

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ FRANCISCO DE LIMA**

**APROVEITAMENTO DA LAMA DE LAVAGEM DO MINÉRIO  
DE FERRO: ESTUDO DE CASO NA MINERAÇÃO URUCUM –  
CORUMBÁ/MS**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Florianópolis – Brasil  
2002

**APROVEITAMENTO DA LAMA DE LAVAGEM DO MINÉRIO  
DE FERRO: ESTUDO DE CASO NA MINERAÇÃO URUCUM –  
CORUMBÁ/MS**

**José Francisco de Lima**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:  
Construção Civil

Orientadora:  
Prof<sup>ª</sup>. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis – Brasil  
2002

LIMA, José Francisco de. **Aproveitamento da Lama de Lavagem do Minério de Ferro: Estudo de Caso na Mineração Urucum – Corumbá/MS.** Florianópolis, 2002. 75p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho avalia o aproveitamento da lama resultante da lavagem do minério de ferro produzido pela Mineração Urucum S/A, em Corumbá/MS, como adição nas argilas para fabricação de produtos cerâmicos, principalmente na chamada cerâmica vermelha. O processo de beneficiamento do minério consiste nas operações de britagem, lavagem e peneiramento, sendo que todos os produtos gerados, com exceção da lama, tem aplicações comerciais, sendo que a lama resultante deste processo é depositada em bacias de decantação, demandando cada vez mais áreas para a criação de novos depósitos.

Objetivando resposta quanto a validade do uso da lama como adição nas argilas para a fabricação de produtos cerâmicos, foram moldados corpos de prova com dois tipos de argila, uma oriunda de Corumbá/MS e outra de Campo Grande/MS, nas proporções de em massa de 0%, 10% e 20%.

Os resultados indicam que a lama, embora apresente alto teor de ferro, quase não altera as propriedades das argilas estudadas, melhorando algumas características destas, tais como absorção de água, porosidade aparente e retração, abrindo possibilidades para utilização deste resíduo.

Palavras-chave: Resíduos; Lama; Minério de Ferro.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 25.07.2002 pela Comissão  
Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha (UFSC) – Orientadora – Moderadora

---

Prof. Dr. Alfredo Roque Salvetti (Departamento de Física/UFMS)

---

Prof. Dr. João Cardoso de Lima (Departamento de Física /UFSC)

---

Prof. Dr. Malik Cheriaf (ECV/UFSC)

---

Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do PPGEC

À minha esposa Nágila,  
aos meus filhos Karina, Elói e Lisa  
e ao meu neto Gabriel,  
pelo apoio recebido.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, Suprema Inteligência do Universo, que permitiu-me alcançar este objetivo.

À Professora Janaíde Cavalcante Rocha, pela paciente orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Alfredo Roque Salvetti, grata prova de amizade, pelo tempo, disposição e conhecimentos dispendidos conosco.

Ao Professor Malik Cheriaf, cuja precisão nos comentários e disponibilidade de tempo, tornaram esta jornada mais agradável.

Ao Professor Humberto Ramos Roman, Coordenador deste Programa de Pós-Graduação na Universidade Federal de Santa Catarina, pelo profissionalismo na condução de seus deveres e pela amizade deixada.

Ao colega Wagner Augusto Andreasi, cuja luta tornou realidade este sonho.

Ao Técnico Evaldo de Souza Saraiva, do Laboratório de Materiais Cerâmicos da Departamento de Física da UFMS, pela colaboração prestada no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Marcelo Souza de Oliveira, do Laguna's 199, pelo necessário lazer.

Ao colega Engenheiro Civil Elói Azevedo Medeiros de Lima, pela ajuda prestada na elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT.....	xii
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1. Justificativa .....	01
1.2. Objetivo .....	02
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>04</b>
2.1. Introdução .....	04
2.2. Noções sobre a extração do minério de ferro no Morro do Urucum .....	07
2.3. Noções sobre a fabricação de alguns produtos cerâmicos de utilização na construção civil.....	08
2.4. Fabricação de placas cerâmicas para revestimento no Mato Grosso do Sul ....	11
2.5. A argila e a lama de lavagem do minério de ferro .....	12
2.6. A utilização da lama da lavagem do minério de ferro no produto cerâmico...	16
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
3.1. Introdução .....	20
3.2. Tratamento da lama .....	22
3.2.1. Moagem .....	23
3.2.2. Determinação do teor de umidade (H%) .....	24
3.2.3. Moldagem dos corpos de prova .....	26
3.2.4. Secagem dos corpos de prova .....	27
3.2.5. Queima dos corpos de prova .....	27
3.2.6. Determinação da massa específica aparente (MEA) .....	29
3.2.7. Determinação da porosidade aparente (PA%) .....	32
3.2.8. Determinação da absorção de água (AA%) .....	33
3.2.9. Determinação da perda de massa ao fogo (PF%) .....	33

3.2.10. Determinação da variação linear dimensional (VL%) .....	33
3.2.11. Determinação do módulo de resistência à flexão (MRF) ..	34
3.2.12. Determinação do índice de plasticidade (IP) ..	37
3.3. Tratamento da argila Corumbá .....	38
3.4. Tratamento da argila Campo Grande .....	39
3.5. Tratamento da argila Corumbá adicionada com a lama .....	39
3.6. Tratamento da argila Campo Grande adicionada com a lama .....	40
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1. Pressões de prensagem .....	41
4.2. Massa específica aparente (MEA) .....	42
4.3. Porosidade aparente (PA) .....	43
4.4. Absorção de água (AA) .....	44
4.5. Perda de massa ao fogo (PF) .....	46
4.6. Variação linear dimensional (VL) .....	47
4.7. Módulo de resistência à flexão (MRF) .....	48
4.8. Índice de plasticidade (IP) .....	49
4.9. Análises térmicas .....	50
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO VI – BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO A – Fotografias dos corpos de prova .....</b>	<b>62</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Localização da Urucum Mineração, em Corumbá/MS .....	5
<b>Figura 2</b> – Fluxograma da água de lavagem do minério de ferro .....	6
<b>Figura 3</b> – Micrografia da amostra de lama vermelha – Urucum (300x) .....	13
<b>Figura 4</b> – Micrografia da amostra de lama vermelha – Urucum (4800x) .....	14
<b>Figura 5</b> – Espectro químico da amostra de lama vermelha .....	15
<b>Figura 6</b> – Difratograma da lama estudada (LU) .....	15
<b>Figura 7</b> – Lama Urucum Natural .....	22
<b>Figura 8</b> – Moinho de cruzeta “Tigre”, modelo ML20/5 .....	23
<b>Figura 9</b> – Lama Urucum moída .....	24
<b>Figura 10</b> – Balança eletrônica “Denver Instrument”, modelo XL-3100 e dessecador com sílica-gel .....	25
<b>Figura 11</b> – Prensa hidráulica “Gabrielli”, modelo L4/110 .....	26
<b>Figura 12</b> – Estufa e forno elétrico “Brasimet” .....	28
<b>Figura 13</b> – Esquema da posição dos corpos de prova no forno .....	29
<b>Figura 14</b> – Balança hidrostática “Marte”, modelo AL 200C .....	31
<b>Figura 15</b> – Flexômetro “Gabrielli”, modelo CRAB-424 .....	36
<b>Figura 16</b> – Mostrador digital do flexômetro “Gabrielli”, modelo CRAB-424 .....	36
<b>Figura 17</b> – Gráfico da Massa Específica Aparente (MEA), em g/cm <sup>3</sup> .....	43
<b>Figura 18</b> – Gráfico da Porosidade Aparente (PA), em % .....	44
<b>Figura 19</b> – Gráfico da Absorção de Água (AA), em % .....	45
<b>Figura 20</b> – Gráfico da Perda de Massa ao Fogo (PF), em % .....	46
<b>Figura 21</b> – Gráfico da Variação Linear Dimensional (VL), em % .....	47
<b>Figura 22</b> – Gráfico do Módulo de Resistência à Flexão (MRF), em MPa .....	48
<b>Figura 23</b> – Curvas TMA para as amostras puras (LU, ACG e CB) .....	50
<b>Figura 24</b> – Curvas TMA para CB, C10 e C20 .....	51
<b>Figura 25</b> – Curvas TMA para ACG, CG10 e CG20 .....	51
<b>Figura 26</b> – Curvas TGA para as amostras puras (LU, ACG e CB) .....	52
<b>Figura 27</b> – Curvas TGA para as amostras CB, C10 e C20 .....	52
<b>Figura 28</b> – Curvas TGA para as amostras ACG, CG10 e CG20 .....	53

<b>Figura 29</b> – Fotografia dos corpos de prova “verde” .....	63
<b>Figura 30</b> – Fotografia dos corpos de prova queimados a 800°C .....	64
<b>Figura 31</b> – Fotografia dos corpos de prova queimados a 900°C .....	65
<b>Figura 32</b> – Fotografia dos corpos de prova queimados a 1000°C .....	66
<b>Figura 33</b> – Fotografia dos corpos de prova queimados a 1100°C .....	67
<b>Figura 34</b> – Fotografia dos corpos de prova queimados a 1150°C .....	68
<b>Figura 35</b> – Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande (ACG) .....	69
<b>Figura 36</b> – Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande + 10% lama Urucum (CG10) .....	70
<b>Figura 37</b> – Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande + 20% lama Urucum (CG20) .....	71
<b>Figura 38</b> – Fotografia dos Corpos de prova da argila Corumbá (CB) .....	72
<b>Figura 39</b> – Fotografia dos corpos de prova da argila Corumbá + 10% lama Urucum (C10) .....	73
<b>Figura 40</b> – Fotografia dos corpos de prova da argila Corumbá + 20% lama Urucum (C20) .....	74
<b>Figura 41</b> – Fotografia dos cones queimados .....	75

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> – Composição química do minério de ferro do morro do Urucum, em % em massa.....	14
<b>Tabela 2</b> – Análises químicas das lamas, em % em massa .....	18
<b>Tabela 3</b> – Pressões médias de prensagem dos corpos de prova e desvios-padrões, em kgf/cm <sup>2</sup> .....	42
<b>Tabela 4</b> – Massa Específica Aparente ( <b>MEA</b> ), em g/cm <sup>3</sup> .....	43
<b>Tabela 5</b> – Porosidade Aparente ( <b>PA</b> ), em % .....	44
<b>Tabela 6</b> – Absorção de Água ( <b>AA</b> ), em % .....	44
<b>Tabela 7</b> – Valores limites de absorção de água adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT/SP .....	45
<b>Tabela 8</b> – Perda de Massa ao Fogo ( <b>PF</b> ), em % .....	46
<b>Tabela 9</b> – Variação Linear Dimensional ( <b>VL</b> ), em % .....	47
<b>Tabela 10</b> – Módulo de Resistência à Flexão ( <b>MRF</b> ), em MPa.....	48
<b>Tabela 11</b> – Valores limites dos característicos cerâmicos para produtos estruturais adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT/SP .....	49
<b>Tabela 12</b> – Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Índices de Plasticidade, em % .....	50

## RESUMO

Este trabalho avalia o aproveitamento da lama resultante da lavagem do minério de ferro produzido pela Mineração Urucum S/A, em Corumbá/MS, como adição nas argilas para fabricação de produtos cerâmicos, principalmente na chamada cerâmica vermelha. O processo de beneficiamento do minério de ferro consiste nas operações de britagem, lavagem e peneiramento, sendo que todos os produtos gerados, com exceção da lama, tem aplicações comerciais, sendo que a lama resultante deste processo é depositada em bacias de decantação, demandando cada vez mais áreas para a criação de novos depósitos.

Objetivando resposta quanto a validade do uso da lama como adição nas argilas para a fabricação de produtos cerâmicos, foram moldados corpos de prova com dois tipos de argila, uma oriunda de Corumbá/MS e outra de Campo Grande/MS, nas proporções em massa de 0%, 10% e 20%.

Os resultados indicam que a lama, embora apresente alto teor de ferro, quase não altera as propriedades das argilas estudadas, melhorando algumas características destas, tais como absorção de água, porosidade aparente e retração, abrindo possibilidades para utilização deste resíduo.

## ABSTRACT

This work evaluates the profit of the mud that proceeds from the iron ore wash produced by Mineração Urucum S/A, in Corumbá/MS, as a supplement in argils for ceramics production, essentially in red ceramics. The iron ore betterment process consists in breaking, washing and sifting, and all remaining products, but the mud, have commercial applications. The remaining mud of this process is deposited in decantation basins, which demands, each time, more space to create new deposits.

In order to obtain answers about the validity of mud's utility as argils supplement for ceramics production, we moulded experiment with two kinds of argils, one kind from Corumbá/MS and another from Campo Grande/MS, with 0%, 10% and 20% mass proportions.

Although mud presents high quantity of iron, the results indicate that it almost doesn't alter the property of argils studied, improving its characteristics, as water absorption, apparent porosity and retraction, opening possibilities for the use of this residue.

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

A Mineração Urucum localiza-se no município de Corumbá/MS e situa-se a 32 Km ao sul desta cidade.

Segundo o Atlas Nacional do Brasil (IBGE), a região de Corumbá possui a seguinte classificação climática: grupo – climas secos, tipo – sub-úmido seco com nenhum excesso de água. A média anual de temperatura é de cerca de 27°C. A média das máximas em dezembro – mês mais quente – é de 33,8°C, com máxima absoluta de 41,8°C. A média das mínimas em julho – mês mais frio – é de 16,2°C, com mínima absoluta de 0,8°C.

A região caracteriza-se por duas estações pluviométricas bem definidas: a das chuvas, que vai de outubro a março, coincidente com os meses mais quentes e a da seca abrangendo o restante do período, com seu clímax em agosto. A precipitação pluviométrica total é da ordem de 1.300 mm/ano, com máxima em janeiro e mínima em agosto.

No morro do Urucum existem diversos córregos, muitos dos quais secam no período da seca. Os mais representativos são Urucum, Sem Nome e Arigolandia.

A Mineração Urucum sediada no morro de mesmo nome no município de Corumbá/MS, extrai minério de manganês e minério de ferro.

O método de lavra do minério de ferro eluvial que ocorre no topo do morro do Urucum, a uma cota de 1.000 metros, é do tipo céu aberto e é realizado por meio de

bancadas com altura máxima de 10 metros, não havendo necessidade do uso de explosivos pois o minério já está naturalmente desagregado.

O processo de beneficiamento do ferro consiste em britagem, lavagem e peneiramento. O minério de ferro é produzido em duas plantas situadas nas cotas 670 e 765, onde o material é britado e peneirado em peneiras vibratórias, em processo úmido. Neste processo são gerados os produtos ferro granulado ( $6,35\text{mm} \leq \phi \leq 38,10\text{mm}$ ), hematitinha ( $6,35\text{mm} \leq \phi \leq 9,53\text{mm}$ ), sinter-feed ( $\phi \leq 6,35\text{mm}$ ) e lama de minério de ferro.

A lama de lavagem do minério de ferro, objeto deste estudo, até meados de 1998 escoava através de calhas até seis bacias de decantação situadas na cota 620. Após a secagem natural, estas eram colocadas em caminhões basculantes através de carregadeiras e depositadas no pé do morro, na cota 58.

Como o processo era muito oneroso, a partir de 1998 foi implantado um novo sistema de tratamento da lama. Este novo sistema funciona da seguinte maneira: a lama efluente da lavagem do minério de ferro (cotas 670 e 765) é levada por gravidade através de canaletas até um espessador situado na cota 650, onde a parte mais sólida sedimenta e é escoada por meio de tubulações até as bacias de decantação situadas no pé do morro (cota 200) e a parte mais líquida retorna ao processo de lavagem do minério de ferro através de bombeamento.

## **1.2.Objetivo**

O volume de água consumido no processo é de aproximadamente  $60 \text{ m}^3/\text{hora}$ , sendo 60% reciclada e 40% lançada nas bacias de decantação. Como a operação da unidade de lavagem é contínua (24 horas/dia, 7 dias/semana), obtém-se um volume diário de lama de  $576,00 \text{ m}^3$ .

Segundo análise da Urucum Mineração S/A, a lama é constituída aproximadamente de 40% de materiais sólidos e 60% de água. Nas bacias de decantação a água evapora e os

materiais sólidos sedimentam, constituindo um volume de materiais sólidos de aproximadamente 230,40 m<sup>3</sup>/dia.

Todos os produtos gerados na extração do minério de ferro, com exceção da lama, tem aplicações comerciais, sendo vendidos nos mercados interno e externo. Desta forma, como a lama não tem aplicação comercial, são depositadas em bacias de decantação que com a sua utilização acabam cheias, demandando novas áreas para a criação de novas bacias.

Este estudo tem por objetivo avaliar a possibilidade técnica de utilização para este sub-produto da extração do minério de ferro, empregando-o como adição nas argilas de fabricação de produtos cerâmicos, principalmente na chamada cerâmica vermelha, que é a mais incidente na região.

A metodologia utilizada constou da análise da lama, de uma argila utilizada pelas olarias de Corumbá/MS, de uma argila utilizada por uma olaria de Campo Grande/MS e da adição, em massa, de 10%(dez por cento) e 20%(vinte por cento) da lama nas referidas argilas.

A escolha das porcentagens de 10% e 20% de adição da lama nas argilas foi feita em função da quantidade de resíduo existente viabilizando a sua utilização como mistura e, principalmente, para que não houvesse uma grande redução nas plasticidades das argilas estudadas.

Conclusivamente, apresentam-se os resultados obtidos como proposta de utilização da lama conjuntamente com as argilas na elaboração dos produtos cerâmicos produzidos na região visando a eliminação dos problemas técnicos, econômicos e ambientais de estocagem deste resíduo da extração do minério de ferro.



## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

A Mineração Urucum, sediada no morro de mesmo nome no município de Corumbá/MS, 32 Km ao sul desta cidade, extrai minério de manganês e minério de ferro (Figura 1).

A região caracteriza-se por duas estações pluviométricas bem definidas: a das chuvas, que vai de outubro a março, coincidentes com os meses mais quentes e a da seca abrangendo o restante do período. No sopé do morro do Urucum existem diversos córregos, muitos dos quais secam no período da seca.

O método de lavra do minério de ferro eluvial que ocorre no topo do morro, a uma cota de 1.000 metros, é do tipo céu aberto e é realizado por meio de bancadas com altura máxima de 10 metros, não havendo necessidade de explosivos nesta exploração pois o minério já encontra-se naturalmente desagregado.

O processo de beneficiamento do ferro consiste em britagem, lavagem e peneiramento. O minério de ferro é beneficiado em duas plantas situadas nas cotas 765 e 670, onde o material é britado e peneirado em peneiras vibratórias, em processo úmido, sendo gerados os produtos: ferro granulado ( $6,35\text{mm} \leq \phi \leq 38,10\text{mm}$ ), hematitinha ( $6,35\text{mm} \leq \phi \leq 9,52\text{mm}$ ), sinter-feed ( $\phi \leq 6,35\text{mm}$ ) e lama de minério de ferro.

A lama de lavagem do minério de ferro, objeto deste estudo, até meados de 1998 escoava por meio de calhas até seis bacias de decantação situadas na cota 620, donde, após



do processo, vez a água utilizada provem de minas existentes no próprio morro, nas lavras de manganês.

A partir de 1998 foi implantado um novo sistema de tratamento da lama, que funciona da seguinte maneira: a lama efluente da lavagem do minério de ferro (cotas 670 e 765) é levada por gravidade através de canaletas até um espessador situado na cota 650, onde a parte mais sólida sedimenta e é escoada por meio de tubulações até as bacias de decantação situadas no pé do morro (cota 200) e a parte mais líquida retorna ao processo de lavagem do minério de ferro através de bombeamento (Figura 2).

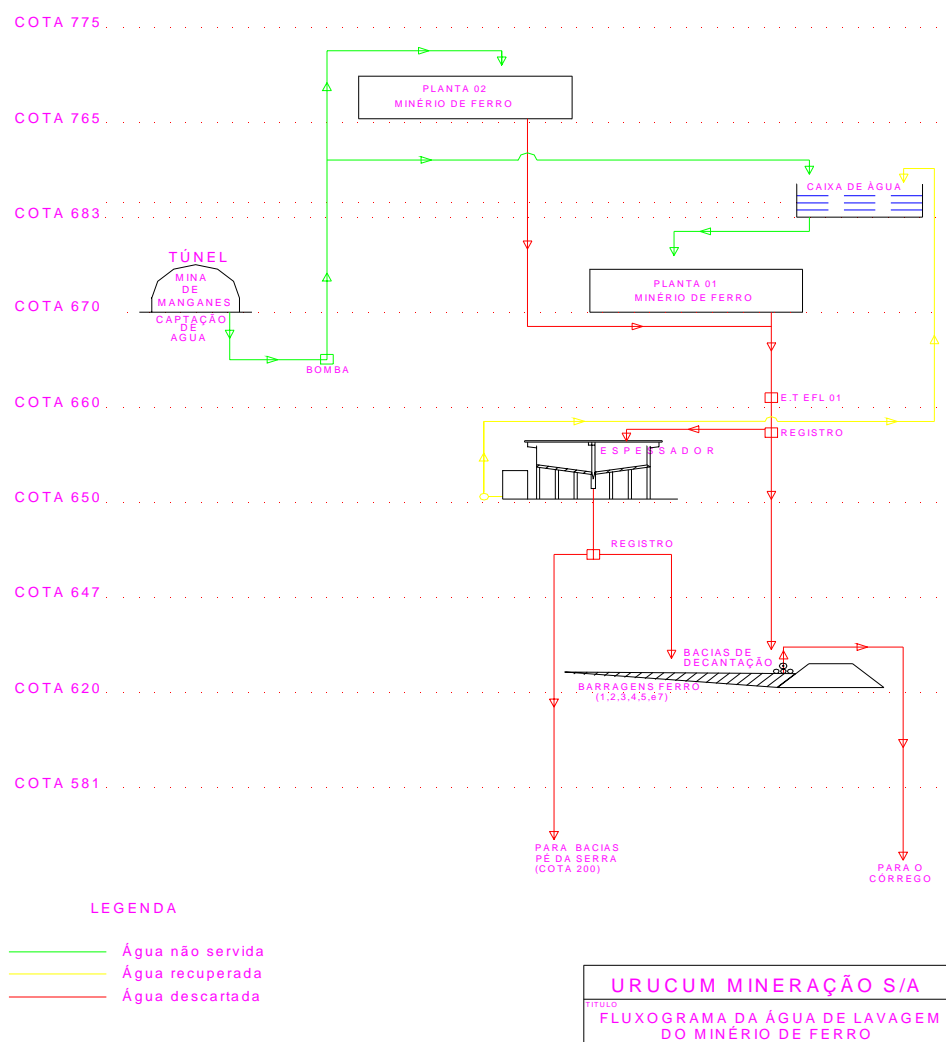


Figura 2: Fluxograma da água de lavagem do minério de ferro

O volume de água consumido no processo é de aproximadamente 60 m<sup>3</sup>/hora, sendo 60% reciclada e 40% lançada nas bacias de decantação. Como a operação da unidade de lavagem é contínua (24 horas/dia, 7 dias/semana), obtém-se um volume diário de lama da ordem de 576,00m<sup>3</sup>.

