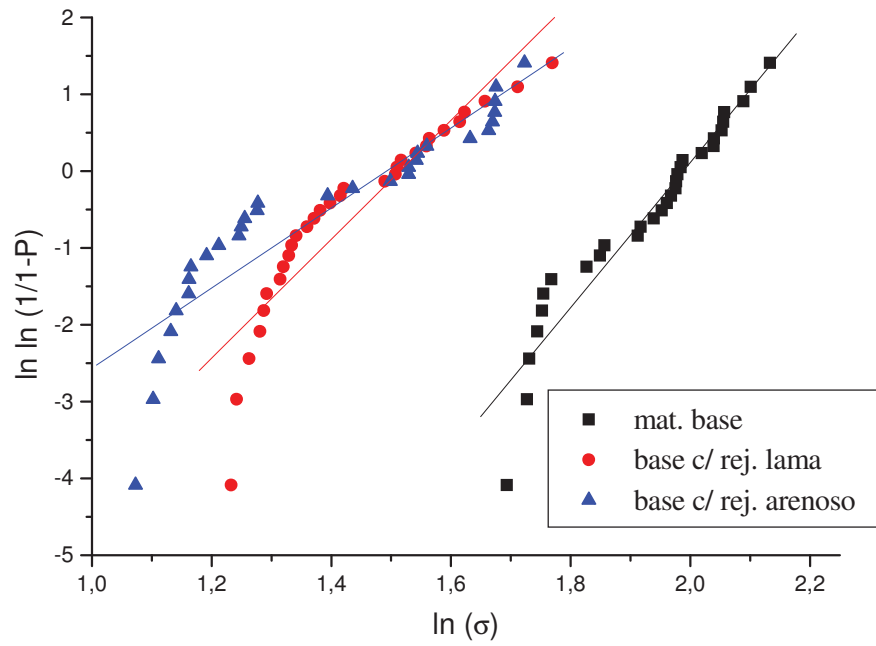


Figura 36. Diagramas de Weibull, $\ln(\ln (1/1-P))$ em função do $\ln \sigma$

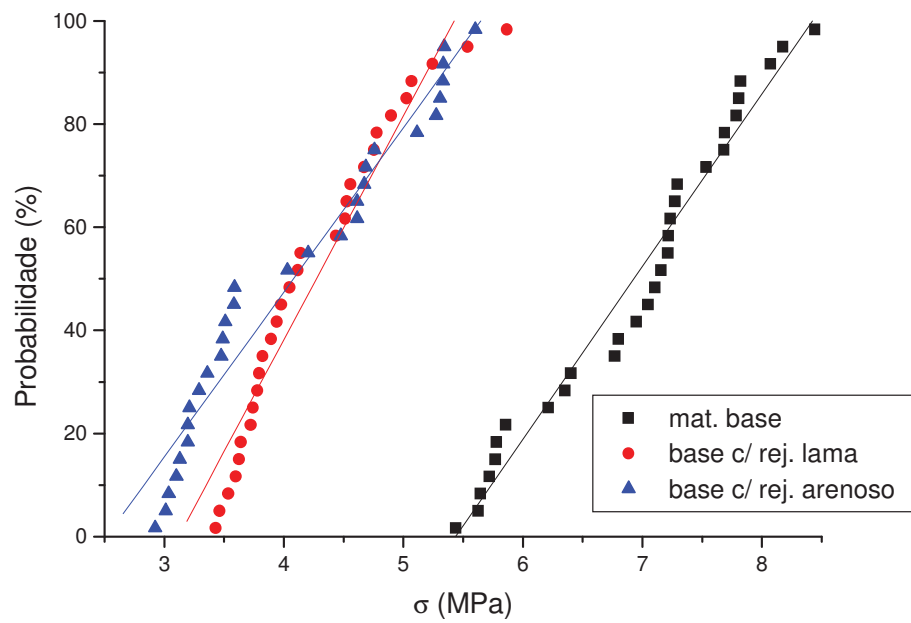


Figura 37. Diagrama de Weibull, probabilidade em função da tensão de ruptura

Na Tabela 7 apresentam-se os valores determinados após os ensaios de flexão e análise pelo método estatístico de Weibull. Observa-se que o acréscimo dos rejeitos reduziu os valores da resistência mecânica, mas não de maneira acentuada, o que impossibilitaria a sua utilização. Além disso, um ponto muito importante foi a verificação que as amostras obtidas utilizando os rejeitos se mostram mais confiáveis com relação à homogeneidade, apresentando os valores dos módulos de Weibull mais elevados.