Segundo análise da Urucum Mineração S/A, a lama é constituída de aproximadamente 40% de materiais sólidos e 60% de água. Nas bacias de decantação a água evapora e os materiais sólidos sedimentam, donde obtém-se, finalmente, um volume de materiais sólidos em torno de 230,40 m<sup>3</sup>/dia.

Reaproveitar este material sólido, adicionando-o nas argilas utilizadas para a fabricação de produtos cerâmicos é o objetivo desta pesquisa.

## **2.2. Noções sobre a extração de minério de ferro no Morro do Urucum**

Segundo **CVRD-Revista** (1983), o manganês ocorre no Morro do Urucum sob a forma de criptomelano, em camadas na base, e intercalado por camadas bandeadas de óxido de ferro e de manganês, bem como camadas lenticulares de jaspe, siltito e arenito, denominada Formação Band'Alta. A primeira camada, no flanco Oeste do morro, onde é atualmente lavrada, intercepta-o na altitude de 670 metros e tem espessura que varia de 2,80 a 3,80 metros, sendo persistente em todo o morro. Essa camada acompanha o basculamento geral de Sul para Norte em torno de 7 graus, mas há pontos em que a camada se posiciona quase na horizontal, e outros em que apresenta quase 15 graus de mergulho. Na escarpa Oeste do morro, a camada apresenta apenas 1,5 metros de espessura. No nível imediatamente superior, a segunda camada possui as mesmas características físicas da primeira, mas as reservas são menores.

A formação ferrífera que capeia o morro do Urucum – onde, nos pontos de maior espessura, chega a atingir 200 metros – é constituída pelo jaspilite hematítico, que atinge teores entre 50% e 55% de ferro. Mas a extração deste minério é inviável economicamente

pela alta resistência mecânica que a rocha apresenta, o que dificulta a sua lavra. O minério de ferro aproveitável é o eluvião e o coluvião, provenientes do jaspilito hematítico.

O eluvião é o minério “in situ” que capeia toda a superfície do morro e que sofreu a lixiviação natural da sílica, tendo como consequência, a elevação do teor do ferro para 66,5% em média e a sua fácil desagregação da lavra, sendo dispensável a utilização de explosivos. O processo de lixiviação chega a atingir 15 metros de profundidade.

O coluvião forma leques de minério de ferro, nas encostas do morro, de potência variável, de acordo com a irregularidade do terreno. Esse minério, após concentrado, apresenta teor de 1,5% a 2,5% de manganês, pois a erosão retira fragmentos das camadas de óxido de manganês depois de diluído em seu seio.

No morro do Urucum, dentro das áreas pertencentes a Urucum Mineração, existe um potencial em torno de 50 milhões de toneladas de minério de ferro, tanto eluvial como coluvial, com teor acima de 65%.

### **2.3. Noções sobre a fabricação de alguns produtos cerâmicos de utilização na construção civil**

As indústrias cerâmicas sul-mato-grossenses trabalham basicamente alicerçadas em conhecimentos empíricos, utilizam-se de técnicas e equipamentos em boa parte obsoletos, e caracterizam-se pela produção de tijolos furados, tijolos maciços e telhas, secundados por lajotas e outros produtos de cerâmica vermelha para a construção civil. (Wengenroth, 1999).

O desenvolvimento tecnológico neste setor é bastante precário, a maior parte das indústrias utilizam fornos à lenha do tipo intermitente e apenas algumas possuem fornos contínuos; a mão-de-obra é geralmente desqualificada, sem formação técnica especializada e a estrutura organizacional de várias empresas é do tipo familiar, passando os conhecimentos e técnicas de geração para geração.

Estas peculiaridades na fabricação de produtos cerâmicos parecem não ser apenas uma característica das olarias sul-mato-grossenses, ocorrendo também na Região Sul, conforme afirma **Negreiros** (1994): “Ao mesmo tempo, percebe-se que a regra é a fabricação de produto de má qualidade e a escassez de pesquisas que possam minimizar os problemas que aparecem tanto no desenvolvimento do processo de fabricação do material cerâmico, na maior parte das vezes quase artesanal, quanto no uso do material fabricado.”

No entanto, a necessidade de melhorar esta tecnologia, tanto no que se refere à mão-de-obra como à qualidade dos materiais produzidos, passa pela da qualidade da matéria-prima utilizada.

A fabricação de produtos cerâmicos compreende várias fases, desde a exploração da jazida e tratamento prévio da matéria-prima, passando pela homogeneização, moldagem e secagem do material até sua queima.

As indústrias cerâmicas sul-mato-grossenses, na sua grande maioria, utilizam fornos à lenha intermitentes do tipo “abóbada” para a queima de seus produtos, algumas cerâmicas de maior porte utilizam fornos contínuos do tipo “túnel” e as olarias de pequeno porte e produção quase artesanal utilizam fornos do tipo “caipira”. Basicamente os produtos cerâmicos fabricados são tijolos furados, tijolos maciços, telhas, lajotas e outros produtos de cerâmica “estrutural” para a construção civil. (**Wengenroth**, 1999).

As cerâmicas ou olarias do Estado de Mato Grosso do Sul, utilizam como matéria-prima apenas um tipo de argila ou, às vezes, misturas de argilas de diferentes tipos ou procedências. Como exemplo, pode-se citar as cerâmicas de Rio Verde de Mato Grosso/MS que utilizam uma mistura de folhelho intemperizado e folhelho não intemperizado com argila de várzea para a produção de pisos cerâmicos, cujo objetivo é aumentar a plasticidade da massa cerâmica. Em algumas olarias de pequeno porte utilizam-se misturas de argilas de várzea com saibro com a finalidade de diminuir a retração do produto. Em Terenos/MS, misturava-se numa certa época carvão vegetal à argila da Formação

Aquidauana para auxiliar na queima do produto, obtendo-se uma queima mais uniforme com uma temperatura menor. (**Rodrigues**, 1998).

O tratamento da matéria-prima depende do trabalho da indústria e do produto a ser produzido. Desta forma, para a fabricação de tijolos maciços, o tratamento pode ser resumido em um amadurecimento e moldagem imediata da mistura na tijoleira; quando se trata da fabricação de tijolos furados, normalmente há um tratamento melhor da matéria-prima com a utilização de um número maior de equipamentos como peneirador, misturador e cilindro laminador, onde algumas impurezas são eliminadas, obtendo-se um material mais homogêneo.

A moldagem dos produtos cerâmicos é feita geralmente por métodos mecânicos: os tijolos furados e pisos são moldados por extrusão em marombas; as telhas por extrusão e prensagem e os tijolos maciços são moldados em equipamentos mecânicos denominados de tijoleiras, sendo que em algumas pequenas olarias a moldagem dos tijolos maciços é feita por método manual, utilizando-se formas de madeira. (**Rodrigues**, 1998).

A secagem da peça moldada, cuja finalidade é retirar de forma gradual a água utilizada para a moldagem, diminuindo as trincas e rachaduras, é feita nas pequenas olarias de produção de tijolo maciço em barracões e sem maiores cuidados; em olarias de maior porte a secagem se processa em estufas, sendo que algumas possuem ar quente aproveitado dos fornos de queima.

A queima, na maioria das vezes, é feita em fornos intermitentes do tipo chama invertida, comumente chamados tipo “abóbadas” e que consistem basicamente de câmaras circulares ou retangulares com teto em forma de abóbadas, construídos em alvenaria de tijolos maciços comuns. O resultado da queima não é totalmente uniforme, conforme cita **Rodrigues** (1998).

Um outro tipo de forno intermitente bastante utilizado em pequenas olarias para a fabricação de tijolos maciços é o “caipira”, que consiste de uma câmara retangular

descoberta, construído também de tijolos comuns. Os materiais a serem queimados são carregados manualmente para o interior da câmara e empilhados sobre o chão. A chama atinge o produto de baixo para cima, saindo os gases quentes por cima. Este tipo de forno apresenta baixa produtividade, com processo de queima que pode durar até quinze dias, ocasionando quase sempre defeitos no produto final, vez que a queima não é uniforme, pois as peças que ficam na parte inferior, que são atingidas diretamente pelas chamas, são excessivamente queimadas e as peças que ficam nos cantos e na parte superior costumam ficar mal cozidas com o miolo cru. O que se observa normalmente é que os critérios de operação destes fornos são estabelecidos de modo empírico e baseados na experiência e habilidade pessoal dos operadores.

Em algumas outras olarias, onde a escala de produção é maior, são utilizados fornos contínuos do tipo túnel. Estes fornos são constituídos, como o próprio nome diz, de um longo túnel feito de alvenaria de tijolos, onde o produto a ser queimado é acondicionado em vagonetes que entram por uma extremidade, passam pelos queimadores na parte central e saem na outra extremidade. Estes fornos possuem menor inércia térmica, melhor isolamento, queimadores de alta velocidade e controle de temperatura com aparelhagem moderna, permitindo uma maior uniformidade no produto final e queima mais eficiente do combustível.

Em Rio Verde de Mato Grosso/MS é utilizado um forno que tem a denominação local de “rotativo”, constituído de vários compartimentos ou câmaras que são utilizadas de forma alternada, utilizando o calor de resfriamento de uma câmara para a secagem dos produtos ainda “verdes” de outra câmara. (Rodrigues, 1998).

#### **2.4. Fabricação de placas cerâmicas para revestimento no Mato Grosso do Sul**

A fabricação de placas cerâmicas para revestimento no Estado do Mato Grosso do Sul ainda é incipiente, existindo apenas uma cerâmica em Rio Verde de Mato Grosso/MS que a produz. Estas placas com formato de tijolo comum, variando apenas a espessura que



é de aproximadamente 2 cm, são fabricadas em cerâmica vermelha e, usualmente, são utilizados como pisos de varandas e calçadas.

O processo de fabricação das placas consiste em:

- a) preparação da massa (mistura de matérias-primas), que pode ser feito por via seca ou úmida;
- b) conformação das peças, que normalmente são por prensagem ou extrusão;
- c) secagem, que consiste em submeter a peça a uma corrente de ar seco e aquecido para eliminação de água por evaporação superficial;
- d) esmaltação, que pode ser ou não realizada, dependendo do produto ser ou não esmaltado;
- e) queima, que é efetuada em fornos, objetivando consolidar o formato definido pela operação de conformação, pode classificar-se em rápida ou lenta de acordo com sua duração ou em monoqueima ou biqueima, em função da queima do “biscoito” ser realizada concomitantemente com a queima do esmalte. (Wengenroth, 1999).

## **2.5. A argila e a lama de lavagem do minério de ferro**

Segundo Santos (1989), a argila é uma rocha finamente dividida, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais e matéria orgânica. Possui elevado teor de partículas de granulometria abaixo de 2 micrômetros, é plástica quando pulverizada e rígida e dura após secagem e queima.

As características essenciais das argilas para serem usadas na fabricação de produtos de cerâmica vermelha são: ser de fácil moldagem, ter valor médio ou elevado para a tensão de ruptura à flexão, antes e após queimar; apresentar mínimo de trincas e empenamento. Estas características são determinadas pela plasticidade, pela capacidade de absorção e cessão de água e pelo seu comportamento ao calor (alteração de volume durante a secagem e a queima).

A plasticidade, a água de moldagem, o comportamento na secagem e na queima dependem da granulometria e dos diversos minerais presentes. (Santos, 1998).

A amostra da lama resultante da lavagem do minério de ferro proveniente do morro do Urucum, em Corumbá/MS, quando submetida a microscopia de varredura – MEV aumentada 300 vezes (Figura 3), apresenta de um modo geral uma estrutura floculada com partículas aglomeradas de dimensões inferiores a 5 micrômetros. Quando aumentada 4800 vezes (Figura 4), a estrutura da amostra apresenta-se sob a forma de sólido formado por plaquetas superpostas e por partículas dispostas de dimensões inferiores a 0,5 micrômetros.

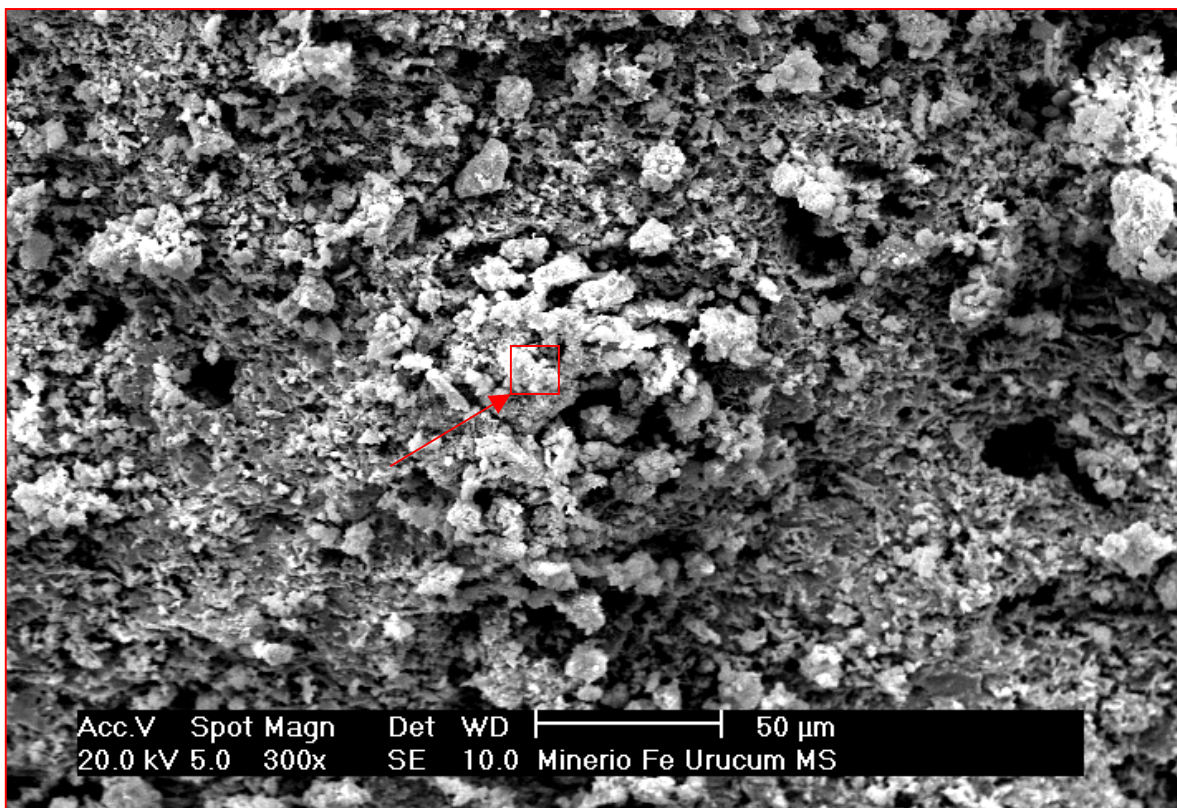


Figura 3: Micrografia da amostra de lama vermelha – Urucum (300x)

A análise química quantitativa realizada pela sonda EDAX, no local indicado na Figura 3, demonstra a presença de ferro, sílica, alumina e titânio (Figura 5).

Tais minerais são consequência da composição química do minério de ferro do morro do Urucum, conforme Tabela 1, que apresenta a média mensal das análises realizada pela própria mineradora.

Tabela 1: Composição química do minério de ferro do morro do Urucum, em % em massa

Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P	Mn	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	S	PPC
65,99	2,37	1,73	0,12	0,10	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	29,50

Fonte: Urucum Mineração S/A

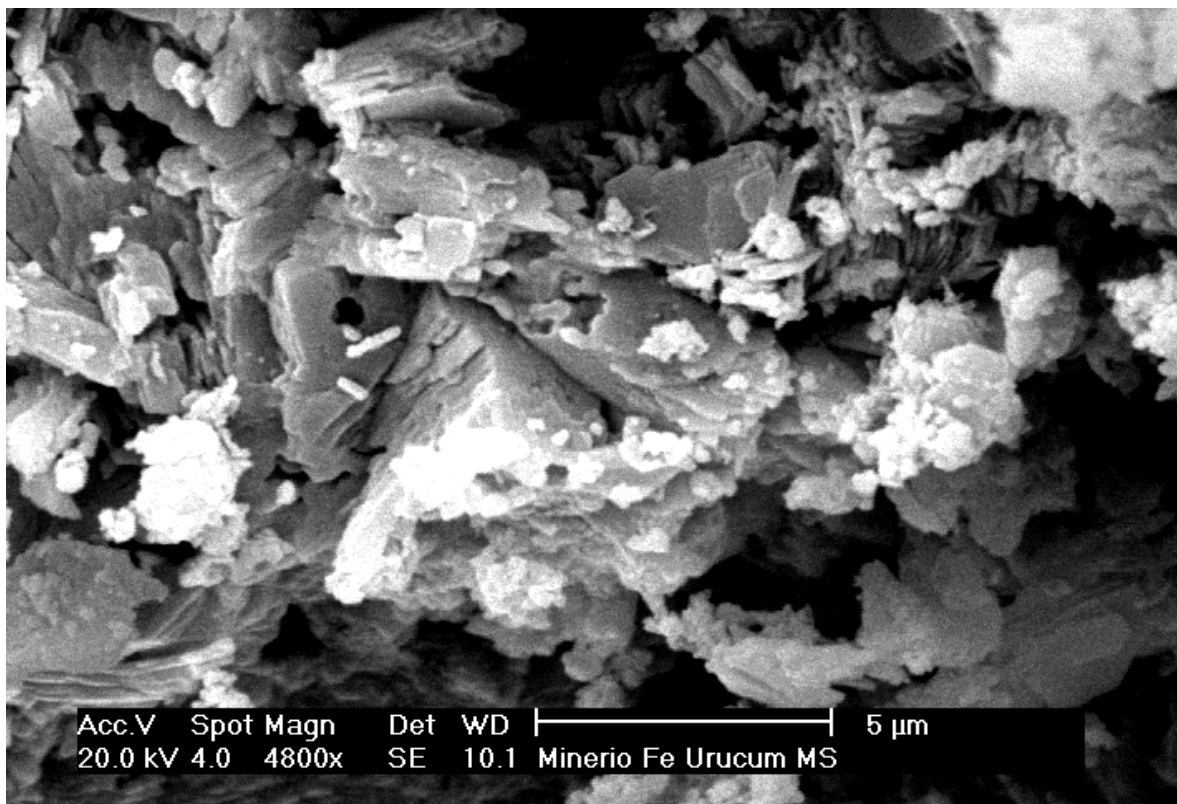


Figura 4: Micrografia da amostra de lama vermelha – Urucum (4800x)

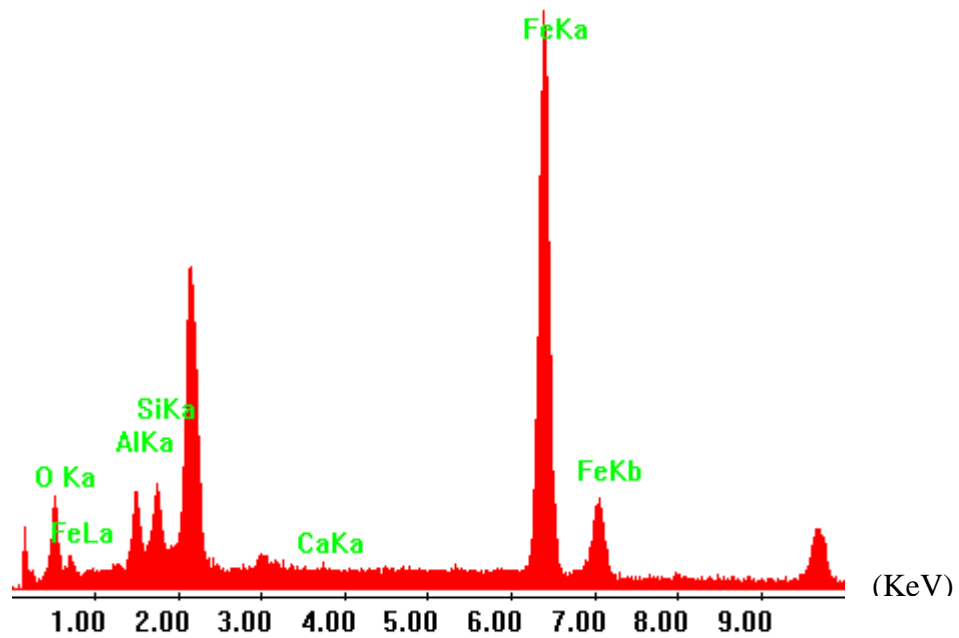


Figura 5: Espectro químico da amostra de lama vermelha.

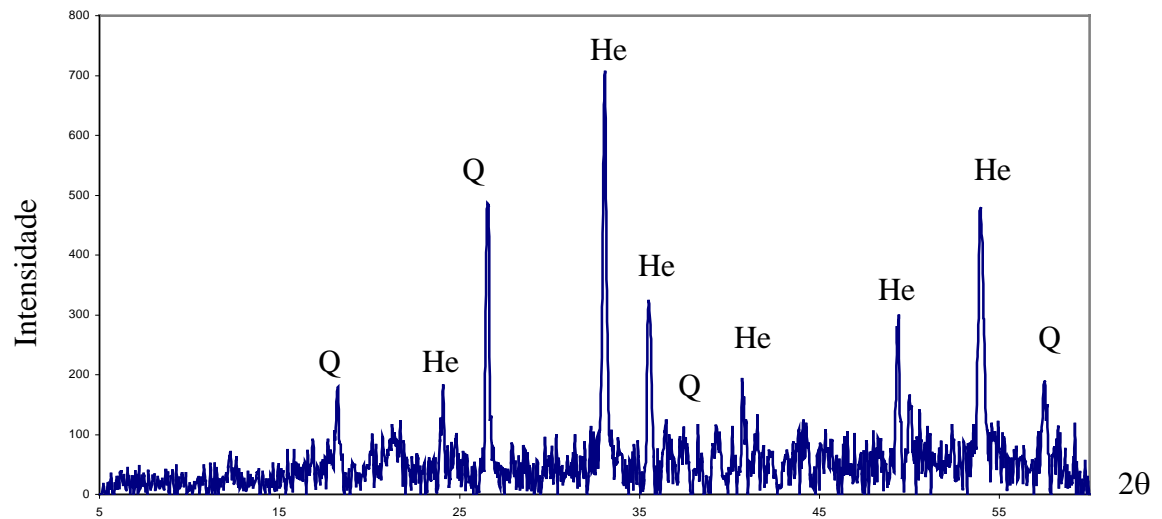


Figura 6: Difratoograma da lama estudada (LU)

A análise do difratograma de Raio X (DRX) também apresenta picos característicos de grande composição de minério de ferro (Figura 6), o que concorda com a análise química realizada no minério (Quartzo  $\text{SiO}_2$ , Hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

## **2.6. A utilização da lama da lavagem do minério de ferro no produto cerâmico**

A revisão da literatura mostra que a queima da argila com outros produtos para a fabricação de tijolos é bastante antiga. Segundo **Negreiros** (1994), isto tem sido feito desde o século XVII. As principais razões para fazê-lo são a redução da retração da argila que se obtém com a adição desses produtos e a utilização desses materiais.

Ainda segundo **Negreiros** (1994), “a necessidade de utilização dos resíduos industriais como forma de evitar impactos ambientais torna-se, em nossos dias, tão prioritária quanto a busca de novas tecnologias. A deposição de rejeitos a céu aberto ou jogados em lagos, rios e mares faz com que ocorram não apenas prejuízos ao equilíbrio da natureza como também perdas econômicas pelo não aproveitamento de materiais perfeitamente passíveis de novas utilizações.”

A reciclagem e reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais como novos materiais para a construção civil tem sido cada vez mais desenvolvidas em diferentes linhas de pesquisas de diversas instituições: reaproveitamento de cinzas (carvão, casca de arroz), da areia de fundição, lodos de estações de tratamento, rejeito da produção do ácido fosfórico, entulho da construção civil, rejeitos das minas de carvão, etc, com uma bordagem voltada ao desempenho estrutural do novo produto. (**Rocha e Cheriaf**, 1996).

O uso de resíduos poderá ser alternativa para a diminuição do problema ambiental causado pelo uso da madeira como combustível. Estes resíduos tanto poderiam ser utilizados para a queima dos materiais cerâmicos quanto misturados na massa. Por outro lado, pode-se utilizar resíduos, tais como, lodo de galvanoplastia, cinza de carvão, lodos de

estações de depuração, entulhos de demolição e de construções e outros misturados à massa da fabricação dos materiais cerâmicos, obtendo menor custo de produção e minimização de problemas de fabricação tais como quebra por retração à queima ou secagem. Estas ações possibilitariam também preservação das jazidas de argila e um melhor planejamento na exploração das mesmas. (**Roman e Gleize**, 1998).

Um dos grandes desafios para o próximo milênio é a eliminação dos resíduos, sejam eles domésticos, industriais ou hospitalares. Pesquisas sobre reciclagem de resíduos vem sendo desenvolvidas em todo o mundo. (**Ferreira et al.**, 2000).

As atividades das indústrias primárias produzem substancial quantias de subprodutos. A disposição destes resíduos no local da indústria geradora dos mesmos é utilizada por razões econômicas (economia de energia, transporte, etc), porém o tradicional armazenamento em despejos próximos pode ser impraticável devido os consideráveis volumes envolvidos e as restrições ambientais. A exploração local destes subprodutos pelas próprias indústrias ou outras próximas pode tornar-se tecnicamente interessante e uma boa opção para a re-utilização na produção de outros materiais.

Dentro deste escopo, vários pesquisadores têm realizado estudos adicionando resíduos industriais em argilas para a produção de materiais cerâmicos.

**Sglavo et al.** (2000) realizaram pesquisas com amostras de lama vermelha, resíduo da produção de alumina de bauxita, estudando alguns usos potenciais desta, principalmente na adição das argilas para a fabricação de produtos cerâmicos. Para tanto, considerando que o conhecimento completo do comportamento térmico deste material é prioritário para adicioná-lo em outros materiais, realizou primeiramente uma extensa caracterização da lama vermelha, estudando as transformações estruturais e as reações internas induzidas por aquecimento até 1400°C em amostras representativas deste resíduo. Os resultados obtidos foram usados como referências para testes da lama vermelha adicionadas em argilas para a produção de elementos cerâmicos. Para tanto, adicionou a lama resultante da produção de alumina nas proporções de 0 a 50%, em massa, em uma argila (A) utilizada para a

fabricação de tijolos por extrusão em marombas e em uma outra argila (B), de melhor qualidade, utilizada na fabricação de vasos sanitários no processo chamado de moldagem por colagem de barbotinas ( **slip casting**) nas proporções de 0 a 20%, em massa. A produção de amostras cerâmicas contendo diferentes quantidades de lama vermelha tinha duplo objetivo: na argila A para promover uma substituição desta, diminuindo o seu consumo, mantendo-se normal o procedimento industrial utilizado na fabricação dos tijolos cerâmicos e na argila B para definir a influência da lama na sinterização e nas propriedades finais dos produtos utilizando caulim. Para todas as amostras, puras ou mescladas, foram efetuadas difratogramas de raio X, análises termogravimétricas e termodiferenciais, análises químicas, medidas da retração, da resistência à flexão, da porosidade aparente e da coloração. Os resultados mostraram a possibilidade de utilização do resíduo como mistura nas argilas para a fabricação de produtos cerâmicos, sendo que abaixo de 900°C a lama é um componente inerte, sendo que a resistência mecânica diminui com o aumento de concentração de lama. Paralelamente, a lama vermelha apresenta fases reativas entre 950 e 1000°C, produzindo altas resistências mecânicas nas misturas com caulim, realizando pequenas alterações na coloração.

Como se percebe, **Sglavo** et al., embora trabalhando com outro tipo de resíduo, a lama vermelha produzida pelas indústrias produtoras de alumina de bauxita, concluíram que a utilização da mesma como adição em argilas para a produção de elementos cerâmicos é perfeitamente viável.

A análise química quantitativa da lama vermelha de bauxita (**Sglavo** et al., 2000) e da lama vermelha proveniente da lavagem do minério de ferro, objeto deste estudo, estão apresentadas abaixo (Tabela 2), sendo interessante observar a concordância da análise química da lama de minério de ferro feita pela Mineração Urucum S/A com a análise qualitativa realizada pela sonda EDAX e o difratograma de Raio X (DRX).

Tabela 2: Análises químicas das lamas, em % em massa

Lama	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Cl	Outro	PPC
de Bauxita*	35,2	20,0	11,6	9,2	7,5	6,7	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,6	7,3
De ferro**	31,1	13,0	33,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	22,4

\*Fonte: Sglavo et al. (2000) \*\* Fonte: Urucum Mineração S/A

**Yalç** e **Sevinç** (2000) estudaram a utilização do resíduo de bauxita em cerâmica vitrificadas; alumínio pode ser extraído de bauxita, a qual é composta de hidróxido de alumínio, dióxido de ferro, dióxido de sílica, caulim e titânio. A lama vermelha (**red mud**) aparece como um sub-produto da lixiviação cáustica da bauxita para produzir alumina e seus principais componentes são  $\text{FeO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ , sendo que aproximadamente 35 a 40% da bauxita processada transforma-se em resíduo, sendo este o maior problema na produção de alumina, visto que este resíduo apresenta sérios problemas de armazenamento e poluição ambiental; a possibilidade de utilização deste resíduo adicionado em argilas cerâmicas para a produção de azulejos, porcelanas, vasos sanitários e porcelanas para utilizações elétricas (eletroporcelanas) foi objeto de estudo destes autores os quais concluíram que a lama vermelha pode ser utilizada como pigmento e matéria-prima para a produção destes elementos.

**Pelino** (2000) apresenta um interessante trabalho de reciclagem da jarosita, um resíduo rico em ferro, resultante da hidrometalurgia de minérios de zinco, adicionando-a em pó de granito e lama, outro resíduo gerado pelo corte e serragem dos blocos, na produção de vidros e cerâmicas vítreas, sendo que as propriedades dos produtos confeccionados tem sido a favor da exploração comercial para utilização na construção civil, na forma de azulejos, fibras de vidros para isolamento térmico e pigmentos coloridos para cerâmicas.

Neste sentido, **Montanaro** et al. (2000) pesquisaram a sinterabilidade de dois diferentes resíduos cerâmicos (jarosita e goetita) provenientes também do processo hidrometalurgico de minério de zinco, visando a sua reutilização como materiais para isolamento térmico e acústico para a construção civil, chegando a conclusão de sua viabilidade tanto técnica quanto econômica.

Como conseqüência do acima exposto, este trabalho visa estudar o aproveitamento da lama resultante da lavagem do minério de ferro, adicionando-o na argila em proporções de 10% e 20%, em massa, e verificando quais alterações ocorrem na mescla, principalmente em relação às propriedades físicas.



## **CAPÍTULO III - METODOLOGIA**

### **3.1. Introdução**

Objetivando resposta quanto a viabilidade ou não do uso da lama resultante da lavagem do minério de ferro como aditivo nas argilas para fabricação de produtos cerâmicos, foram efetuadas misturas da lama na proporção de 10% e 20%, em massa, em duas argilas escolhidas em função da localização geográfica da lama: na argila utilizada para fabricação de tijolos em Corumbá/MS, próxima do local de geração da lama de minério de ferro e na argila utilizada para fabricação de tijolos na única cerâmica existente em Campo Grande/MS, próxima ao grande centro consumidor de produtos cerâmicos.

A argila utilizada em Corumbá/MS é retirada da barranca da margem esquerda do Rio Paraguai e transportada em barcaças até a cerâmica.

A argila utilizada pela cerâmica de Campo Grande/MS é retirada da localidade de Rio Verde de Mato Grosso/MS, distante aproximadamente 210 Km de Campo Grande e transportada em caminhões até a cerâmica.

A lama resultante da lavagem do minério de ferro é gerada na Urucum Mineração S/A, localizada no morro do Urucum, município de Corumbá/MS, localizada aproximadamente 32 Km ao sul desta cidade, na beira da BR/262 e servida também pela ferrovia Novoeste, concessionária da RFFSA.

Esta posição geográfica da mineradora e a facilidade de transporte tanto para Corumbá como para Campo Grande é que influenciou a escolha das argilas utilizadas pelas olarias dessas duas cidades como material de teste para a adição da lama. Estudos

posteriores poderão ser feitos com outras argilas de outras localidades visando sua utilização juntamente com a lama.

As principais etapas para realização desta pesquisa foram:

- a) coleta e tratamento da lama;
- b) fabricação por prensagem dos corpos de prova de dimensões 10,5 cm x 5,5 cm, aproximadamente, com composições de 0%, 10% e 20% de lama e dois tipos de argila e
- c) realização de ensaios físicos.

Foram realizados os seguintes ensaios físicos de caracterização das amostras:

- a) determinação do teor de umidade;
- b) determinação da massa específica aparente;
- c) determinação da porosidade aparente;
- d) determinação da absorção de água;
- e) determinação da perda de massa ao fogo;
- f) determinação da variação linear dimensional;
- g) determinação dos módulos de resistência à flexão e
- h) determinação dos índices de plasticidade

Os resultados destes ensaios físicos de caracterização das amostras, juntamente com outras informações, como inspeção visual da coloração, condições dos corpos de prova antes e após as queimas, análises químicas, difração de raio X, análises térmicas, bem como informações advindas de estudos efetuados por outros pesquisadores [ **Rondon** (1983), **Rodrigues** (1998) e **Wengenroth** (1999) ], sobre as argilas sul-mato-grossenses e a indústria cerâmica local, permitiram o delineamento da pesquisa e uma melhor análise do comportamento das amostras e agregação de conhecimentos às argilas sul-mato-grossenses, como também a avaliação e análise de um novo produto (lama da lavagem do minério de ferro), de desconhecimento total, tendo em vista a inexistência de bibliografia sobre o assunto.

O procedimento metodológico adotado, descrito na seqüência abaixo, tem por vantagem de não necessitar de equipamentos muito sofisticados e apresentar ao mesmo tempo resultados de grande relevância para o estudo tecnológico de materiais cerâmicos, fornecendo um indicativo importante de possíveis aplicações das dosagens analisadas para a produção de cerâmica vermelha.

### 3.2. Tratamento da Lama

A lama utilizada na confecção dos corpos de provas foi retirada das lagoas de decantação da mineradora, possuindo umidade baixa, em torno de 4% e tendo conformação de torrões, necessitando ser desagregada para manuseio (Figura 7).



Figura 7: Lama Urucum Natural

### 3.2.1. Moagem

A desagregação da lama foi feita primeiramente destorroando-a manualmente e, posteriormente, moendo-a em um moinho de cruzeta da marca “Tigre”, modelo ML20/5, equipado com uma peneira cilíndrica de malha circular de abertura #2,38 mm (Figura 8).



Figura 8: Moinho de cruzeta “Tigre”, modelo ML20/5

O material resultante (Figura 9) foi armazenado em saco plástico, sendo retirado do mesmo, para confecção dos corpos de prova, a quantia aproximada de 1Kg. Com a finalidade de homogeneizar este material, passou-se então o mesmo por um conjunto de peneiras superpostas e um fundo, sendo a superior #2,38mm e a inferior #1,16mm.



Figura 9: Lama Urucum moída

### **3.2.2.Determinação do teor de umidade (H%)**

Do material acima retirou-se a quantidade de 100g, sendo o restante guardado em um recipiente herméticamente fechado, de tal forma que a umidade não variasse. Esta amostra de 100g foi levada a uma estufa, permanecendo na mesma a uma temperatura de 110°C durante um período de 24 horas, até a constância de massa, sendo então imediatamente pesada em uma balança eletrônica de precisão  $\pm 0,01g$ , marca Denver Instrument XL-3100, determinando-se assim a massa seca da amostra (Figura 10).

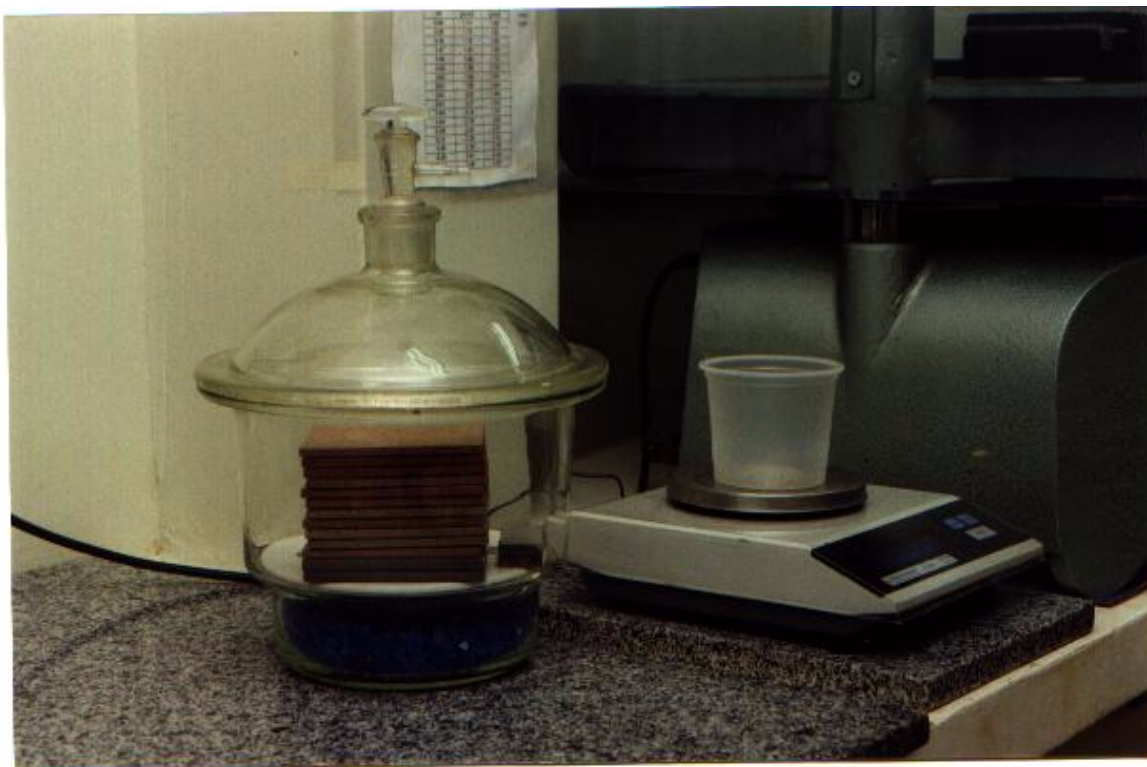


Figura 10: Balança eletrônica “Denver Instrument”, modelo XL-3100 e dessecador com sílica-gel

A umidade inicial da amostra, em porcentagem, foi calculada através da fórmula:

$$H\% = [(m_u - m_s)/m_s].100, \quad (\text{equação 01})$$

onde:  $m_u$  é a massa úmida da lama (antes de ser levada à estufa), em g

$m_s$  é a massa seca da lama (quando retirada da estufa), em g.

Pesou-se então a amostra que havia sido guardada em um recipiente hermeticamente fechado e corrigiu-se umidade da mesma para 9%, através da aspensão cuidadosa de água, passando-a novamente no conjunto de peneiras acima citado para homogeneizá-la e guardando-a novamente em recipiente hermeticamente fechado.

Foi adotada a umidade de 9% por ser esta a umidade utilizada pelas indústrias cerâmicas de revestimento e os corpos de prova utilizados nas pesquisas serem obtidos por prensagem e não por extrusão, que exigiria umidade em torno de 25%.

### 3.2.3. Moldagem dos corpos de prova

Para uma melhor distribuição da umidade, a amostra preparada permaneceu em repouso por 48 horas, no mínimo, para em seguida iniciar-se o processo de prensagem dos corpos de prova.

Para a prensagem dos corpos de prova utilizou-se uma prensa hidráulica laboratorial da marca Gabrielli, modelo L4/110, com visor digital (Figura 11), que permitia variar os ciclos de prensagem em até três estágios. O molde da prensa utilizado para a confecção dos corpos de prova tem, aproximadamente, 10,5 cm de comprimento, 5,5 cm de largura e a altura variando de acordo com a quantidade de material colocado para a prensagem.



Figura 11: Prensa hidráulica “Gabrielli”, modelo L4/110

Para a prensagem dos corpos de prova utilizou-se o seguinte procedimento:

- a. pesagem de aproximadamente 50 g do material;
- b. distribuição do material no molde da prensa com o auxílio de uma régua e
- c. adoção de um ciclo de prensagem com dois estágios, sendo que no primeiro estágio a pressão média foi de  $103,6 \text{ Kgf/cm}^2$  (10,36 MPa) e no segundo estágio a pressão média foi de  $226,1 \text{ Kgf/cm}^2$  (22,61 MPa).

Depois de prensados, os corpos de prova foram limpos com um pincel de cerdas macias para a retirada de eventuais rebarbas e codificados no verso em baixo relevo com o auxílio de um estilete. Foram então pesados e medidas as suas dimensões (comprimento, largura e espessura) com um paquímetro da marca Mitutoyo, de precisão da ordem de 0,05 mm, sendo armazenados em uma bandeja.

Nesta etapa foram confeccionados 36 corpos de prova.

#### **3.2.4. Secagem dos corpos de prova**

O passo seguinte constitui-se na secagem dos corpos de prova em estufa a uma temperatura de  $110^\circ\text{C}$  por um período de 24 horas, quando então os mesmos eram retirados, pesados e novamente medidas as suas dimensões, sendo armazenados em um dessecador com sílica-gel, até serem colocados nos fornos para a queima.

#### **3.2.5. Queima dos corpos de prova**

Para a queima foi utilizado um forno de laboratório do tipo câmara com aquecimento elétrico, da marca Brasimet (Figura 12).

Foram efetuadas queimas nas temperaturas de  $800^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1100^\circ\text{C}$  e  $1150^\circ\text{C}$ . Estas temperaturas de queimas foram escolhidas porque os fornos cerâmicos da região trabalham com temperaturas de aproximadamente  $850^\circ\text{C}$  e também para pesquisar-



se as características dos materiais em temperaturas mais elevadas do que aquelas utilizadas pelas cerâmicas locais.