Segundo Vieira (2000), que em seu trabalho com cerâmica vermelha determinou o módulo de ruptura à flexão por 3 pontos, os valores especificados nas normas para a fabricação de tijolos maciços e blocos cerâmicos, são de 2,0 MPa e 5,5 MPa, respectivamente. Para a obtenção de telhas, o valor especificado de 6,5 MPa. Já para a obtenção de revestimento cerâmico de parede, a resistência mecânica mínima exigida é de 12 MPa para produtos com espessura menor que 7,5 mm. Para aplicação como pavimento, a resistência mecânica mínima é de 18 MPa.

Tabela 7. Valores do módulo de ruptura e do módulo de Weibull.

Amostra	σ_{50} (MPa)	σ_0 (MPa)	m
Base	7,07	7,36	3,8
c/ rejeito arenoso	4,08	4,45	5,2
c/ rejeito lama	4,27	4,55	7,7

Para Teloeken (2011) o valor de resistência mecânica para utilização das amostras como bloco cerâmico está dividida em classes, sendo o valor mínimo de 1 MPa. Para telhas o valor varia de 6,8 a 9,8 MPa e, no máximo, 12,7 MPa dependendo do tipo de telha.

Partindo destas condições, fica evidente que ao agregar os resíduos tem-se certo a sua utilização como tijolo maciço e também a sua utilização como bloco cerâmico para vedação.

CONCLUSÕES

Os rejeitos provenientes da mineradora, o arenoso e o de lama, basicamente, são constituídos de sílica e óxido de ferro. Sendo que o rejeito lama para a sua utilização é necessário, além da secagem, de um processo de moagem.

Para fabricação de cerâmica vermelha utilizando conformação por extrusão, tendo como referência o índice de plasticidade e o limite de liquidez, sugere-se que sejam agregados a massa cerâmica 7,5% de rejeito arenoso ou 5,0% de rejeito lama.

Em termos de tempo de processamento e economia financeira o uso do rejeito arenoso é mais viável, pois além de não necessitar de moagem, poderá ser utilizado em maior quantidade.

Essa quantidade de agregados não produz alterações na matéria prima no que diz respeito a análise térmica, todos os processos endotérmicos e exotérmicos são mantidos idênticos à amostra base.

A adição de rejeitos não produz alterações relevantes na absorção, na porosidade e na densidade das amostras prontas. Também não existe modificação significativa na rugosidade, portanto, a agregação dos rejeitos se mostra viável no aspecto de absorção.

Para a fabricação de tijolos maciços as amostras atingem os valores do módulo de ruptura à flexão exigidos pelas normas. Por tanto, para a produção de blocos cerâmicos a sua utilização é viável, porém, deve-se especificar uma classe. Uma possibilidade importante é sua utilização em cerâmica de vedação na construção civil.

Todas estas conclusões são válidas considerando o uso da argila do Bairro Santa Luzia da região de Guaratinguetá. Porém, para a adição destes rejeitos em outra argila, faz-se necessário um novo estudo partindo do gráfico de limite de liquidez e plasticidade.

REFERENCIAS

ABCERAM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, <disponível em <http://www.abceram.org.br>.> Acesso em 06 de setembro de 2011.

ACCHAR, W.; RULFF, B.; SEDAGADAES, A. **Effect of the incorporation of a spent catalyst reject from the petroleum industry in clay products.** Applied Clay Science, V. 42, p. 657 – 660, 2009.

ARRAIS, L. de S. **Estudo geotécnico dos solos residuais do Pré Cambriano da Região da Rodovia S.P.** 2000 .171. 276f. Projeto Integrado (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Guaratinguetá. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984, 3p.

AZEVEDO, F. S. V. **Os primórdios da Indústria Cerâmica em São Paulo.** Revista Cerâmica, São Paulo, 10 (40) : 25, 1964.

BASEGIO, T. M.; BERUTTI, F. A. BERGMANN, C.P.; **Aspectos Ambientais no uso de lodo de curtume como matéria-prima para cerâmica vermelha.** 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica Florianópolis S.C. – Anais. 2001

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos,. V. 2. 1994

BELLINGIERI, J. C. **As origens da Indústria Cerâmica em São Paulo** – Revista Cerâmica Industrial. V. 10 – n. 3. 2005

BITENCOURT, E. R. **Utilização de Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Tijolos de Argila Vermelha e Branca.** 2004. 50f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

BRETANHA, A. M. **Resistência a Sulfatos de Concretos Contendo diferentes Tipos de Cimento e Adições de Cinza de Casca de Arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.2000. 146p.