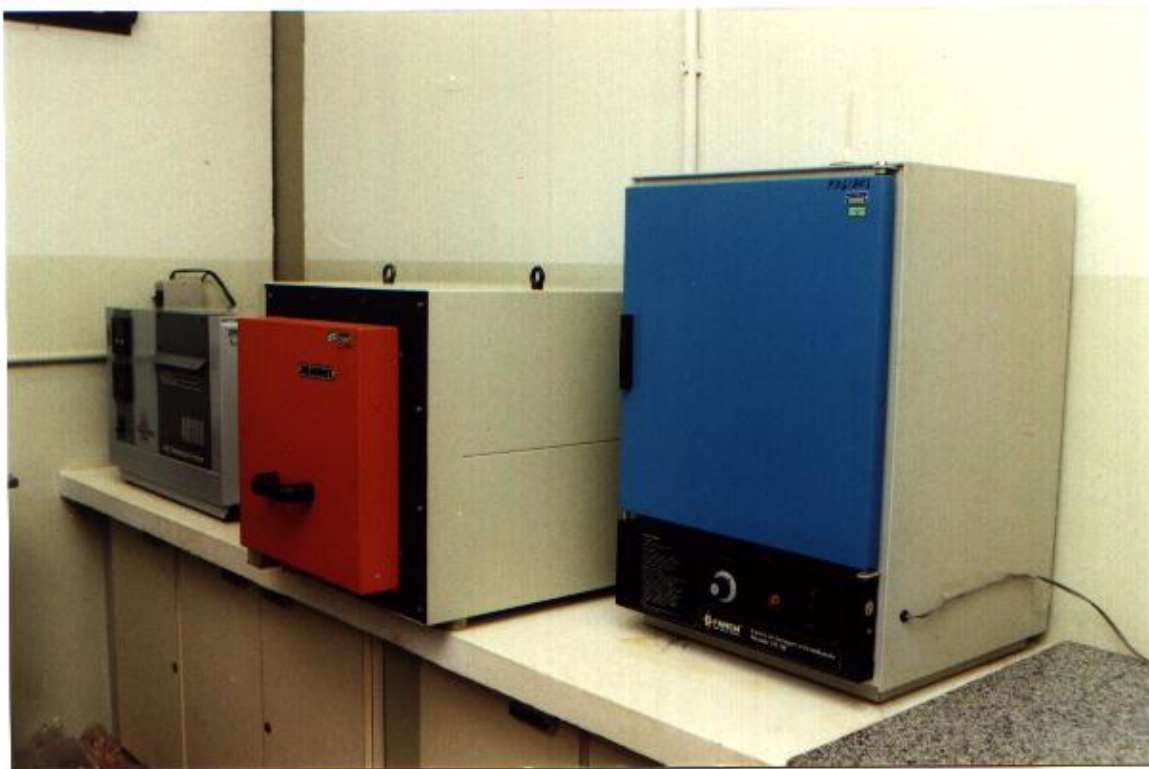


Figura 12: Estufa e forno elétrico “Brasinet”

Os corpos de prova foram submetidos a uma taxa de aquecimento de aproximadamente  $8,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $500^{\circ}\text{C}$ , permanecendo nesta temperatura por meia hora e, em seguida, aquecidos a uma taxa de aproximadamente  $6,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até atingirem a temperatura de queima desejada, permanecendo neste patamar por duas horas, sendo então desligado o forno, permanecendo os corpos de prova no mesmo por um período de 24 horas, quando então eram retirados, colocados no dessecador até atingirem a temperatura ambiente, sendo pesados e medidos.

Nesta etapa foram queimados 6 corpos de prova para cada temperatura, sendo que a posição dos corpos de prova no forno era sempre a mesma, cujo objetivo era diminuir a influência dos gradientes de temperatura e padronizar a queima dos mesmos (Figura 13).

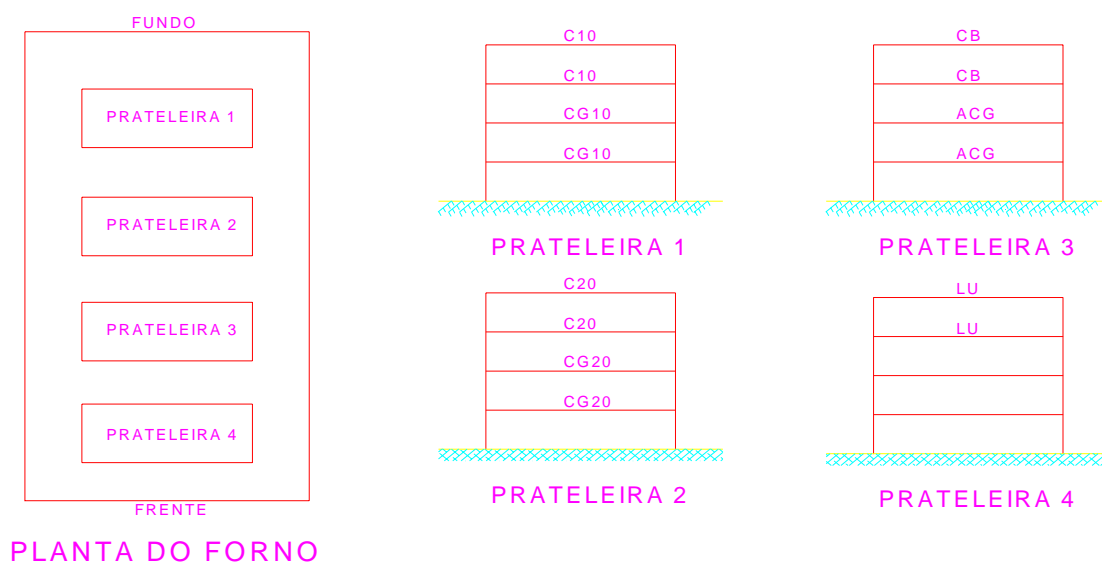


Figura 13: Esquema da posição dos corpos de prova no forno

### 3.2.6. Determinação da massa específica aparente (MEA)

Massa específica aparente é a massa por unidade de volume aparente, sendo que o volume aparente inclui os vazios permeáveis e impermeáveis contidos no material.

$$MEA = m/V_a \quad (\text{equação 02})$$

onde:  $m$  é a massa da amostra, em g

$V_a$  é o volume aparente da amostra, em  $\text{cm}^3$

As massas específicas aparentes foram determinadas para os corpos de prova verde (logo após a prensagem), para os corpos de prova secos em estufa ( $110^\circ\text{C}$ ) e para os corpos de prova queimados.

As massas dos corpos de prova foram determinadas com o auxílio de balança e os volumes aparentes calculados geometricamente e também com uma balança hidrostática no caso dos corpos de prova queimados.

A metodologia utilizada nesta etapa foi a seguinte:

- a) colocação dos corpos de prova em um recipiente cheio de água na temperatura ambiente;
- b) aquecimento lento por uma hora do conjunto recipiente, água e corpos de prova, até atingir-se a temperatura de ebulição da água;
- c) manutenção da água fervendo por um período de 2 horas;
- d) desligamento do aquecedor elétrico, mantendo-se os corpos de prova imersos no recipiente por um período de 22 horas;
- e) pesagem dos corpos de prova em uma balança hidrostática, marca Marte, modelo AL 200C, com precisão da ordem de 0,001g, para determinação da massa imersa (Figura 14) e
- f) secagem superficial dos corpos de prova e pesagem dos mesmos em uma balança eletrônica comum, com precisão da ordem de 0,01g, para determinação da massa úmida, bem como medidas das dimensões lineares dos corpos de prova.

Para a execução deste ensaio foram feitos os seguintes procedimentos:

- a) quando a água em ebulição evaporava era acrescentada nova quantidade de água em ebulição, fervida em um microondas, evitando-se assim possíveis choques térmicos nos corpos de prova e
- b) para evitar-se turbulência na massa fluida, no fundo do recipiente foram colocadas esferas de alumina; sobre as mesmas criou-se uma plataforma de cacos de material cerâmico e sobre estes colocaram-se os corpos de prova.

A saturação com água dos corpos de prova previamente queimados, através de imersão e fervura, objetiva preencher os poros permeáveis e os abertos. Esta metodologia

de saturação dos corpos de prova foi a mesma utilizada por **Wengenroth** (1999) para obtenção da massa específica aparente e absorção de água.

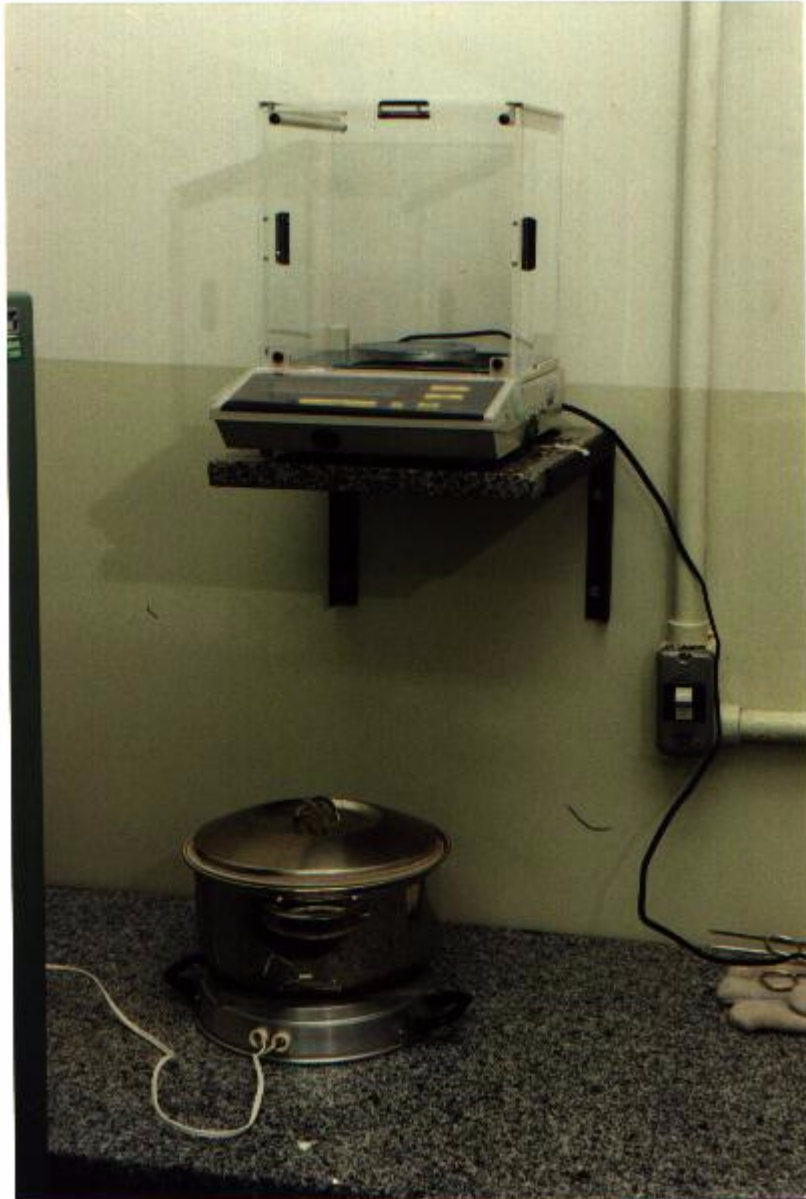


Figura 14: Balança hidrostática “Marte”, modelo AL 200C

Desta forma, calculou-se o volume aparente ( $V_a$ ) dos corpos de prova:

$$V_a = [(p_u - p_i) / \rho_{\text{água}}] \quad (\text{equação 03})$$

onde:  $p_u$  é o peso úmido do corpo de prova

$p_i$  é o peso imerso do corpo de prova

$\rho_{\text{água}}$  é o peso específico da água,  $\rho=1 \text{ gf/cm}^3$ .

Portanto, da equação acima, obtém-se o volume aparente do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ :

$$V_a = p_u - p_i \quad (\text{equação 04})$$

e, conseqüentemente, a massa específica aparente dos corpos de prova.

### 3.2.7.Determinação da porosidade aparente (PA%)

A porosidade aparente (PA) de um corpo de prova cerâmico é a relação entre o seu volume de vazios permeáveis ( $V_v$ ) e o volume aparente ( $V_a$ ) do mesmo, expressa em porcentagem.

$$PA(\%) = [(V_v/V_a).100] \quad (\text{equação 05})$$

onde:  $V_a$  é o volume aparente do corpo de prova

$V_v$  é o volume de vazios do corpo de prova.

Portanto, o volume de vazios pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$V_v = [(p_u - p_s)/\rho_{\text{água}}] \quad (\text{equação 06})$$

onde  $p_s$  é o peso do corpo de prova seco em estufa.

Conseqüentemente, a equação da porosidade aparente (PA) pode ser escrita da seguinte forma, em porcentagem:

$$PA(\%) = [(p_u - p_s)/(p_u - p_i)].100 \quad (\text{equação 07})$$

### **3.2.8.Determinação da absorção de água (AA%)**

Absorção de água é a relação entre o peso de água absorvida pelo corpo de prova saturado e sem excesso superficial ( $p_u$ ) e o peso do corpo de prova seco em estufa ( $p_s$ ), expressa em porcentagem.

$$AA(\%) = [(p_u - p_s)/p_s].100 \quad (\text{equação 08})$$

### **3.2.9.Determinação da perda de massa ao fogo (PF%)**

A perda de massa ao fogo ou perda de massa após a queima é a diminuição da massa do corpo de prova queimado ( $m_q$ ) em relação a massa do corpo de prova seco em estufa ( $m_s$ ), expressa em porcentagem.

$$PF(\%) = [(m_s - m_q)/m_s].100 \quad (\text{equação 09})$$

### **3.2.10.Determinação da variação linear dimensional (VL%)**

A retração e a expansão linear são, respectivamente, a diminuição e o aumento de uma das dimensões dos corpos de prova, originadas por processos físicos e/ou físico-químicos, durante a extração, secagem e queima dos corpos de prova.

Para efeito desta pesquisa, usou-se sempre o termo retração linear, considerando positivo quando houve uma diminuição de comprimento (retração) e negativo quando houve um acréscimo (expansão). Foram calculadas as variações lineares dos corpos de prova em duas situações: após secagem em estufa e após a queima, utilizando-se, conforme o caso, uma das seguintes equações:

$$VL_s(\%) = [(C_v - C_s)/C_s].100 \quad (\text{equação 10})$$

$$VL_q(\%) = [(C_s - C_q)/C_s].100 \quad (\text{equação 11})$$

onde:  $VL_s$  é a variação linear após secagem em estufa, em porcentagem

$VL_q$  é a variação linear após a queima, em porcentagem

$C_v$  é o comprimento do corpo de prova verde

$C_s$  é o comprimento do corpo de prova seco em estufa

$C_q$  é o comprimento do corpo de prova após a queima

### 3.2.11. Determinação do módulo de resistência à flexão (MRF)

O Módulo de Resistência à Flexão é uma característica do material cerâmico, não devendo ser confundido com carga de ruptura, que é uma característica da placa cerâmica.

A expressão que fornece o módulo de resistência à flexão é a mesma que dá as tensões nas fibras superior e inferior da seção transversal retangular situada no meio do vão L de uma viga quando submetida a uma carga concentrada de valor P.

$$MRF = M/W \quad (\text{equação 12})$$

onde: M é o momento fletor devido a uma carga concentrada P aplicada no meio do vão L;  $M = P.L/4$

W é o módulo de resistência à flexão;  $W = I/y$

Considerando a seção retangular de largura b e altura h, o momento de inércia I é igual a  $I = b.h^3/12$ ; a distancia y do centro de gravidade às fibras superior e inferior é  $y=h/2$ ; portanto  $W=b.h^2/6$ .

Desta forma, o módulo de resistência à flexão (MRF) é:

$$MRF = [(3.P.L)/(2.b.h^2)] \quad (\text{equação 13})$$

A equação acima foi deduzida supondo a seção transversal do corpo de prova retangular, o que, rigorosamente, não é verdadeiro, considerando os relevos existentes na face inferior dos mesmos.

No entanto, a **NBR 13818** (1997) admite esta aproximação, ressaltando que “ no caso de placas com perfil de espessura variável, obtém-se resultados apenas aproximados. Estas aproximações serão tanto mais exatas quanto menos acentuados forem os relevos.” Considerando que, de fato, os relevos possuem dimensões bastante reduzidas em relação às dimensões dos corpos de prova, admitiu-se que a hipótese de seção retangular é aceitável.

Para a obtenção do módulo de ruptura à flexão (MRF) utilizou-se um flexômetro da marca Gabrielli, modelo CRAB-424, com determinação da força de ruptura com precisão de 0,01 Kgf (Figuras 15 e 16).

A metodologia utilizada foi a seguinte:

- a) secagem dos corpos de prova em estufa e resfriamento até a temperatura ambiente em dessecador;
- b) medição das dimensões dos corpos de prova para efetuar a programação do flexômetro;
- c) colocação dos corpos de prova sobre os dois apoios do flexômetro, distantes 78mm, com os relevos voltados para baixo, de forma que as rupturas ocorram sempre em seções perpendiculares ao comprimento;
- d) programação do equipamento para que a tensão aplicada ao corpo de prova sofra um incremento de  $1 \text{ N/mm}^2$  por segundo (1 MPa/s) até atingir a ruptura; alimentação do flexômetro com outros dados como espessura e largura dos corpos de prova e distancia entre os apoios (78 mm) e
- e) acionamento do equipamento, que romperá o corpo de prova e fornecerá a força máxima de ruptura em Kgf e o módulo de resistência à flexão (MRF) em  $\text{N/mm}^2$  (MPa).





Figura 15: Flexômetro “Gabrielli”, modelo CRAB-424



Figura 16: Mostrador digital do flexômetro “Gabrielli”, modelo CRAB-424

### 3.2.12. Determinação do índice de plasticidade (IP)

Segundo **Mello e Teixeira** (s.d., p. 27 a 33), “define-se plasticidade de um solo a sua propriedade de se submeter a grandes deformações sem sofrer ruptura ou fissuramento. Esta propriedade é de grande importância para os solos, sendo peculiar aos solos ditos argilosos, em determinadas condições.

O comportamento de um solo argiloso varia enormemente com o seu teor de umidade, podendo passar de um estado quase líquido (por exemplo, a lama) para um estado sólido (por exemplo, cerâmica e tijolos), passando por vários estados intermediários. Os teores de umidade limites, entre os vários estados de consistência dos solos argilosos, são ditos limites de consistência de Atterberg e a suas determinações em laboratório foram padronizadas por Casagrande.”

Define-se como limite de liquidez (LL) como sendo o teor de umidade de um solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar a ranhura padrão aberta na amostra com um cinzel também padronizado.

O limite de plasticidade (LP), definido como o teor de umidade, que marca a passagem de um solo argiloso do estado plástico para o estado semi-sólido é determinado uniformizando-se cerca de 15g de solo rolando-o sobre uma placa de vidro, até que na espessura de 3mm de diâmetro o cilindro apresente pequenas fissuras.

Conhecendo-se o limite de liquidez e o limite de plasticidade, calcula-se o índice de plasticidade (IP) como sendo a diferença entre esses limites:

$$IP = LL - LP \quad \text{(equação 14)}$$

Foram determinados os índices de plasticidade das argilas, da lama e das misturas.

### **3.3.Tratamento da Argila Corumbá**

O que foi denominado neste trabalho de “argila Corumbá” é a argila utilizada pelas cerâmicas desta cidade, não sendo esta denominação científica, tendo apenas a finalidade de identificação da mesma neste trabalho.

Esta argila é retirada da barranca da margem esquerda do Rio Paraguai e transportada em barcas até a cerâmica.

A argila utilizada para a confecção dos corpos de prova foi fornecida em tijolos de 8 furos, verdes, obtidos por extrusão em marombas, necessitando ser desagregado para manuseio.

Todos os procedimentos feitos com a lama, tais como moagem, determinação do teor de umidade, moldagem, secagem e queima dos corpos de prova, determinação da massa específica aparente, da absorção de água, da perda de massa ao fogo, da variação linear dimensional e do módulo de resistência à flexão foram executados com esta argila, valendo-se da mesma metodologia.

Como na prensagem dos corpos de prova, com 50g da amostra da argila denominada neste trabalho de “argila Campo Grande”, os corpos apresentavam-se estratificados no plano horizontal, paralelo às maiores dimensões, indicando dificuldades de conformação daquela quantidade de material, aumentou-se a quantidade do mesmo para 80g, sendo então eliminado o problema, não verificando-se mais a estratificação horizontal anterior. Como consequência, optou-se por moldar todos os corpos de prova de todas as amostras, com exceção dos já moldados com a lama, que não apresentaram este tipo de problema, com a quantidade de 80g.

Foram confeccionados 36 corpos de prova com esta amostra.

### **3.4. Tratamento da argila Campo Grande**

Da mesma forma que a anterior, o termo “argila Campo Grande” refere-se à argila utilizada pela única cerâmica existente nesta cidade, não tratando-se de denominação científica, sendo apenas uma identificação da mesma no presente trabalho.

Esta argila é retirada da localidade de Rio Verde de Mato Grosso/MS, distante 210 Km de Campo Grande e transportada em caminhões até a cerâmica, onde é armazenada em montes a céu aberto.

No dia da coleta das amostras, o tempo encontrava-se seco, não tendo chovido nos dias anteriores. A amostra foi coletada na base de um dos montes existentes, escolhido aleatoriamente.

Devido ao estado pulverulento da amostra, não foi necessário efetuar a moagem da mesma, sendo que todos os demais procedimentos feitos anteriormente com as outras amostras foram seguidos.

Com esta amostra foram confeccionados 36 corpos de prova.

### **3.5. Tratamento da argila Corumbá adicionada com a lama**

A lama foi adicionada na argila Corumbá nas proporções de 10% e 20%, em massa, sendo a homogeneização da mistura feita em um misturador de eixo horizontal.

Todos os demais ensaios executados com as misturas seguiram a mesma metodologia utilizada com as amostras anteriores.

Foram confeccionados 36 corpos de prova com a mistura na proporção de 10% e 36 corpos de prova com a mistura na proporção de 20%.

### **3.6. Tratamento da argila Campo Grande adicionada com a lama**

A lama foi adicionada na argila Campo Grande também nas proporções de 10% e 20%, em massa, sendo a homogeneização da mistura também feita em um misturador de eixo horizontal.

Todos os demais ensaios executados com as misturas seguiram o mesmo procedimento anterior, utilizado com as outras amostras.

Foram confeccionados 36 corpos de prova com a mistura na proporção de 10% e 36 corpos de prova com a mistura na proporção de 20%.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desenvolveu-se uma análise sobre as seguintes características físicas e mecânicas testadas: massa específica aparente (**MEA**), porosidade aparente (**PA**), absorção de água (**AA**), perda de massa ao fogo (**PF**), variação linear dimensional (**VL**), módulo de resistência à flexão (**MRF**), índice de plasticidade (**IP**) e análises térmicas (**TMA** e **TGA**).

Nas tabelas e análises feitas a seguir, foram utilizadas as seguintes notações:

- **LU** : lama resultante da lavagem do minério de ferro da Mineração Urucum;
- **ACG** : argila utilizada pela única cerâmica de Campo Grande;
- **CB** : argila utilizada pelas duas cerâmicas de Corumbá;
- **CG10** : argila utilizada pela cerâmica de Campo Grande adicionada de 10%, em massa, da lama resultante da lavagem de minério de ferro da Mineração Urucum;
- **CG20** : argila utilizada pela cerâmica de Campo Grande adicionada de 20%, em massa, da lama resultante da lavagem de minério de ferro da Mineração Urucum;
- **C10** : argila utilizada pelas duas cerâmicas de Corumbá adicionada de 10%, em massa, da lama resultante da lavagem de minério de ferro da Mineração Urucum;
- **C20** : argila utilizada pelas duas cerâmicas de Corumbá adicionada de 20%, em massa, da lama resultante da lavagem de minério de ferro da Mineração Urucum.

### 4.1.Pressões de prensagem

Analisando a Tabela 3, verifica-se que a pressão de prensagem de **LU** no primeiro estágio (**P1**) difere bastante das demais pressões de prensagem, sendo que no segundo estágio de prensagem (**P2**) todas as pressões são praticamente iguais. Isto se deve ao fato

que o primeiro estágio de prensagem promove apenas uma acomodação do material a ser prensado, sendo que a prensagem efetiva ocorre no segundo estágio de funcionamento da prensa; como a quantidade de **LU** prensada foi de aproximadamente 50 g, enquanto que para os demais materiais foi de aproximadamente 80 g, esta menor quantidade de material ofereceu, no primeiro estágio de prensagem, maior resistência à acomodação.

Tabela 3: Pressões médias de prensagem dos corpos de prova e desvios-padrões, em  $\text{kgf/cm}^2$

Amostra	Nº de C.P.	P1 <sub>médio</sub>	Desvio-padrão	P2 <sub>médio</sub>	Desvio-padrão
LU	36	103,61	5,22	226,09	1,78
ACG	36	91,99	8,93	225,63	9,87
CB	36	80,14	2,53	220,63	2,06
CG10	36	88,11	6,57	227,11	1,72
CG20	36	86,21	4,28	227,84	2,56
C10	36	82,16	6,71	221,08	3,93
C20	36	81,57	3,12	219,58	1,36
Média Geral		87,68	8,16	223,95	3,49

P1 – pressão no primeiro estágio de prensagem

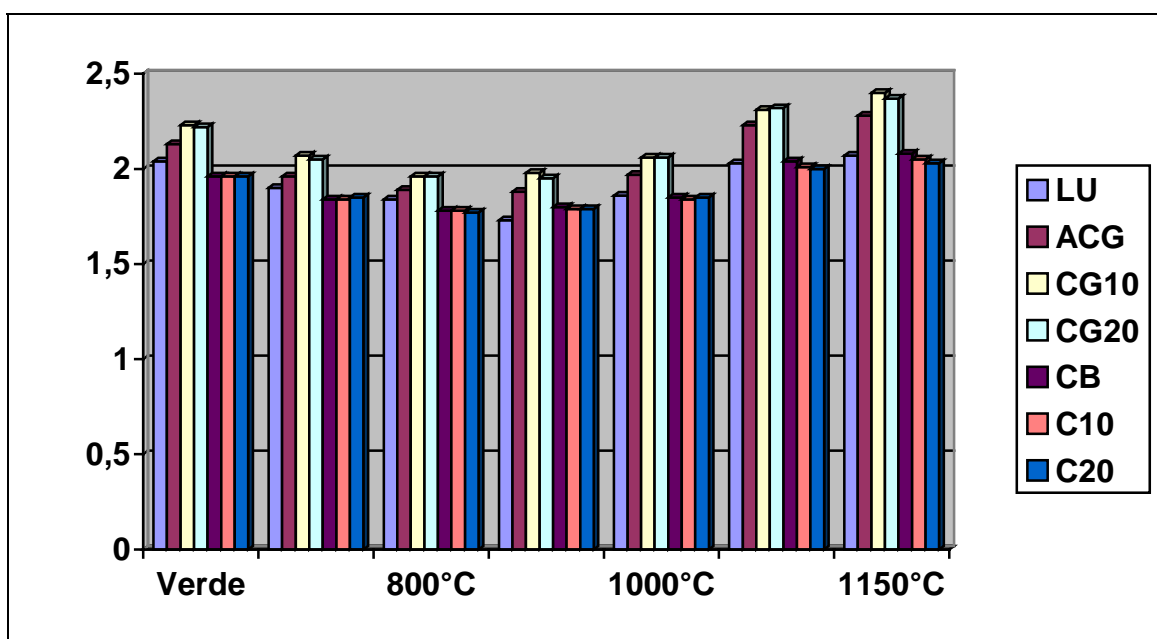
P2 – pressão no segundo estágio de prensagem

#### 4.2. Massa específica aparente (MEA)

Observa-se que as massas específicas aparentes (**MEA**) das amostras adicionadas com a **LU** (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**), apresentadas na Tabela 4 e Figura 17, até a temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$ , sofrem diminuição devido a combustão de matéria orgânica, liberação de enxofre e de água de estrutura (perda de massa com pouca retração). Nas temperaturas superiores ( $1100^{\circ}\text{C}$  e  $1150^{\circ}\text{C}$ ) há acréscimo da massa específica aparente devido a sinterização e formação da fase vítrea (retração sem perda de massa).

Tabela 4: Massa Específica Aparente (MEA), em g/cm<sup>3</sup>

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
Verde	2,04	2,13	2,23	2,22	1,96	1,96	1,96
110°C	1,90	1,96	2,07	2,05	1,84	1,84	1,85
800°C	1,84	1,89	1,96	1,96	1,78	1,78	1,77
900°C	1,73	1,88	1,98	1,95	1,80	1,79	1,79
1000°C	1,86	1,97	2,06	2,06	1,85	1,84	1,85
1100°C	2,03	2,23	2,31	2,32	2,04	2,01	2,00
1150°C	2,07	2,28	2,40	2,37	2,08	2,05	2,03

Figura 17 – Gráfico da Massa Específica Aparente (MEA), em g/cm<sup>3</sup>

#### 4.3. Porosidade Aparente (PA)

Como a LU possui porosidade aparente elevada (Tabela 5 e Figura 18), as amostras adicionadas com esta (CG10, CG20, C10 e C20), também possuem porosidade aparente mais elevada que a das amostras puras (ACG e CB).



Tabela 5: Porosidade Aparente (PA), em %

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
800°C	49,63	32,41	31,94	33,72	35,13	36,92	38,28
900°C	49,69	32,69	31,92	34,27	34,85	36,68	38,19
1000°C	49,27	29,04	29,37	30,21	32,71	35,06	36,13
1100°C	43,57	17,66	18,53	20,05	24,94	28,12	29,36
1150°C	42,69	13,33	13,29	16,47	21,73	25,31	26,97

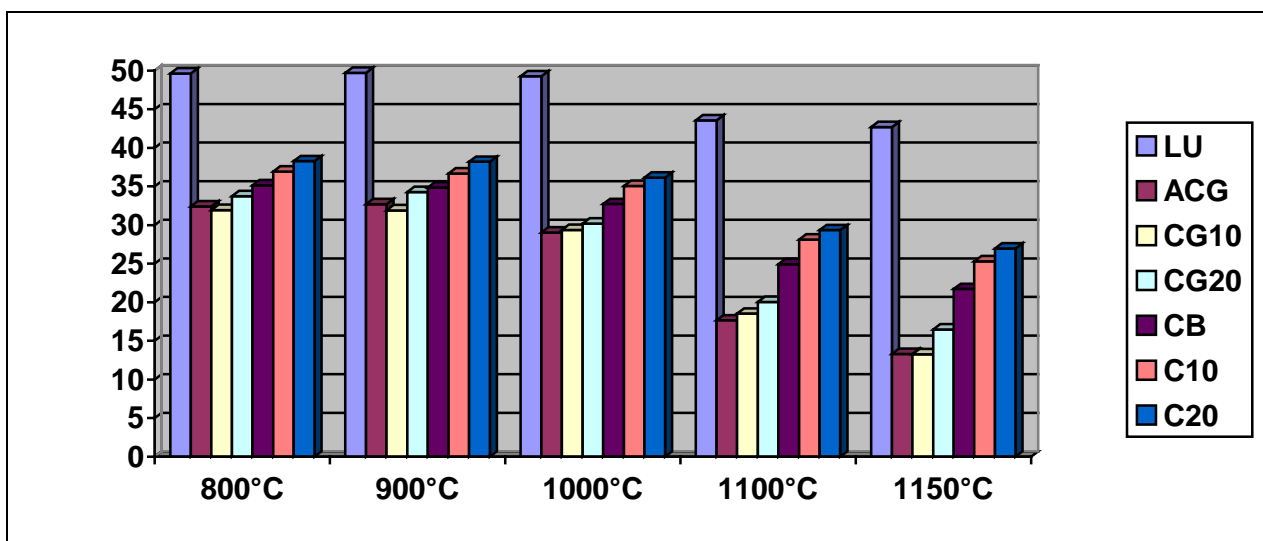


Figura 18 – Gráfico da Porosidade Aparente (PA), em %

#### 4.4. Absorção de Água (AA)

A absorção de água (AA) da LU é bastante elevada (Tabela 6 e Figura 19), no entanto, nas misturas com ACG (CG10 e CG20) a absorção mantém-se praticamente a mesma da amostra pura, sendo que nas misturas com CB (C10 e C20) houve acréscimo de absorção de água.

Tabela 6: Absorção de Água (AA), em %

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
800°C	28,23	17,52	16,80	17,85	20,35	21,49	22,32
900°C	27,96	17,63	16,64	18,07	20,00	21,21	22,10
1000°C	27,42	14,78	14,65	14,95	18,13	19,67	20,20
1100°C	21,84	7,98	8,21	8,86	12,53	14,37	14,96
1150°C	21,15	5,84	5,63	7,07	10,70	12,62	13,55

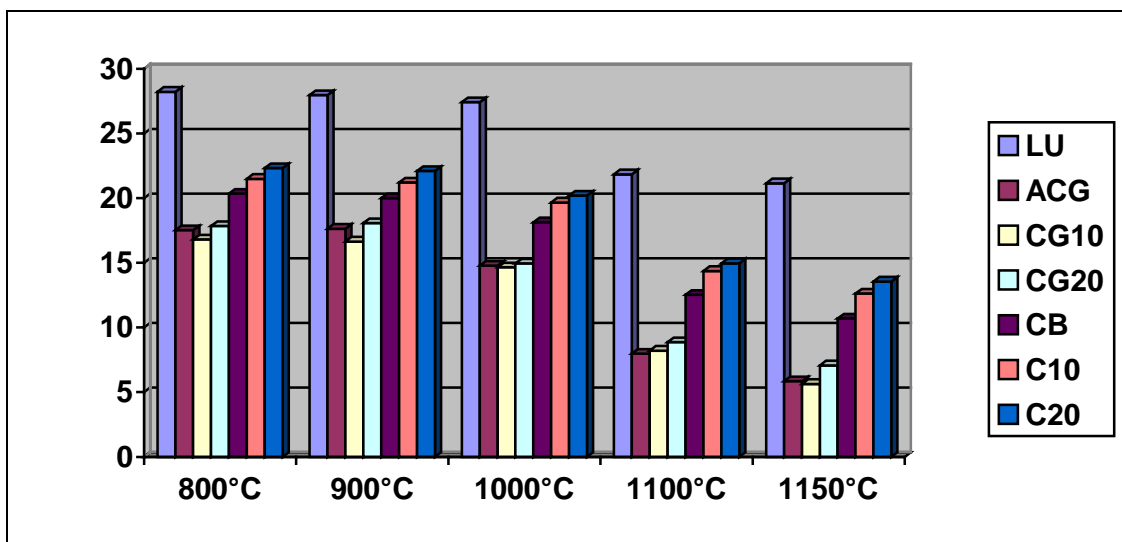


Figura 19 – Gráfico da Absorção de Água (AA), em %

Considerando como referência os valores limites adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (Tabela 7), verificamos que, levando em conta que a temperatura média de queima dos tijolos maciços e blocos cerâmicos é da ordem de 800°C, tanto as matérias primas puras (ACG e CB) como as adicionadas com LU (CG10, CG20, C10 e C20) satisfazem as condições abaixo de absorção de água; como a temperatura de queima utilizada pelas empresas para a fabricação de telhas é da ordem de 1000°C, verificamos, também, que tanto as matérias primas puras (ACG e CB) como as adicionadas de LU (CG10, CG20, C10 e C20), satisfazem as condições de absorção de água adotadas pelo Laboratório de Cerâmica do IPT/SP.

Tabela 7: Valores limites de absorção de água adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT/SP.

	Tijolos Maciços	Blocos Furados	Telhas
Absorção de água	sem especificação	máximo de 25%	máximo de 20%

Fonte: Ferreira et al. (2000)

#### 4.5. Perda de massa ao fogo (PF)

Tabela 8: Perda de Massa ao Fogo (PF), em %

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
800°C	10,30	7,63	7,94	8,13	7,17	7,35	7,62
900°C	10,63	8,19	8,40	8,62	7,40	7,77	8,07
1000°C	10,93	8,35	8,60	8,80	7,54	7,89	8,17
1100°C	11,05	8,53	8,74	8,92	7,56	7,97	8,26
1150°C	10,84	8,37	8,65	8,82	7,37	7,74	8,03

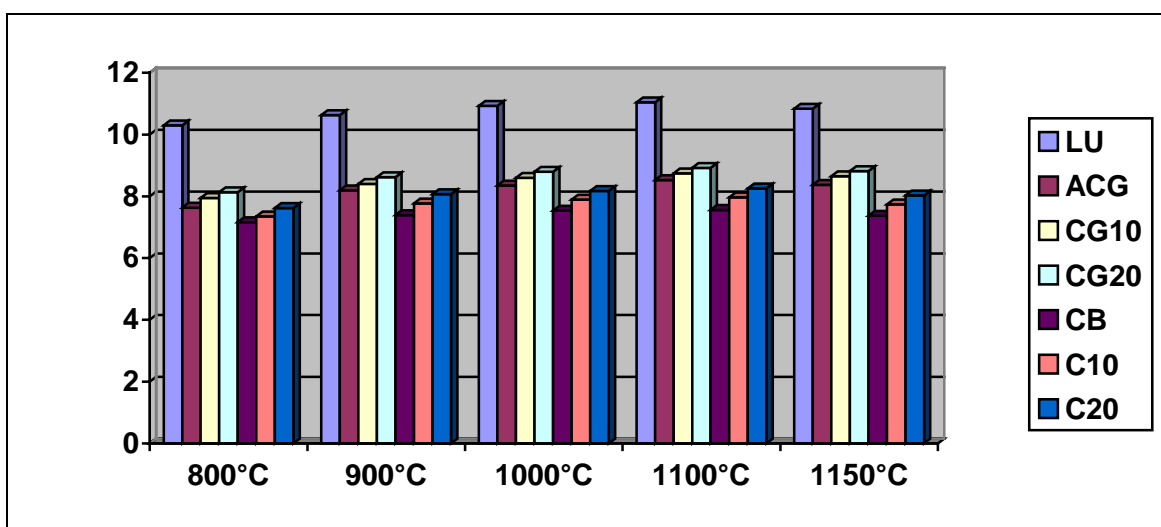


Figura 20 – Gráfico da Perda de Massa ao Fogo (PF), em %

Observa-se que a perda de massa ao fogo (PF) das amostras adicionadas com a LU (CG10, CG20, C10 e C20), apresentadas na Tabela 8 e Figura 20, quando comparadas com as amostras puras (ACG e CB), até a temperatura de 1000°C, é maior devido a combustão de matéria orgânica, liberação de enxofre e de água de estrutura, sendo que nas temperaturas superiores (1100°C e 1150°C) a perda de massa ao fogo é menor devido a sinterização e formação de fase vítrea.

#### 4.6. Variação linear dimensional (VL)

Tabela 9: Variação Linear Dimensional (VL), em %

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
110°C	0,27	0,50	0,34	0,42	0,66	0,64	0,58
800°C	0,77	0,00	0,00	0,00	0,27	0,19	0,27
900°C	1,15	0,49	0,36	0,52	0,82	0,68	0,73
1000°C	1,74	2,45	1,70	2,10	1,66	1,63	1,88
1100°C	4,60	5,78	5,13	5,34	5,03	4,64	4,73
1150°C	5,08	6,68	6,16	6,30	5,63	5,24	5,11

Obs.: A variação linear dimensional a 110°C foi calculada em relação ao corpo de prova “verde”, sendo as demais em relação ao corpo de prova seco (110°C)

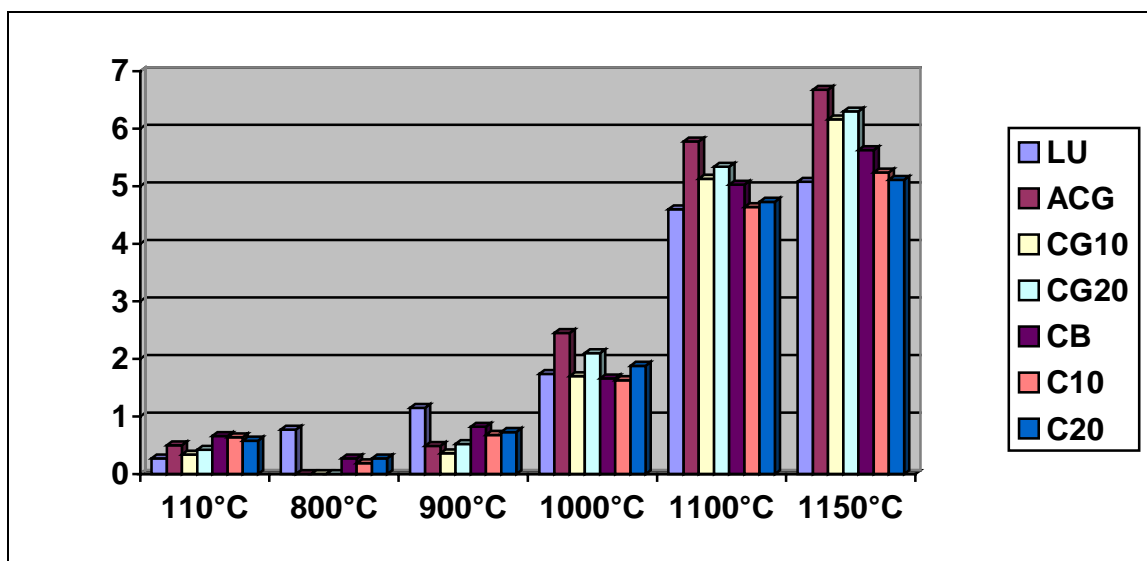


Figura 21 – Gráfico da Variação Linear Dimensional (VL), em %

A variação linear dimensional (VL) das amostras adicionadas com a LU (CG10, CG20, C10 e C20), apresentadas na Tabela 9 e na Figura 21, são menores do que as das amostras puras (com única exceção de C20 na temperatura de 1000°C), o que apresenta uma grande vantagem de utilização da LU, visto que ter-se-á uma maior homogeneidade nas dimensões das peças produzidas.

#### 4.7. Módulo de resistência à flexão (MRF)

Tabela 10: Módulo de Resistência à Flexão (MRF), em MPa

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
110°C	2,054	2,974	3,936	3,876	3,916	3,213	2,504
800°C	0,853	4,804	4,104	3,891	5,420	3,997	2,691
900°C	0,949	9,051	7,700	7,456	8,235	5,530	3,831
1000°C	1,309	12,715	12,988	11,244	10,220	6,744	4,914
1100°C	3,253	21,141	22,041	20,106	18,427	12,497	10,175
1150°C	4,171	22,277	27,552	24,220	24,734	17,567	13,830

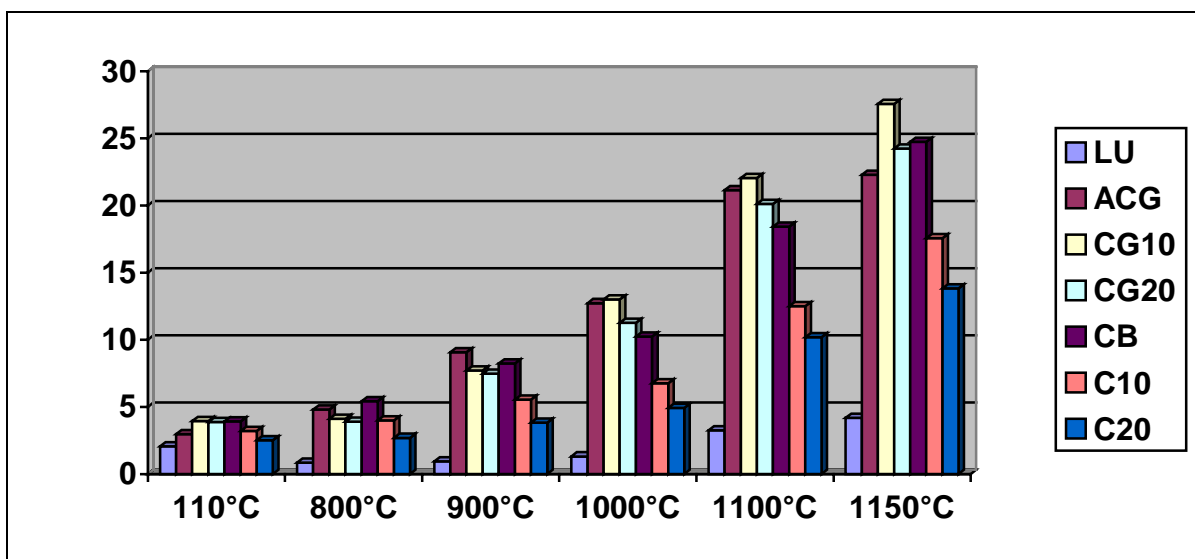


Figura 22 – Gráfico do Módulo de Resistência à Flexão (MRF), em MPa

Tomando por referência os valores limites dos característicos cerâmicos adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (Tabela 11), pode-se avaliar os resultados dos ensaios obtidos neste trabalho no sentido de orientar, de forma preliminar, se as matérias primas cerâmicas analisadas são adequadas à fabricação de produtos estruturais.