CAIRO, C. A. A. **Otimização de Parâmetros de Prensagem Isostática para Minimização de Defeitos de Compactação de Corpos Cerâmicos.** São Carlos. p. 18-30, 42, 53-56. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade federal de São Carlos. 1990.141 p.

CAMPO MAIOR, <disponível em <http://180graus.com/campo-maior/conheca-um-pouco-do-artesanato-de-campo-maior-298136.html>.> Acesso em 20 de outubro de 2011.

CAVALCANTI R.B., SOUSA, M. R. **Análise das propriedades tecnológicas dos produtos da cerâmica vermelha da cidade do Apodi.** Holos, Ano 25, V. 4. 2009.

CERALTEC CERÂMICA DE ALTA TECNOLOGIA, <disponível em http://www.apontador.com.br/local/sp/ibate/industrias/X2EBEHXCX/ceraltec_ceramica_de_alta_tecnologia.html .> Acesso em 20 de outubro de 2011.

CERÂMICA ART RIO, <disponível em <http://www.ceramicaartrio.com.br/> .> Acesso em 20 de outubro de 2011.

CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte.** 2009. 170 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais).Centro de Ciências Exatas e da Terra da UFRGN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

CHIANG, Y.M.; BIRNIE III, D. P.; KINGERY, W. D. **Physical Ceramics – Principles for Ceramic Science and Engineering**. 1ª ed. New York: John Wiley & Sons / M.I.T., 1997. p. 32-34, 360-361, 413-421, 485-486.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns**. 3ª ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 412p. 1974.

COMERCIAL TELES, <disponível em <http://comercialteles.com.br/loja/index.php?cPath=27&osCsid=c04ecf53b807da9d9536cbd7f7abf072> .> Acesso em 20 de outubro de 2011.

DICICO, <disponível em <http://www.dicico.com.br/blog/?tag=decoracao&paged=8> .> Acesso em 20 de outubro de 2011.

FROTA, L. C. **Alguns aspectos da produção de cerâmica popular no Brasil**. In: *Encontro Arte Cerâmica, 30º Congresso Brasileiro de Cerâmica popular no Brasil*, Anais. Rio de Janeiro. 1986.

GOMES, C. F. **ARGILAS – O que são e para que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.

GRUN, E. **Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina 2007.

GUIMARÃES, E.M. **Difratometria de Raio X**, Brasília; Departamento de Mineralogia Petrologia / I.G. / U.N.B., 1999 (Apostila do Mini Curso Ministrado no XXVII Congresso).

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1976. P. 3, 66, 787-788.

LADO B ESTUDIO, <disponível em http://ladobestudio.blogspot.com/2010/11/pintura_29.html > Acesso em 20 de outubro de 2011.

LOOK FOR DIAGNOSIS, <disponível em http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=%C3%93xido+De+Aluminio&lang=2 > Acesso em 20 de outubro de 2011.

MANFREDINI E SCHIANCHI <disponível em <http://www.manfredinieschianchi.com/208-4PO-plantas-para-ceramica-vermelha-e-para-produtos-extrudados-de-ceramica.htm> > acessado em 10 de novembro de 2011.

MARTINS, J. de S. A. **Escravidão em São Caetano do Sul (1598 – 1971)**. São Caetano do Sul: CEDI, 1988. 28p.

MÁS, E. **Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha**, Editora Pólo Produções Ltda, São Paulo, 2002.

MITUTOYO, Surfrest 301 **Rugosidade Superficial** – Uma abordagem prática. Manual Rugosímetro. 1994, p. 6-31.

MONTEIRO, A. L. A. **Um sistema para o cálculo da resistência mecânica de materiais frágeis, pelo uso do método estatístico de Weibull**. Monografia de especialização do curso de Informática empresarial – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001, p 64.

MUNZ, D.; FETT, T. **Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, materials selection**. Berlin: Springer, 1999. 298p.

NASCIMENTO, C. F. **Materiais Cerâmicos: Teoria e Aplicação**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão. São Luis – MA, 2007.

NEM, R. W. de A. **Utilização da Escória de Cobre na Fabricação de Tijolos Maciços em Solo-Cimento.** (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense. 1995. 88p.