Tabela 11: Valores limites dos característicos cerâmicos para produtos estruturais adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT/SP

	Tijolos Maciços	Blocos Furados	Telhas
Tensão de Ruptura à Flexão, após secagem a 110°C	mínimo de 1,5 MPa	mínimo de 2,5 MPa	mínimo de 3,0 MPa
Tensão de ruptura à Flexão, após queima	mínimo de 2,0 MPa	mínimo de 5,5 MPa	mínimo de 6,5 MPa

Fonte: Ferreira et al. (2000)

Levando em conta os limites acima citados e considerando:

- que a temperatura de queima para tijolos maciços é da ordem de 800°C, verificou-se que tanto as matérias primas puras (**ACG** e **CB**) como as adicionada com **LU** (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**) podem ser utilizadas para a fabricação destes produtos;
- que a temperatura de queima para blocos furados é da mesma ordem que para tijolos maciços (800°C), verificou-se que somente as matérias primas puras (**ACG** e **CB**) podem ser utilizadas para a fabricação destes produtos, sendo que as matérias primas adicionadas com **LU** (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**) não atendem às especificações de 5,5 MPa do Laboratório de Cerâmica do IPT/SP;
- que a temperatura de queima para telhas é da ordem de 1000°C, verificou-se que somente **C20** não atende as especificações acima, podendo todas as outras matérias primas (**ACG**, **CB**, **CG10**, **CG20** e **C10**) serem utilizadas para a fabricação destes produtos.

#### 4.8. Índice de Plasticidade (IP)

A análise dos dados dos Índices de Plasticidade (Tabela 12), obtidos pelo aparelho de Casagrande, segundo critérios utilizados em mecânica dos solos (**Caputo**, 1994), indicam que a lama (**LU**) é fracamente plástica ( $1% < IP < 7%$ ), que as misturas **CG10** e **CG20** são mediamente plásticas ( $7% < IP < 15%$ ) e que as demais amostras (**ACG**, **CB**, **C10**

e **C20**) são consideradas altamente plásticas ( $IP > 15\%$ ). Segundo **Campos et al.** (1999) estas faixas de plasticidades das amostras estudadas ( $6,6\% < IP < 35,1\%$ ) podem ser normalmente utilizadas na indústria de cerâmica vermelha.

Tabela 12: Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Índice de Plasticidade, em %

Amostra	LU	ACG	CG10	CG20	CB	C10	C20
LL	33,2	34,3	35,7	35,0	58,0	49,2	49,4
LP	26,6	18,2	23,4	24,2	22,9	23,0	24,3
IP	6,6	16,1	12,3	10,8	35,1	26,2	25,1

#### 4.9. Análises térmicas

As figuras 23 a 25 apresentam os resultados das análises termo-mecânicas (TMA) realizadas em amostras de corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 5 mm de comprimento e massa de 30 mg, com fluxo de ar natural de 20 ml/min, com taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e submetidos a carga de 10 g.

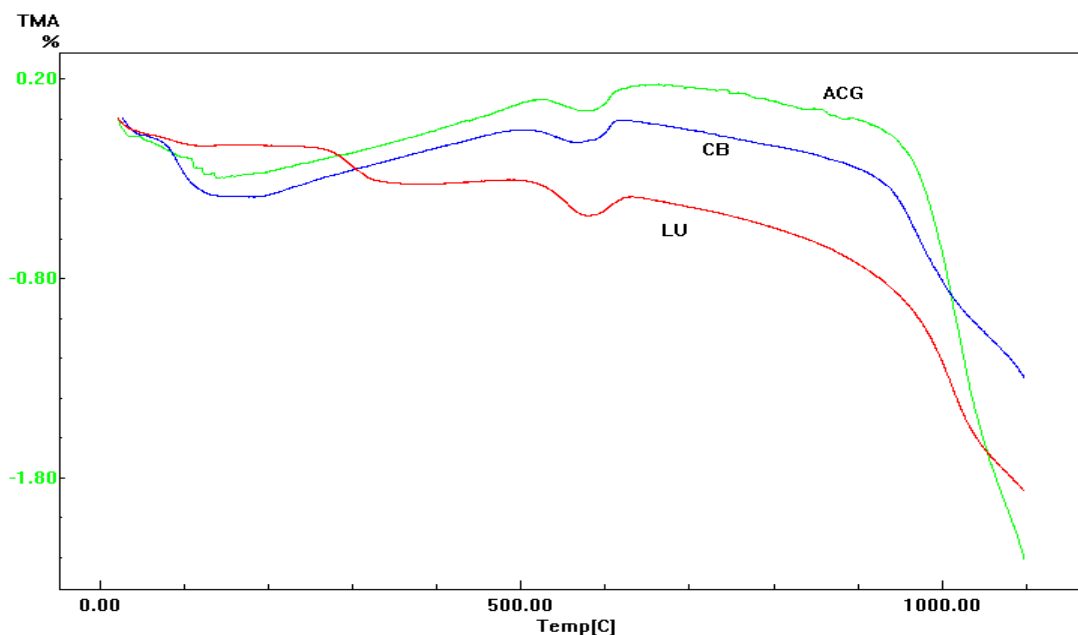


Figura 23 – Curvas TMA para as amostras puras (LU, ACG e CB)

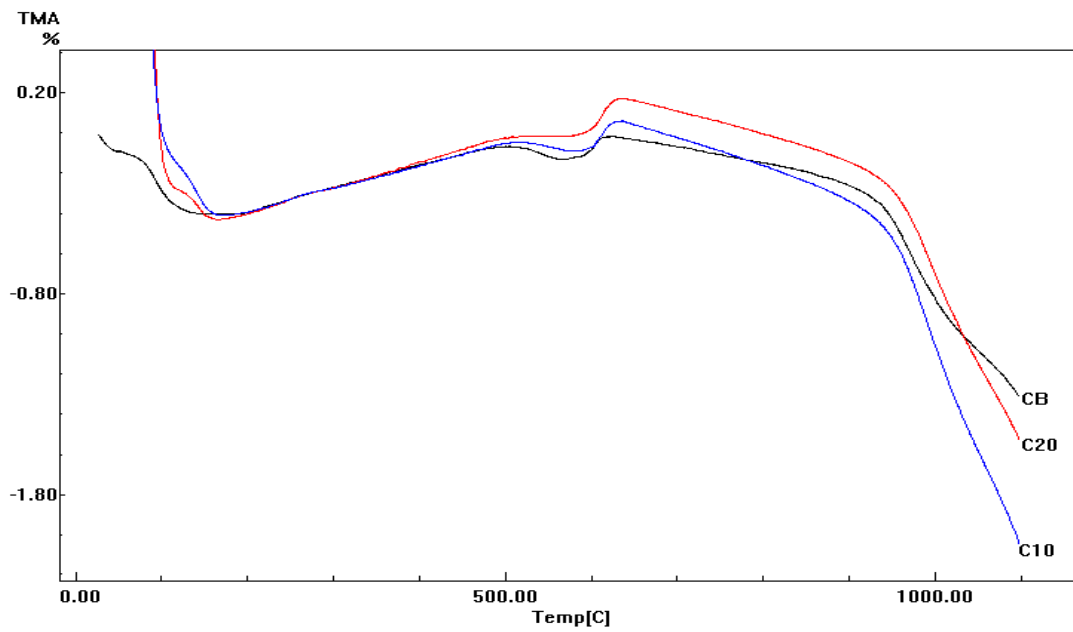


Figura 24 – Curvas TMA para CB, C10 e C20

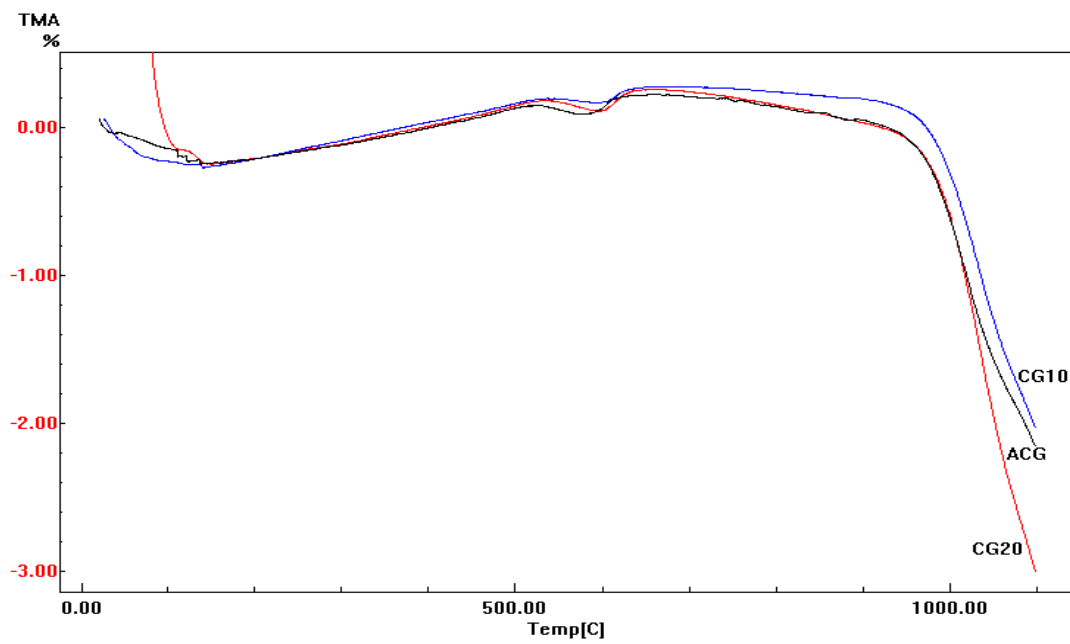


Figura 25 – Curvas TMA para ACG, CG10 e CG20



As figuras 26 a 28 apresentam os resultados das análises termo-gravimétricas (TGA) realizadas em cadinho de alumina com amostras pulverizadas, com 30 mg de massa, com fluxo de ar natural de 20 ml/min e taxa de aquecimento de 10°C/min.

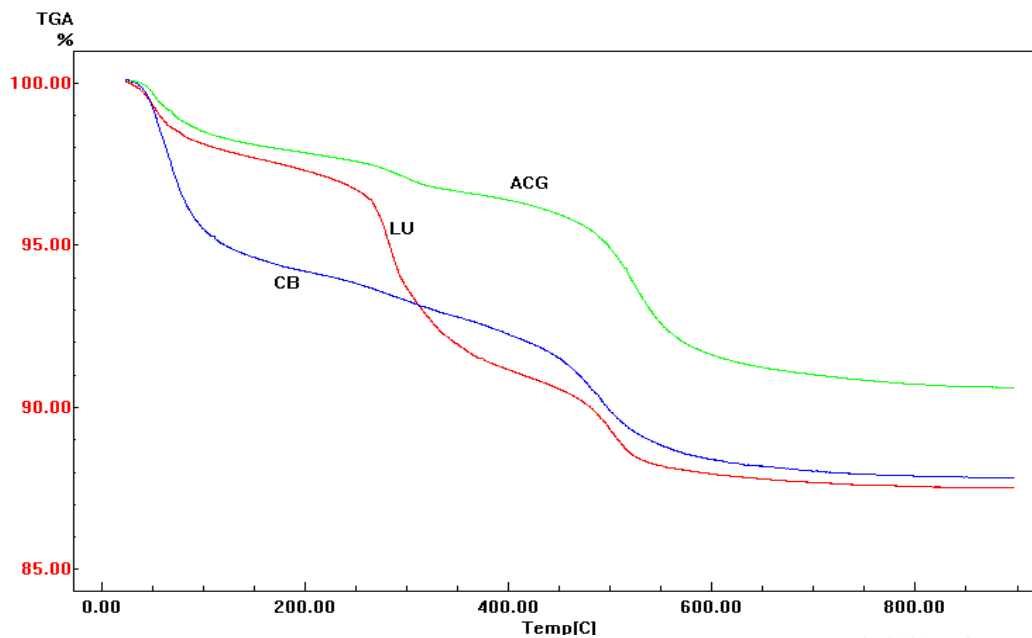


Figura 26 – Curvas TGA para as amostras puras (LU, ACG e CB)

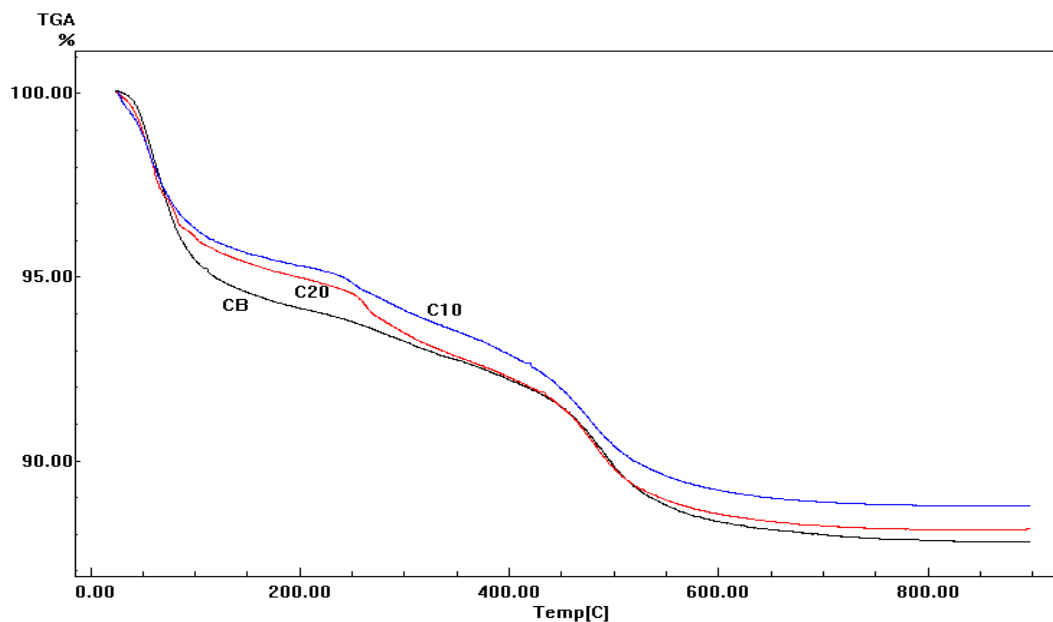


Figura 27 – Curvas TGA para as amostras CB, C10 e C20

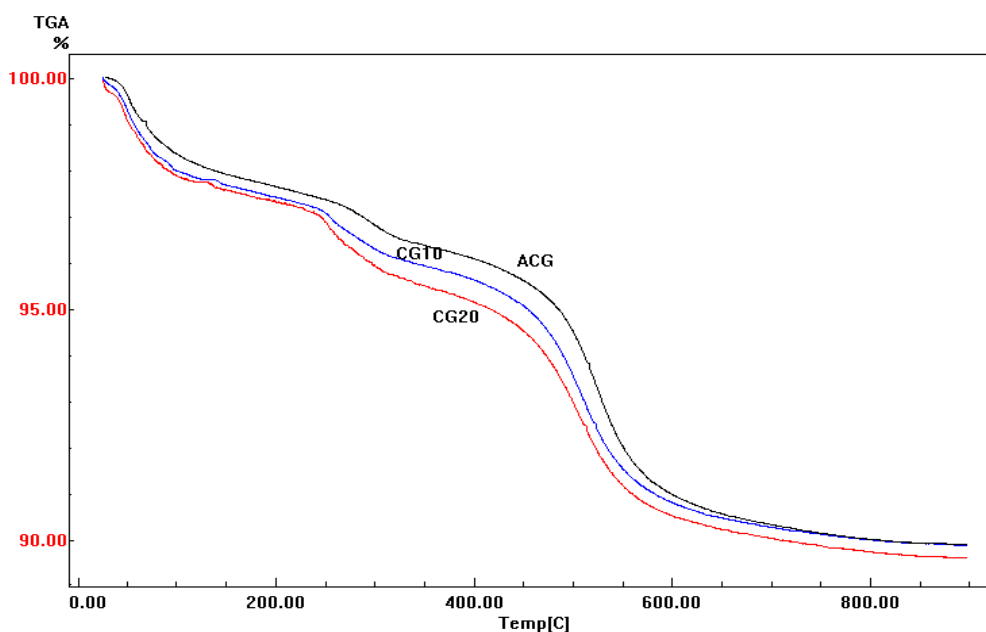


Figura 28 – Curvas TGA para as amostras **ACG**, **CG10** e **CG20**

A análise térmica envolvendo perda de massa (TGA) e dilatação/retração (TMA) das amostras, quando analisadas em conjunto, permitem conclusões que cada técnica usada individualmente não permitiria. Desta forma, analisando as curvas TMA e TGA acima (Figuras 23 a 28), pode-se observar que em torno de 100°C ocorre a liberação de água, retraindo com perda de massa; em torno de 300°C os hidróxidos de ferro transformam-se em óxidos de ferro, liberando água, retraindo-se também com perda de massa; em torno de 600°C ocorre a transição do quartzo  $\alpha$  para o quartzo  $\beta$  (reversível), ocorrendo dilatação sem perda de massa; em torno de 900°C ocorre retração sem perda de massa, havendo recristalização em novas fases cristalinas e em torno de 1000°C ocorre também retração sem perda de massa, ocorrendo sinterização e formação de fase vítrea.

## CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou a verificação da possibilidade técnica do uso da lama resultante da lavagem do minério de ferro misturada na argila para a fabricação de material cerâmico.

Para tanto usou-se lama resultante da lavagem do minério de ferro da Urucum Mineração S/A, localizada em Corumbá/MS e argilas coletadas em Corumbá/MS e Campo Grande/MS, devido à proximidade da mineradora e à facilidade de transporte da lama até as olarias. Foram fabricados corpos de prova com as argilas supracitadas, com a lama e com as misturas das argilas e a lama na proporção, em massa, de 10% e 20%.

A escolha das porcentagens de 10% e 20% de adição da lama nas argilas foi feita em função da quantidade de resíduo existente viabilizando a sua utilização como mistura e, principalmente, para que não haja grande redução na plasticidade das argilas estudadas.

Corpos de prova paralelepíedicos, com as dimensões aproximadas de 105 mm de comprimento, 55 mm de largura e a altura variando de acordo com a quantidade de material utilizado, foram moldados por prensagem, secos em estufa no laboratório e queimados em cinco temperaturas diferentes.

As amostras foram ensaiadas em relação às seguintes características físicas e mecânicas:

- massa específica aparente
- porosidade aparente
- absorção de água
- perda de massa ao fogo

- variação linear dimensional
- resistência à flexão e
- índice de plasticidade.

Os resultados dos ensaios permitiram as seguintes conclusões:

1. O uso da lama (**LU**) mostrou a ocorrência de menor retração do corpo de prova durante a secagem, principalmente na mistura com a argila de Campo Grande (**ACG**). Considerando que nas cerâmicas da região, a secagem se dá geralmente de forma natural e, portanto, sem possibilidade de controle da velocidade de secagem, este resultado mostra-se bastante importante. O uso da lama na argila possibilitará a diminuição de ocorrência de fissuras e deformações no produto acabado.
2. O uso da lama (**LU**) mostrou, também, que nas temperaturas usuais de queima utilizadas pelas cerâmicas da região, em torno de 850°C, para a fabricação de produtos da chamada cerâmica vermelha (tijolos e telhas), a retração dos corpos de provas mantém-se praticamente a mesma das argilas puras (**ACG** e **CB**), o que não inviabiliza a utilização da lama. A mesma conclusão aplica-se também para a fabricação de ladrilhos e pisos, onde a temperatura usual de queima é em torno de 1100°C.
3. Como a lama (**LU**) possui massa específica aparente praticamente igual à das argilas estudadas (**ACG** e **CB**), observa-se que a massa específica aparente das misturas, em qualquer temperatura de queima, sofre muito pouca alteração (da ordem de 5%) quando comparada com as argilas puras nas mesmas temperaturas de queima.
4. Como a lama (**LU**) possui porosidade aparente elevada, as amostras adicionadas com esta (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**) também possuem porosidade aparente mais elevadas que as das amostras puras (**ACG** e **CB**).
5. A absorção de água da lama (**LU**) é bastante elevada, no entanto nas misturas com a argila de Campo Grande (**ACG**), nas proporções de 10% e 20% (**CG10** e **CG20**) a absorção mantém-se praticamente a mesma da amostra pura, sendo que

nas misturas com a argila de Corumbá (**CB**), também nas mesmas proporções (**C10** e **C20**) houve pequeno acréscimo de absorção de água.

6. A perda de massa ao fogo da lama (**LU**) também é bastante elevada se comparada com a das argilas puras (**ACG** e **CB**), no entanto, quando adicionada na proporção de 10% (**CG10** e **C10**), esta mantém-se praticamente a mesma das amostras puras, elevando-se um pouco mais quando adicionada na proporção de 20% (**CG20** e **C20**).
7. Tomando-se por referência os valores limites dos característicos cerâmicos adotados pelo Laboratório de Cerâmica do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo para a tensão de ruptura à flexão tanto após a secagem a 110°C como após a queima, pode-se concluir:
  - tanto as matérias primas puras (**ACG** e **CB**) como as adicionadas com a lama (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**) podem ser utilizadas para a fabricação de tijolos maciços, visto que a temperatura de queima destes nas cerâmicas é da ordem de 800°C;
  - que somente as matérias primas puras (**ACG** e **CB**) podem ser utilizadas para a fabricação de tijolos furados, visto que a temperatura de queima destes nas cerâmicas também é da ordem de 800°C;
  - que tanto as matérias primas (**ACG** e **CB**) como as adicionadas com a lama (**CG10**, **CG20** e **C10**) podem ser utilizadas para a fabricação de telhas, visto que a temperatura de queima destas nas cerâmicas é da ordem de 1000°C. A única mistura que não enquadra-se na especificação do Laboratório de Cerâmica do IPT para a fabricação de telhas é a **C20**.
8. A análise dos Índices de Plasticidade indica que as amostras puras (**ACG** e **CB**) e as mescladas **C10** e **C20** são altamente plásticas, sendo que as misturas **CG10** e **CG20** são mediamente plásticas, podendo, no entanto, serem todas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha.
9. Finalmente, os resultados mostraram que não houve praticamente diferença entre as amostras fabricadas com a adição da lama (**CG10**, **CG20**, **C10** e **C20**) daquelas confeccionadas apenas com as matérias primas (**ACG** e **CB**), donde pode-se concluir que a lama, dentro das proporções de misturas estudadas, pode

ser utilizada como adição nas argilas para a fabricação de produtos cerâmicos, principalmente na chamada cerâmica vermelha.