NEVES, G.A. FERREIRA, H.C.; SILVA, M.C. **Potencial de utilização de resíduos de serragem de granito na fabricação de revestimento cerâmicos.** 44° Congresso Brasileiro de Cerâmica 2000. São Pedro. S.P.

NORTON, F. H. **Introdução à tecnologia cerâmica / Elements of Ceramics** Tradução de Jefferson Vieira de Souza, São Paulo: Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo. 1973. p. 1-21, 85-101.

NORTON, F. H. **Cerâmica Fina – Tecnologia Y Aplicaciones.** 1ª ed. Barcelona: Ediciones Omega S. A., 1975. p. 1-18.

OLX, <disponível em <http://sinop.olx.com.br/pictures/vermiculita-expandida-condicionador-de-solos-otimo-preco-iid-14887153> > acessado em 10 de novembro de 2011.

MIGLIORE JÚNIOR, A. R., ZANOTTO, E. D. **Sobre a determinação dos parâmetros de Weibull.** Cerâmica, 38 (253) janeiro/fevereiro 1992.

PEREIRA FILHO, L. I.; COSIN, S.; VALERA, T. S. ; TOFFOLI, S. M. **Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha.** 46° Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo S.P - Anais. 2002

PILEGGI, A. **Cerâmica no Brasil e no Mundo - 1ª.** Ed. São Paulo: Livraria Martins Editora, 1958. 290p.

PIORINO, F. N. **Sobre as Variáveis que Afetam a Avaliação do Módulo de Ruptura em Ensaios de Flexão.** São Carlos, 1990. p. 4, 7-11, 21, 39, 55-58, 114. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade federal de São Carlos. 1990.

PIORINO, F. N. **Avaliação Mecânica de Materiais Cerâmicos em Temperaturas Elevadas** – Potencial para Uso de Ensaio de Anel (Ring Test). 42º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Poços de Caldas, 1998 – v. 2, p. 784-785.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. **Importância da Composição Granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha**. Revista Cerâmica Industrial. v. 2 (01/02) –p. 31-35 – 1997.

RANIERI, M. G. A. **Aproveitamento dos Resíduos Industrial/Artesanal de Pedra-Sabão da Região de Ouro Preto**. 2011. 115f Tese (doutorado em Engenharia de Materiais). Guaratinguetá. UNESP. 2011.

REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**, New York John Wiley & Sons. 1995. 609p.

RIBEIRO, P. M.; ABRANTES, J. C. C. **Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de Algumas Variáveis e otimização Energética do Processo**. V. 6 – n. 2 março / abril – 2001 – p. 7-11 – Revista Cerâmica Industrial.

RUIZ, M. S. **O conflito entre urbanização e mineração de argilas no município de Campinas**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociências. Campinas, 1989. 108p.

SANTOS, P S. **Ciência e Tecnologia de Argilas** 2ª ed. revisada e ampliada, São Paulo: Editora Edgard Blücher. 1989.

SEBRAE<disponível em
[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/947CE75D32DE1BCB832574C1004E1EC5/\\$File/NT00038DA6.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/947CE75D32DE1BCB832574C1004E1EC5/$File/NT00038DA6.pdf) > acessado em- 22 de outubro de 2011

SEGADÃES, A.M.; SILVA,J.B.; ACCHAR,W.; HORTZA, D. **Reaproveitamento da lama industrial de mármore e granito em massas argilosas** 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica João Pessoa, 2003

SHOW DE TELHAS, <disponível em <http://www.showdetelhas.com.br/materiais-refratarios.php> .> Acesso em 20 de outubro de 2011.

SKOOG, D. A., LEARY, J. J. **Principles of Instrumental Analysis**. 4ª ed. Florida: Saunders College Publishing, 1992. p. 568-575.

SUPPORT, <disponível em <http://www.supportmg.com.br/>> Acesso em 20 de outubro de 2011.

TELOEKEN, A. C., VILLANOVA, D. L., BASEGIO, T. M., BERGMANN, C. P. **Utilização de lodo galvânico como matéria-prima em cerâmica vermelha e caracterização dos corpos cerâmicos obtidos quanto a propriedades tecnológicas e a imobilização de metais**. Revista Cerâmica Industrial. V. 16, n. 2. 2011. p.14 – 19

USLU, T.; AROL, A. I. **Use of boron waste as an additive in red bricks**. Waste Manegement. V. 24, I.2, 2004, p 217 - 220

VIEIRA, C. M. F., HOLANDA J. N. F., PINATTI, E D. G. **Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes** – RJ. Cerâmica v. 46 n. 297. São Paulo Jan./Feb./Mar. 2000

WU, D., JIANG, H. **Comment on “A new probability index for estimating Weibull modulus for ceramics with least-square method”**. Journal of Materials Science Letters 22, 2003, 1745-1746.

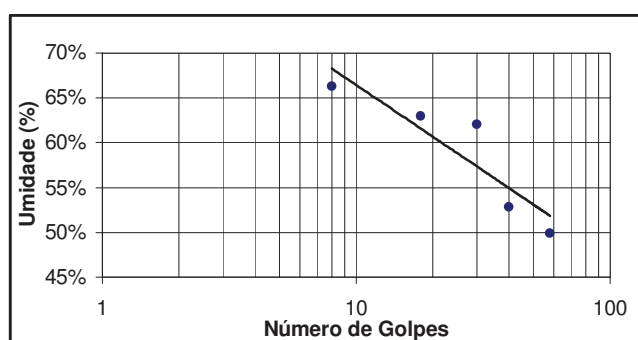
ZAVAGLIA, C. A. **Introdução à Tecnologia de Materiais Cerâmicos**. 1ª ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. p. 54-76. 1991

ANEXO A

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	m	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	g/cm ³	Operador:		
RESULTADOS	wnat (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
	0,0	58,0	34,4	23,6

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	P 05	P 10	P 02	P 04	P 03
Sólido + Tara + Água (g)	48,94	46,44	50,10	44,15	46,93
Sólido + Tara (g)	46,33	44,46	47,08	42,33	44,10
Tara (g)	41,10	40,71	42,21	39,44	39,83
Água (g)	2,61	1,98	3,02	1,82	2,83
Sólido (g)	5,23	3,75	4,87	2,89	4,27
Umidade (%)	49,9%	52,8%	62,0%	63,0%	66,3%
Número de Golpes	58	40	30	18	8

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

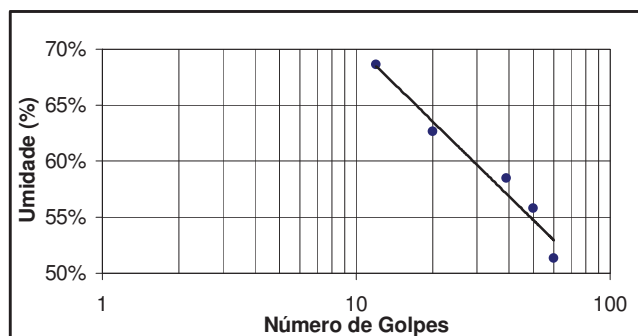


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	PP 77	P 68	P 66	P 76	P 67
Sólido + Tara + Água (g)	13,47	13,81	13,30	15,17	11,80
Sólido + Tara (g)	13,29	13,67	13,14	14,99	11,53
Tara (g)	12,75	13,15	12,68	14,50	10,86
Água (g)	0,18	0,14	0,16	0,18	0,27
Sólido (g)	0,54	0,52	0,46	0,49	0,67
Umidade (%)	33,3%	26,9%	34,8%	36,7%	40,3%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	base c/ 1 % rejeito arenoso	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	62,0	38,0	24,0

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 24	M 30	M 01	M 25	M 23
Sólido + Tara + Água (g)	17,49	19,75	18,36	20,11	20,12
Sólido + Tara (g)	15,41	17,01	15,77	16,84	16,97
Tara (g)	11,36	12,10	11,34	11,62	12,38
Água (g)	2,08	2,74	2,59	3,27	3,15
Sólido (g)	4,05	4,91	4,43	5,22	4,59
Umidade (%)	51,4%	55,8%	58,5%	62,6%	68,6%
Número de Golpes	60	50	39	20	12

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

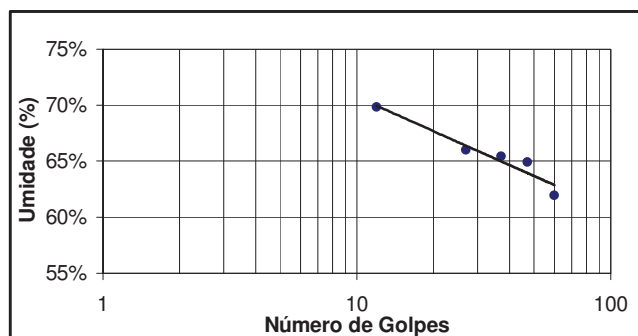


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 20	M 21	M 18	M 19	M 17
Sólido + Tara + Água (g)	12,70	12,33	12,21	12,42	13,24
Sólido + Tara (g)	12,40	12,07	11,98	12,18	13,03
Tara (g)	11,62	11,40	11,35	11,56	12,47
Água (g)	0,30	0,26	0,23	0,24	0,21
Sólido (g)	0,78	0,67	0,63	0,62	0,56
Umidade (%)	38,5%	38,8%	36,5%	38,7%	37,5%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 2,5% rej. Arenoso	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	67,0	33,0	34,0