Levando-se em consideração as conclusões acima, pode-se afirmar que o uso da lama (LU) misturada nas argilas estudadas para a fabricação de produtos cerâmicos é viável e aparece como uma boa alternativa para as indústrias cerâmicas da região de Corumbá/MS e Campo Grande/MS. Da mesma forma, aparece como uma alternativa econômica e eficiente para a diminuição dos problemas de poluição ambiental da região da mineradora.

Para a efetiva utilização deste processo, no entanto, recomenda-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- execução de testes de laboratório utilizando-se o processo de extrusão para a moldagem dos corpos de prova;
- análise mais detalhada da lama (LU) para a verificação da existência ou não de componentes que possam ocasionar problemas patológicos na alvenaria;
- fabricação de blocos cerâmicos em olaria da região para verificar a viabilidade do processo na prática e
- estudo da viabilidade econômica da utilização da lama (LU) na fabricação de materiais cerâmicos. Alguns aspectos que deverão ser considerados são: distância da olaria ao ponto de coleta da lama na mineradora, desgaste das marombas, custo da lama, etc.

## CAPÍTULO VI - BIBLIOGRAFIA

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Placas Cerâmicas para Revestimento - Especificação e Métodos de Ensaios - NBR 13818*. Rio de Janeiro, s. ed., 1997. 78p.
- CAMPOS, L. F. A.; MACEDO, R. S. de; KIYOHARA, D.K. e FERREIRA, H. C. *Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural*. Revista Cerâmica. V. 45. N. 295, 1999. 15p.
- CAPUTO, HOMERO PINTO. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1994. V.1. 456p.
- COMPANHIA VALE DO RIO DOCE – revista, Vol. 4, Nº 11, março 1983. *Publicação da Companhia Vale do Rio Doce*, s. ed., 1983. p. 22 – 24.
- FERREIRA, H.S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H.C. e SILVA, M.C. *Reciclagem de resíduos industriais provenientes de serragem de granitos para uso em massas para revestimentos cerâmicos* Revista Cerâmica e Informação, Nº 13, Nov/Dez 2000. p. 56 – 62.
- MELLO, Victor F. B.; TEIXEIRA, Alberto H. *Mecânica dos Solos. Mecânica dos Solos, Fundações e Obras de Terra. Vol. 1*. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, s. ed., s.data. Apostila. 205p.

MONTANARO, L.; BIANCHINI, N.; RINCON, J. Ma. E ROMERO, M. *Sintering behaviour of pressed red mud wastes from zinc hydrometallurgy*. *Ceramics International*, Volume 27, Issue 1. 2000. p. 29 – 37.

NEGREIROS, Francisco Tadeu. *Fabricação de Material Cerâmico com Argila e Cinzas de Carvão Mineral*. Dissertação de Mestrado, PPEP/UFSC, Florianópolis, 1994. 61p.

PELINO, M. *Recycling of zinc-hydrometallurgy wastes in glass and glass ceramic materials*. *Waste Management*. Volume 20, Issue 7. November, 2000. p. 561 – 568.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. *Ensaio de Avaliação para Controle Ambiental de Materiais com Resíduos Incorporados*. Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. Anais. Departamento de Engenharia Civil. PCC-USP. São Paulo. 1996. p. 31 – 37.

RODRIGUES, Henrique M. *Estudo de Argilas do Estado de Mato Grosso do Sul*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada. Departamento de Física/UFMS. Campo Grande, 1998. 177p.

ROMAN, Humberto Ramos; GLEIZE, Philippe J. P. *Possibilidades de Utilização de Resíduos pela Indústria Cerâmica*. Anais. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente



Construído. Qualidade no Processo Construtivo. Antac. Núcleo de Pesquisa em Construção. UFSC. Florianópolis. 1998. p. 893 – 897.

RONDON, Odilar Costa. *Análise da Produção de Tijolos Maciços em Campo Grande/MS*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 1983. 110 p.

SANTOS, Pérsio de Souza. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. 2.ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1989. V.1. 408p.

SGLAVO, Vincenzo M.; CAMPOSTRINI, Renzo; MAURINA, Stefano; CARTURAN, Giovanni; MONAGHEDDU, Marzio; BUDRONI, Gerolamo e COCCO, Giorgio. *Bauxite red mud in the ceramic industry. Part 1: thermal behaviour*. Journal of the European Ceramic Society Volume 20, Issue 3. March, 2000. p. 235 – 244.

SGLAVO, Vincenzo M.; MAURINA, Stefano; CONCI, Alexia; SALVIATI, Antonio; CARTURAN, Giovanni e COCCO, Giorgio. *Bauxite red mud in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics*. Journal of the European Ceramic Society. Volume 20, Issue 3. March 2000. p.245 – 252.

WENGENROTH Silva Filho, Roberval. *Avaliação de Argilas Sul-mato-grossenses visando sua utilização na confecção de produtos cerâmicos para a construção civil*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Física Aplicada. Departamento de Física. UFMS. 1999. 194p.

YALÇ, Nevin e SEVINÇ, Vahdettin. *Utilization of bauxite waste in ceramic glazes*. *Ceramics International*. Volume 26, Issue 5. June 2000. p. 485 – 493.

## **ANEXO A – FOTOGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA**

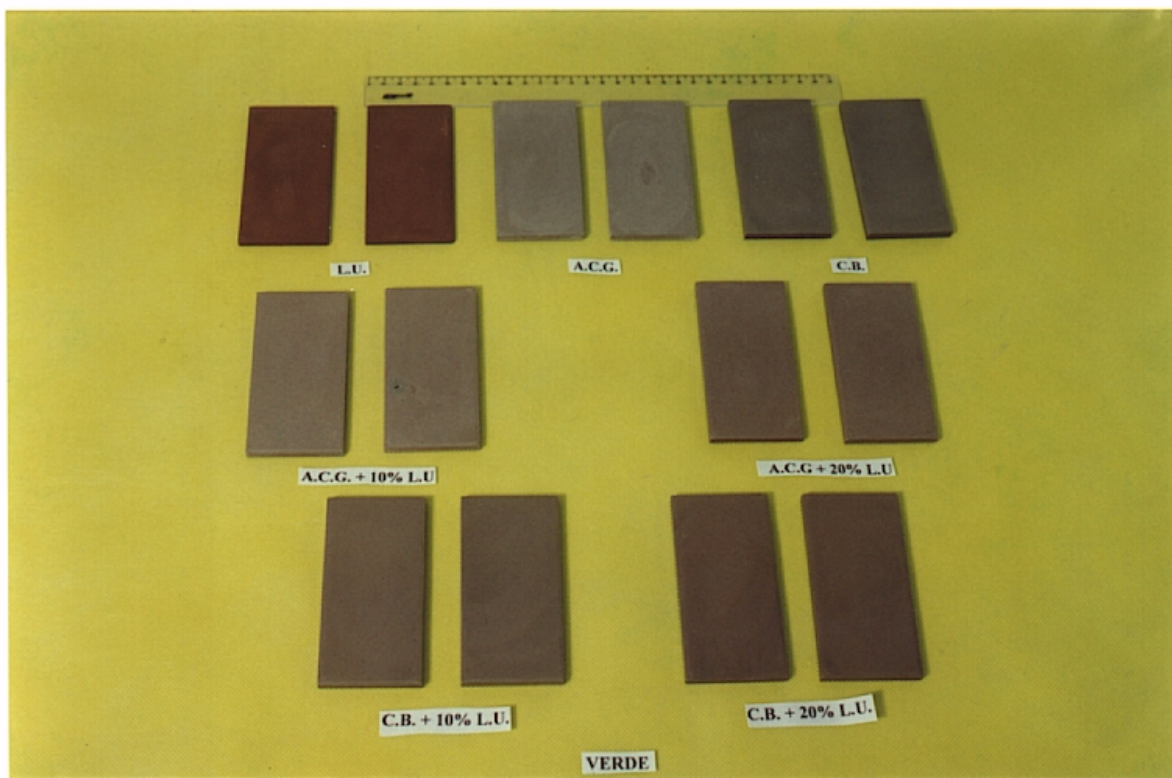


Figura 29: Fotografia dos corpos de prova “verde”