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 29	M 05	M 14	M 22	M 06
Sólido + Tara + Água (g)	17,54	16,97	19,52	16,54	19,60
Sólido + Tara (g)	15,18	14,84	17,08	14,54	16,73
Tara (g)	11,37	11,56	13,35	11,51	12,62
Água (g)	2,36	2,13	2,44	2,00	2,87
Sólido (g)	3,81	3,28	3,73	3,03	4,11
Umidade (%)	61,9%	64,9%	65,4%	66,0%	69,8%
Número de Golpes	60	47	37	27	12

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

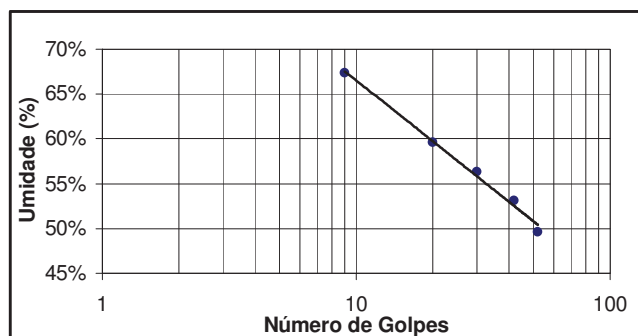


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 07	M 08	M 09	M 10	M 12
Sólido + Tara + Água (g)	13,50	12,17	12,60	11,69	12,36
Sólido + Tara (g)	13,25	11,92	12,31	11,57	12,15
Tara (g)	12,51	11,15	11,52	11,17	11,49
Água (g)	0,25	0,25	0,29	0,12	0,21
Sólido (g)	0,74	0,77	0,79	0,40	0,66
Umidade (%)	33,8%	32,5%	36,7%	30,0%	31,8%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 5% rej. Arenoso	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	58,0	41,3	16,7

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	P 05	P 10	P 02	P 04	P 03
Sólido + Tara + Água (g)	45,02	45,12	52,76	46,35	46,71
Sólido + Tara (g)	43,72	43,59	48,96	43,77	43,94
Tara (g)	41,10	40,71	42,21	39,44	39,83
Água (g)	1,30	1,53	3,80	2,58	2,77
Sólido (g)	2,62	2,88	6,75	4,33	4,11
Umidade (%)	49,6%	53,1%	56,3%	59,6%	67,4%
Número de Golpes	52	42	30	20	9

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

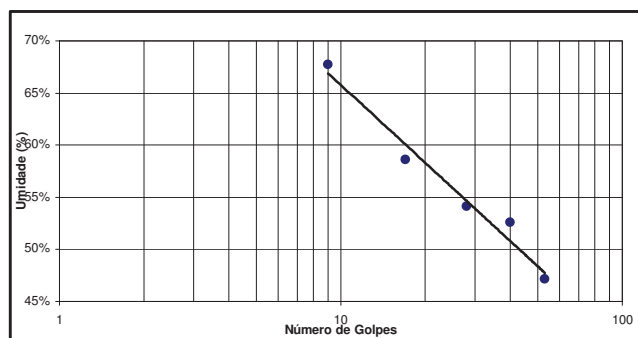


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	PP 77	P 68	P 66	P 76	P 67
Sólido + Tara + Água (g)	13,92	14,24	13,41	15,43	11,58
Sólido + Tara (g)	13,56	13,93	13,19	15,16	11,38
Tara (g)	12,75	13,15	12,68	14,50	10,86
Água (g)	0,36	0,31	0,22	0,27	0,20
Sólido (g)	0,81	0,78	0,51	0,66	0,52
Umidade (%)	44,4%	39,7%	43,1%	40,9%	38,5%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 7,5% rej. Arenoso	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	57,0	35,8	21,2

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 24	M 30	M 01	M 25	M 23
Sólido + Tara + Água (g)	14,98	20,92	19,54	19,85	24,39
Sólido + Tara (g)	13,82	17,88	16,66	16,81	19,54
Tara (g)	11,36	12,10	11,34	11,62	12,38
Água (g)	1,16	3,04	2,88	3,04	4,85
Sólido (g)	2,46	5,78	5,32	5,19	7,16
Umidade (%)	47,2%	52,6%	54,1%	58,6%	67,7%
Número de Golpes	53	40	28	17	9

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

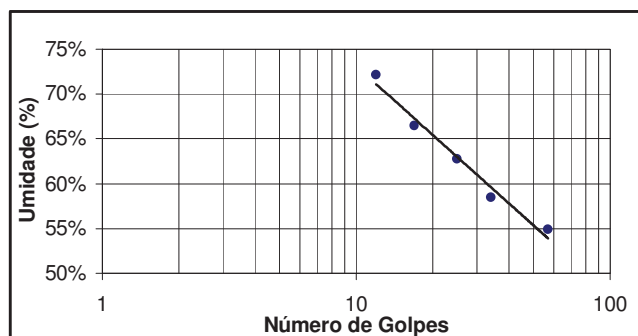


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 20	M 21	M 18	M 19	M 17
Sólido + Tara + Água (g)	12,71	12,19	11,95	12,49	13,29
Sólido + Tara (g)	12,40	11,99	11,81	12,25	13,09
Tara (g)	11,62	11,40	11,35	11,56	12,47
Água (g)	0,31	0,20	0,14	0,24	0,25
Sólido (g)	0,78	0,59	0,46	0,69	0,62
Umidade (%)	39,7%	33,9%	30,4%	34,8%	40,3%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 1% rej. Lama	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	63,0	37,1	25,9

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 29	M 22	M 14	M 05	M 06
Sólido + Tara + Água (g)	19,04	23,30	22,79	20,05	22,45
Sólido + Tara (g)	16,32	18,95	19,15	16,66	18,33
Tara (g)	11,37	11,51	13,35	11,56	12,62
Água (g)	2,72	4,35	3,64	3,39	4,12
Sólido (g)	4,95	7,44	5,80	5,10	5,71
Umidade (%)	54,9%	58,5%	62,8%	66,5%	72,2%
Número de Golpes	57	34	25	17	12

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

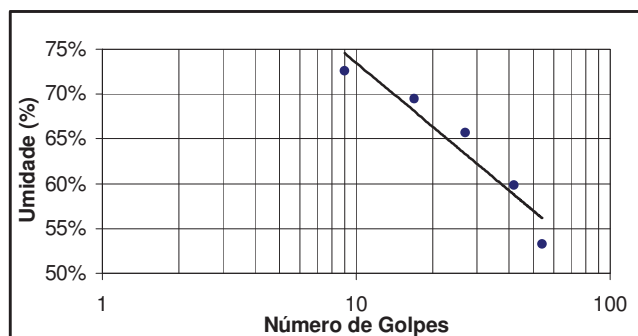


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 07	M 08	M 09	M 10	M 12
Sólido + Tara + Água (g)	13,56	11,80	12,47	12,02	12,35
Sólido + Tara (g)	13,28	11,63	12,22	11,79	12,10
Tara (g)	12,51	11,15	11,52	11,17	11,49
Água (g)	0,28	0,17	0,25	0,23	0,25
Sólido (g)	0,77	0,48	0,70	0,62	0,61
Umidade (%)	36,4%	35,4%	35,7%	37,1%	41,0%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 2,5% rej.lama	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	63,0	29,2	33,8

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 29	M 22	M 14	M 05	M 06
Sólido + Tara + Água (g)	19,11	20,30	23,54	20,32	23,44
Sólido + Tara (g)	16,42	17,01	19,50	16,73	18,89
Tara (g)	11,37	11,51	13,35	11,56	12,62
Água (g)	2,69	3,29	4,04	3,59	4,55
Sólido (g)	5,05	5,50	6,15	5,17	6,27
Umidade (%)	53,3%	59,8%	65,7%	69,4%	72,6%
Número de Golpes	54	42	27	17	9

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

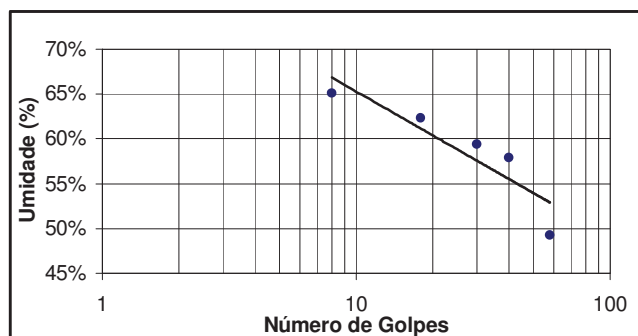


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 07	M 08	M 09	M 10	M 12
Sólido + Tara + Água (g)	13,13	11,87	11,99	11,71	11,99
Sólido + Tara (g)	12,97	11,70	11,90	11,58	11,89
Tara (g)	12,51	11,15	11,52	11,17	11,49
Água (g)	0,16	0,17	0,09	0,13	0,10
Sólido (g)	0,46	0,55	0,38	0,41	0,40
Umidade (%)	34,8%	30,9%	23,7%	31,7%	25,0%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 5% rej. Lama	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	58,0	36,1	21,9

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	P 05	P 04	P 10	P 02	P 03
Sólido + Tara + Água (g)	47,52	48,85	51,53	50,91	47,54
Sólido + Tara (g)	45,40	45,40	47,50	47,57	44,50
Tara (g)	41,10	39,44	40,71	42,21	39,83
Água (g)	2,12	3,45	4,03	3,34	3,04
Sólido (g)	4,30	5,96	6,79	5,36	4,67
Umidade (%)	49,3%	57,9%	59,4%	62,3%	65,1%
Número de Golpes	58	40	30	18	8

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	

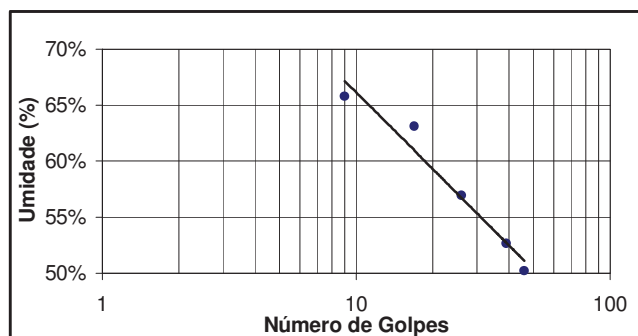


LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	PP 77	P 68	P 66	P 76	P 67
Sólido + Tara + Água (g)	13,52	13,93	13,46	15,07	11,40
Sólido + Tara (g)	13,32	13,73	13,25	14,92	11,25
Tara (g)	12,75	13,15	12,68	14,50	10,86
Água (g)	0,20	0,20	0,21	0,15	0,15
Sólido (g)	0,57	0,58	0,57	0,42	0,39
Umidade (%)	35,1%	34,5%	36,8%	35,7%	38,5%

LIMITES DE ATTEBERG		Local:		
ID.:	material base c/ 7,5% rej. Lama	Sondagem n° :	Amostra n° :	
Classificação:		Profundidade:	<i>m</i>	Data:
Massa Esp. dos Sólidos:	<i>g/cm³</i>	Operador:		
RESULTADOS	<i>w_{nat}</i> (%)	<i>LL</i> (%)	<i>LP</i> (%)	<i>IP</i> (%)
	0,0	58,0	27,8	30,2

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 24	M 30	M 01	M 25	M 23
Sólido + Tara + Água (g)	18,84	22,33	19,55	20,77	18,58
Sólido + Tara (g)	16,34	18,80	16,57	17,23	16,12
Tara (g)	11,36	12,10	11,34	11,62	12,38
Água (g)	2,50	3,53	2,98	3,54	2,46
Sólido (g)	4,98	6,70	5,23	5,61	3,74
Umidade (%)	50,2%	52,7%	57,0%	63,1%	65,8%
Número de Golpes	46	39	26	17	9

Umidade Higroscópica	
Cápsula n°	
Sólido + Tara + Água (g)	
Sólido + Tara (g)	
Tara (g)	
Água (g)	
Sólido (g)	
Umidade (%)	



LIMITE DE PLASTICIDADE					
Determinação n°	1	2	3	4	5
Cápsula n°	M 20	M 21	M 18	M 19	M 17
Sólido + Tara + Água (g)	12,26	12,38	11,77	11,85	12,96
Sólido + Tara (g)	12,15	12,12	11,68	11,79	12,85
Tara (g)	11,62	11,40	11,35	11,56	12,47
Água (g)	0,11	0,26	0,09	0,06	0,11
Sólido (g)	0,53	0,72	0,33	0,23	0,38
Umidade (%)	20,8%	36,1%	27,3%	26,1%	28,9%