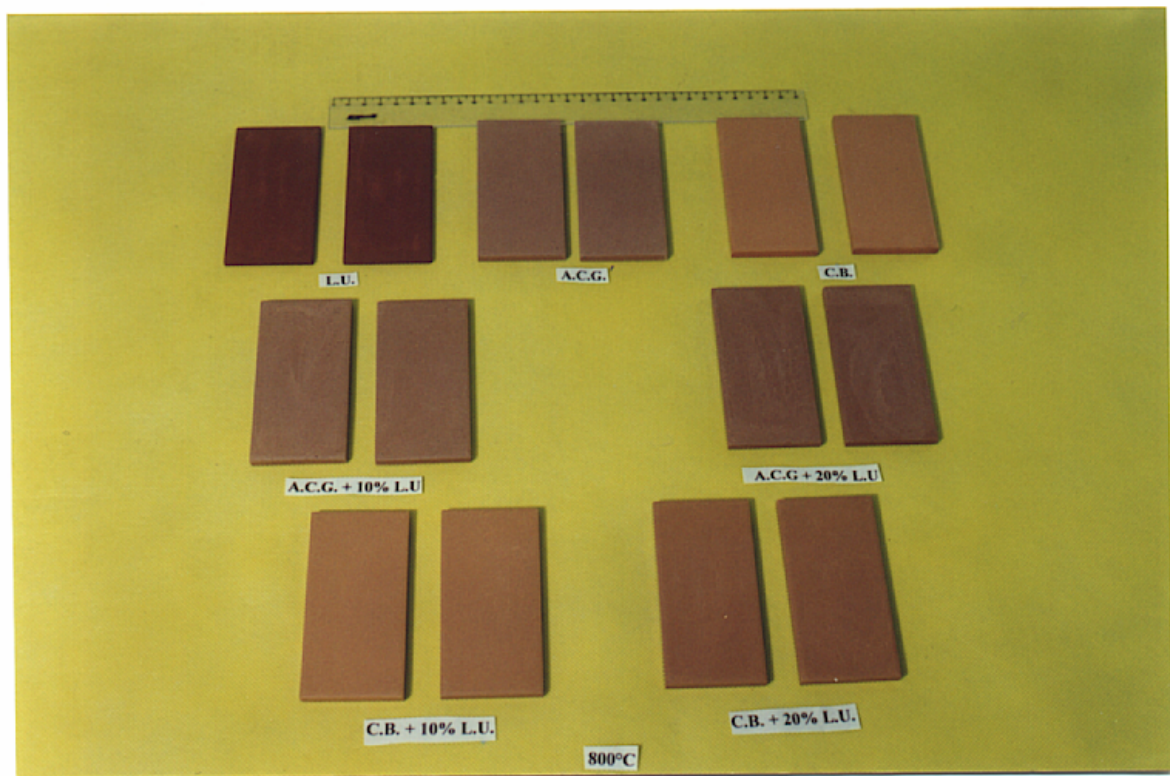


Figura 30: Fotografia dos corpos de prova queimados a 800°C

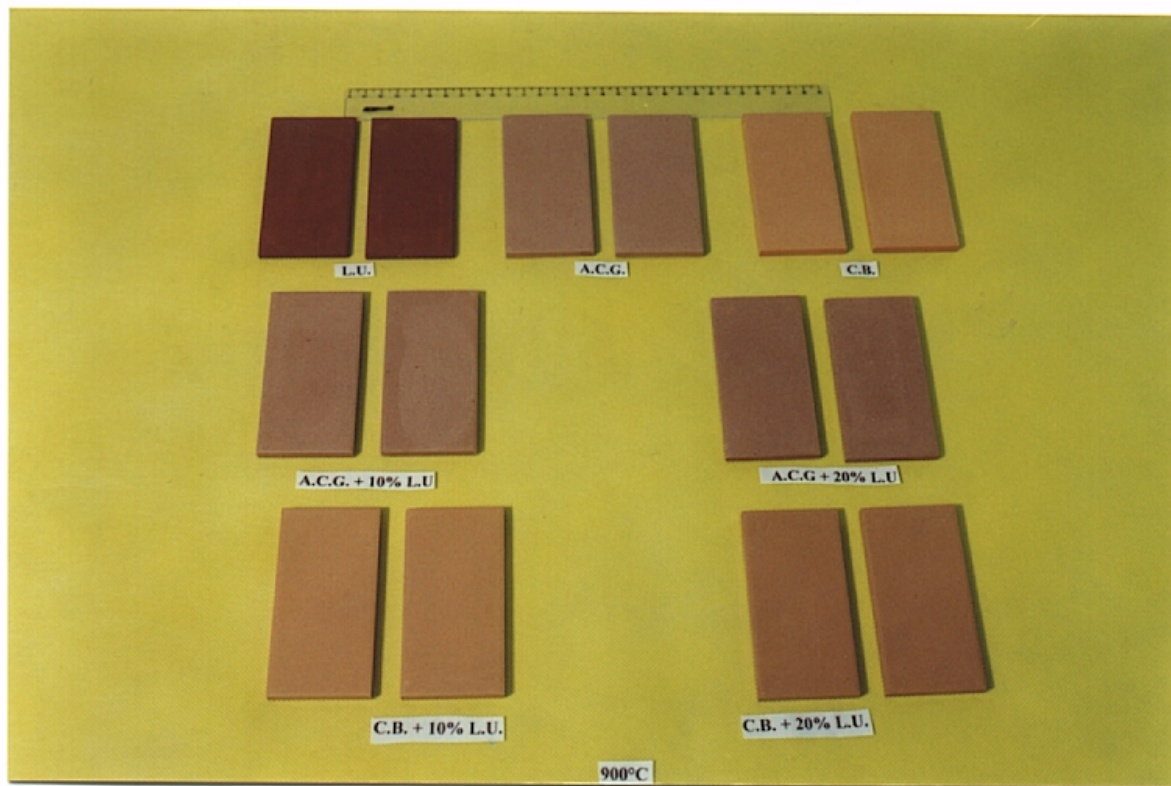


Figura 31: Fotografia dos corpos de prova queimados a 900°C

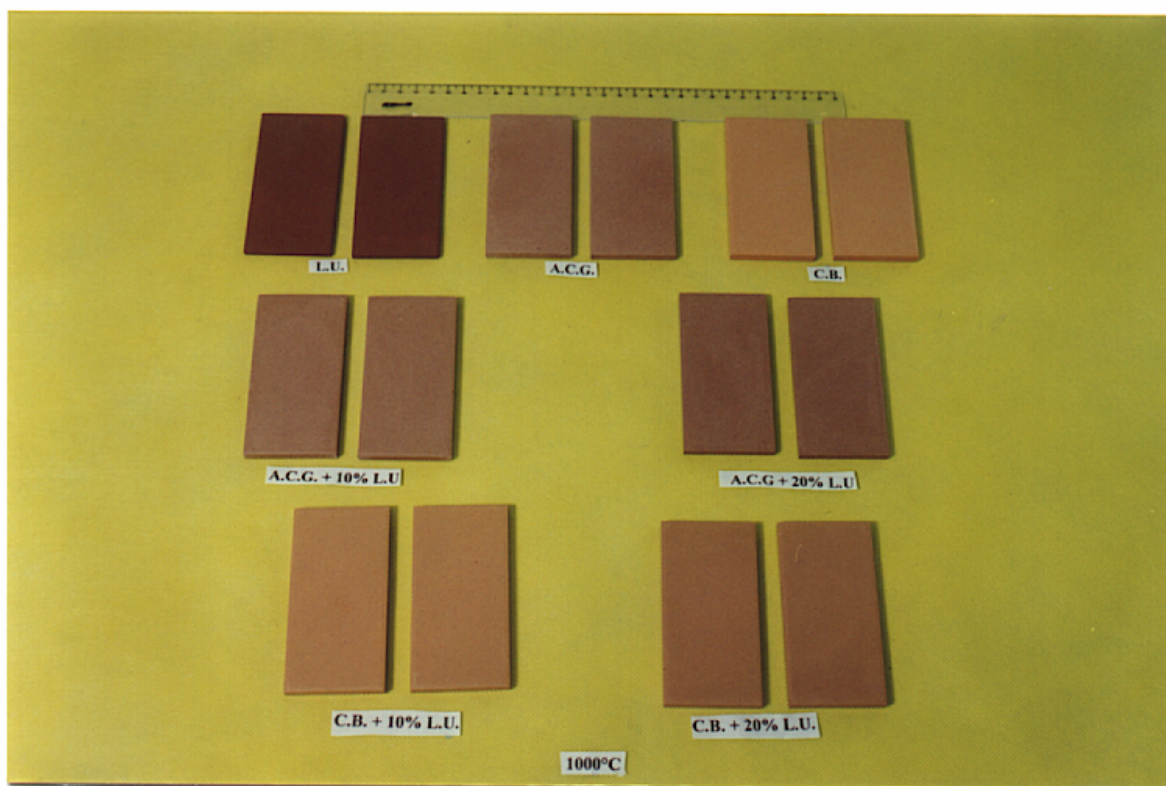


Figura 32: Fotografia dos corpos de prova queimados a 1000°C

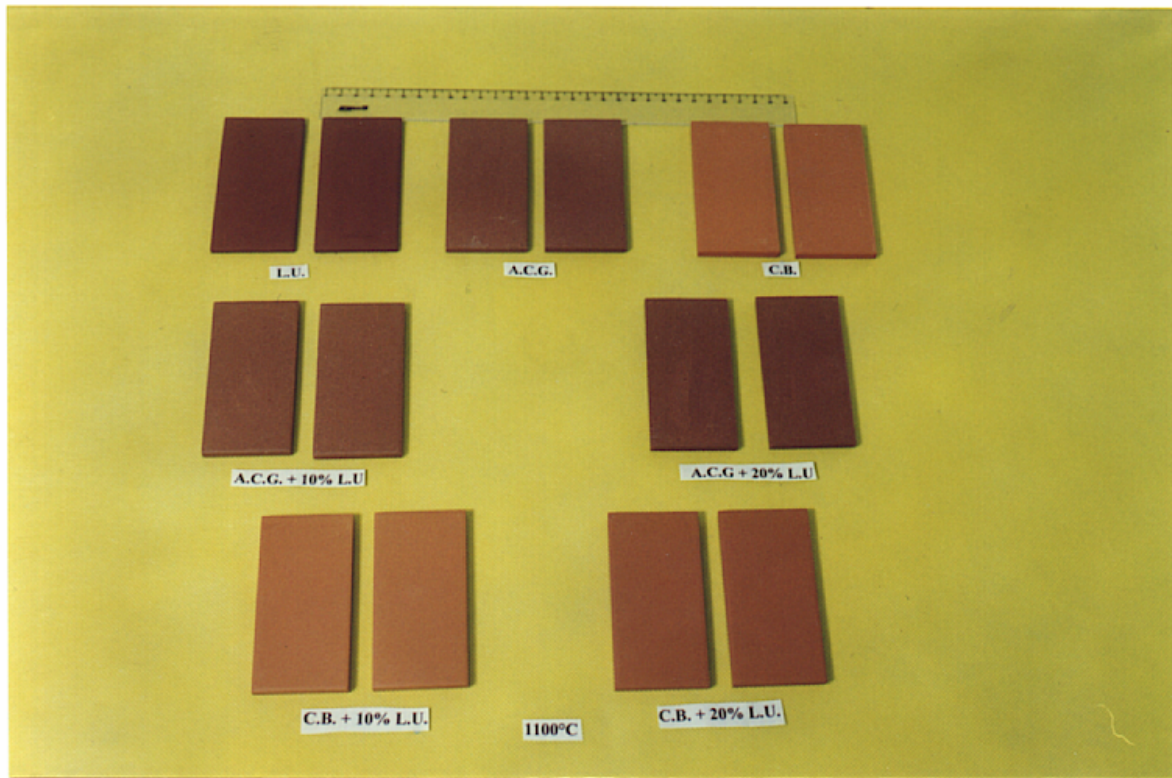


Figura 33: Fotografia dos corpos de prova queimados a 1100°C



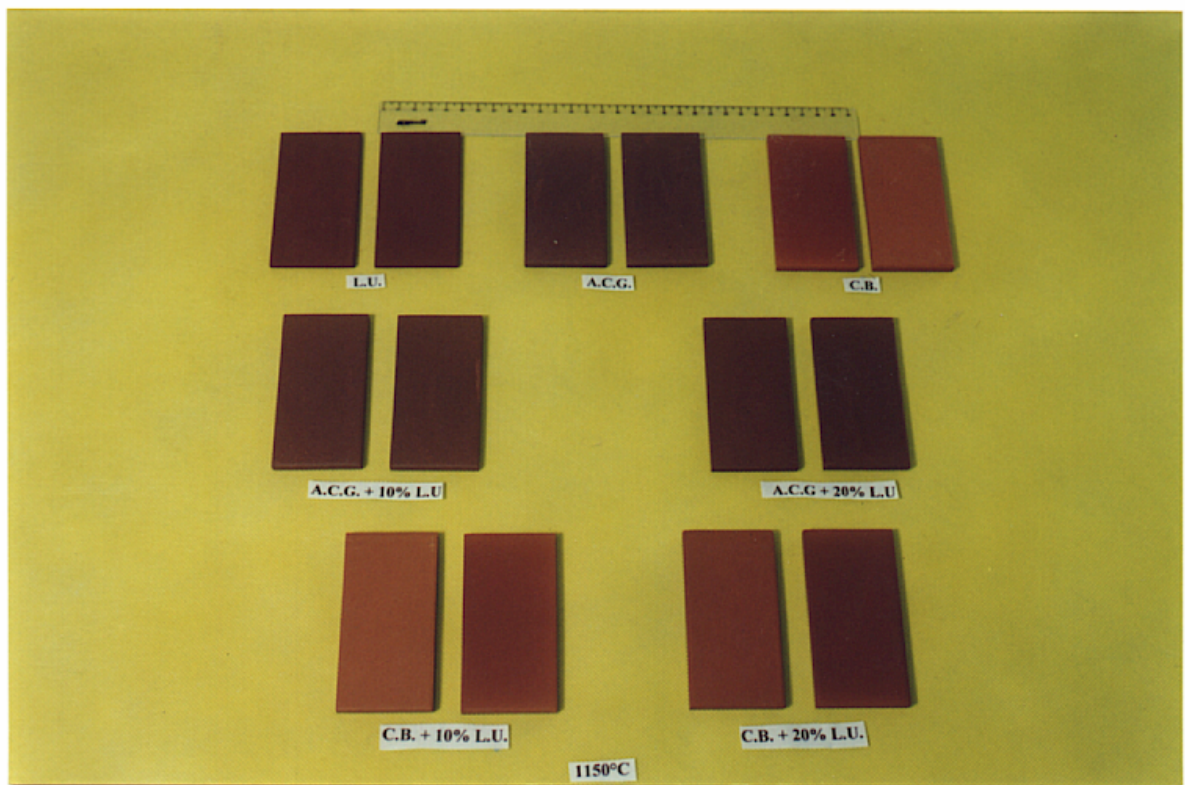


Figura 34: Fotografia dos corpos de prova queimados a 1150°C

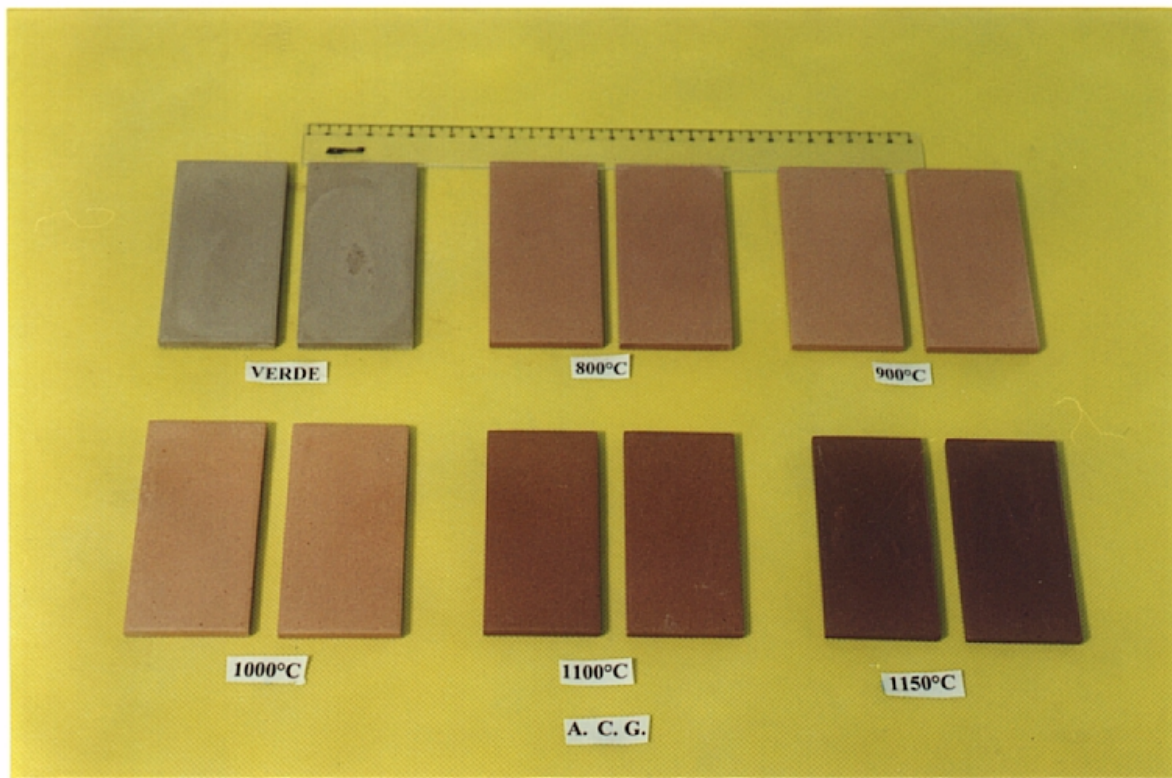


Figura 35: Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande (ACG)

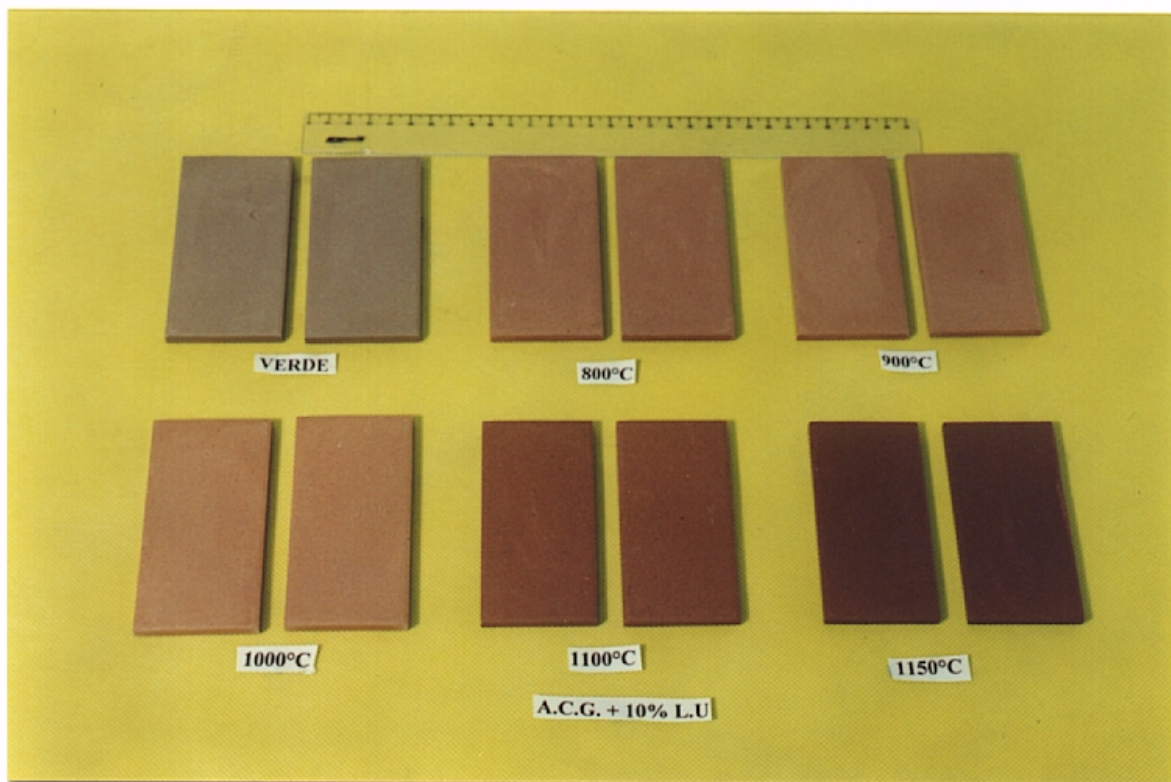


Figura 36: Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande + 10% lama Urucum(CG10)

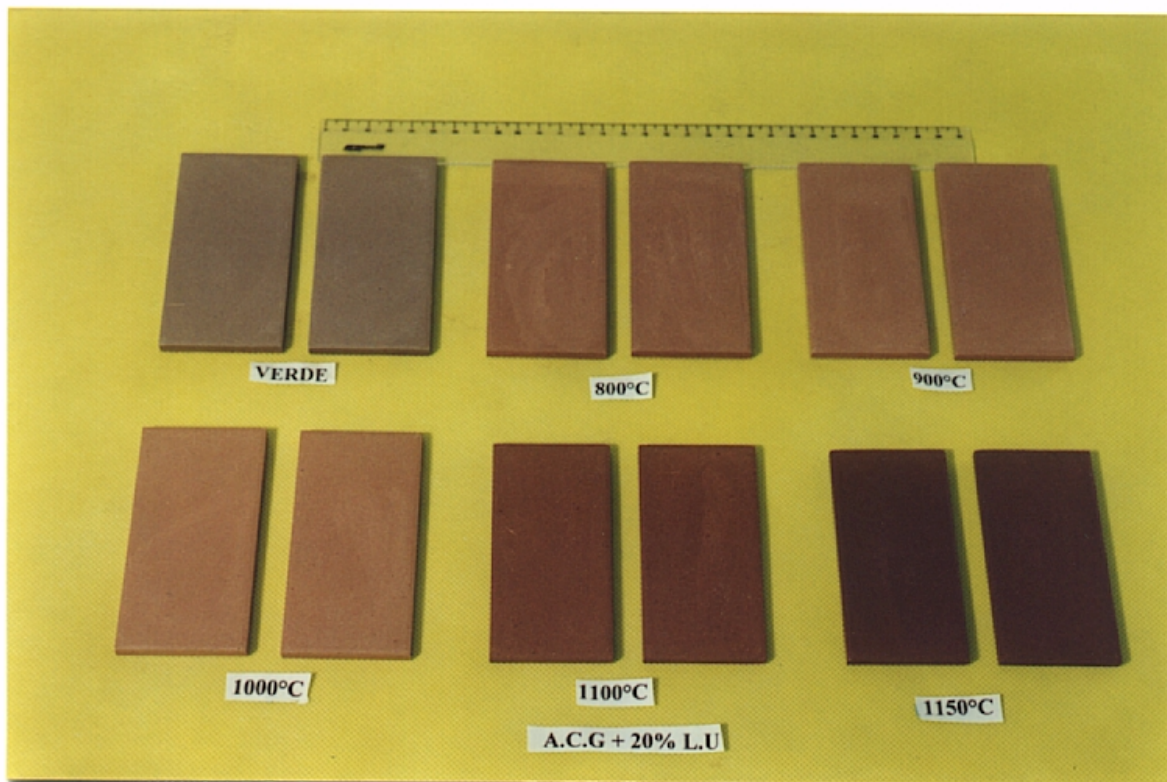


Figura 37: Fotografia dos corpos de prova da argila Campo Grande + 20% lama Uruçum(CG20)

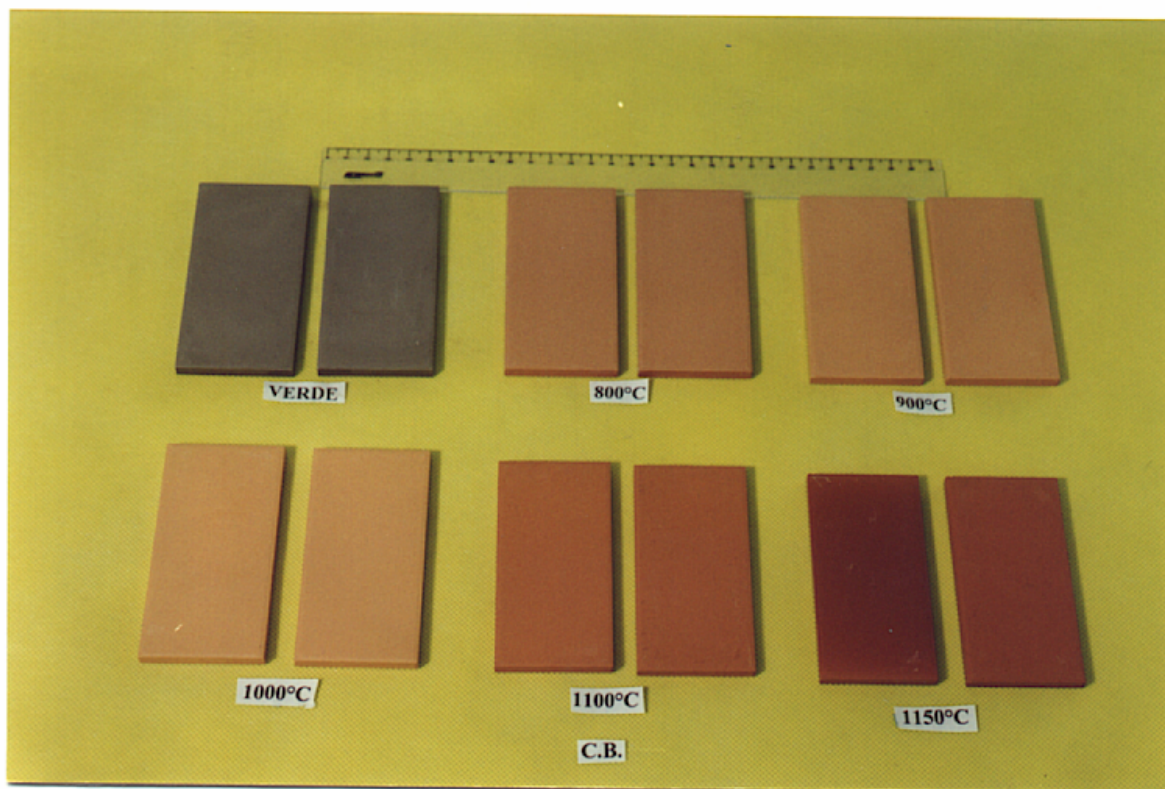


Figura 38: Fotografia dos corpos de prova da argila Corumbá (CB)

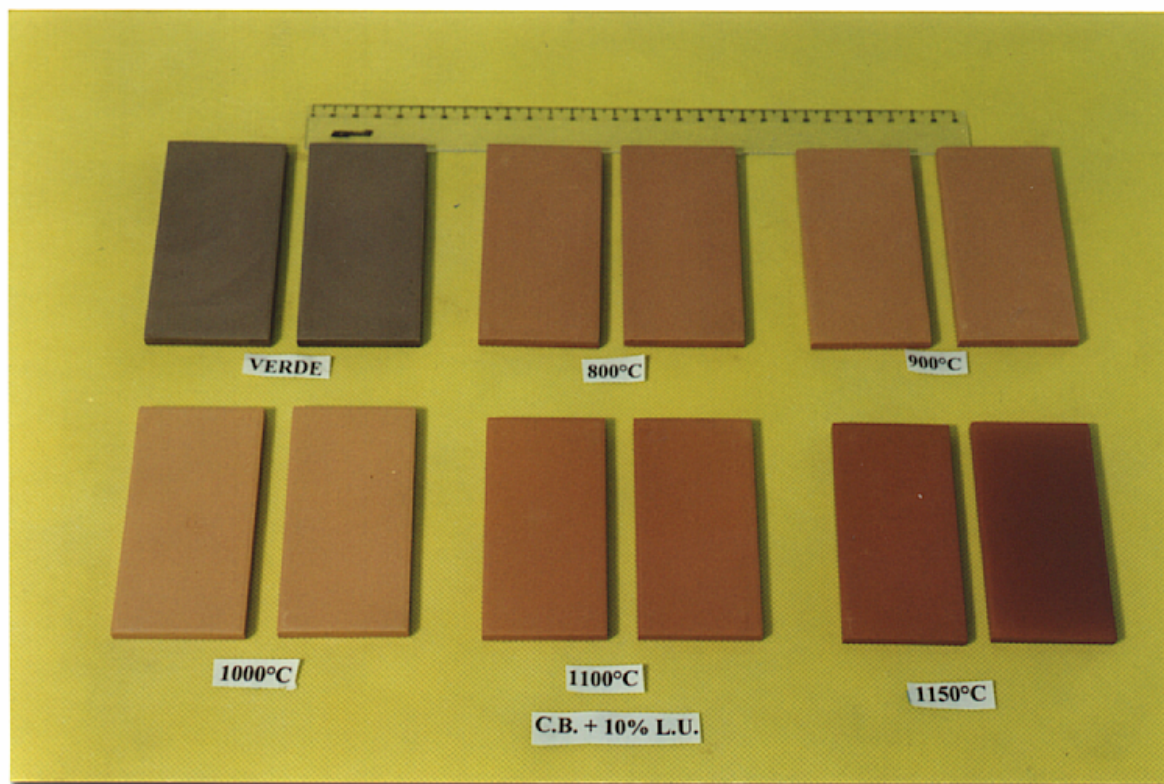


Figura 39: Fotografia dos corpos de prova da argila Corumbá + 10% lama Urucum (C10)

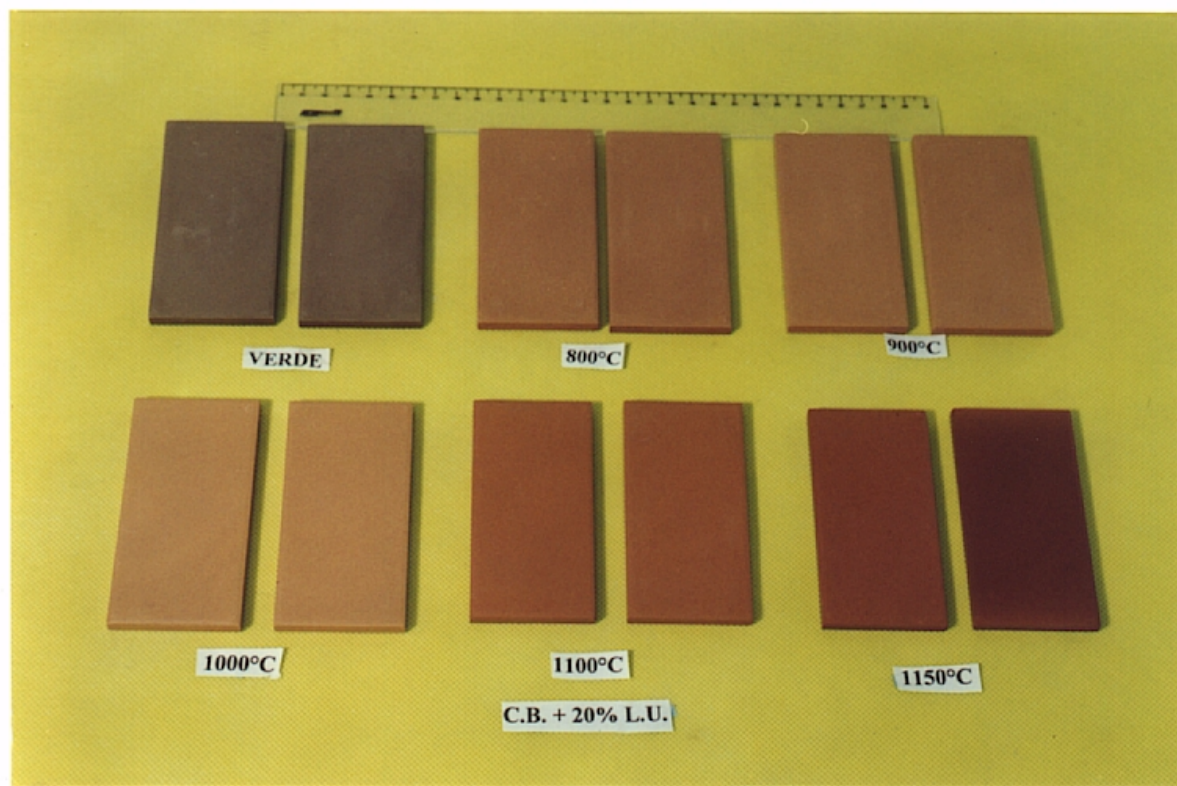


Figura 40: Fotografia dos corpos de prova da argila Corumbá + 20% lama Urucum (C20)

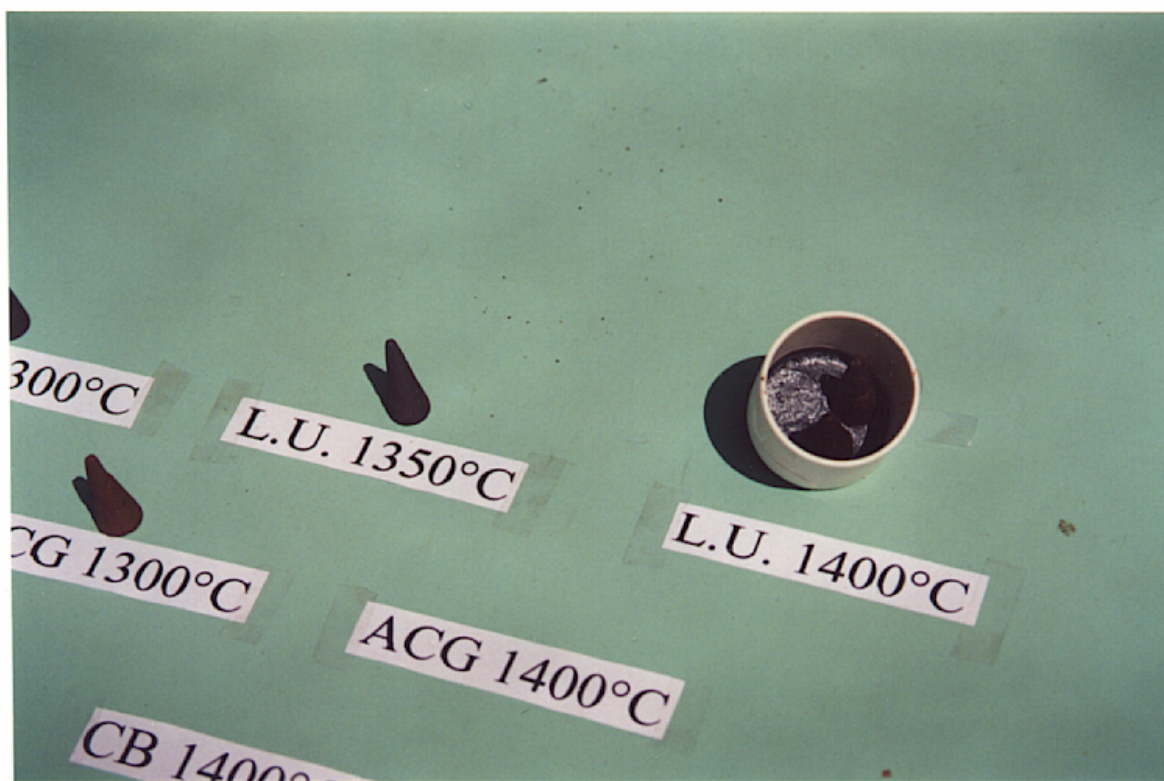
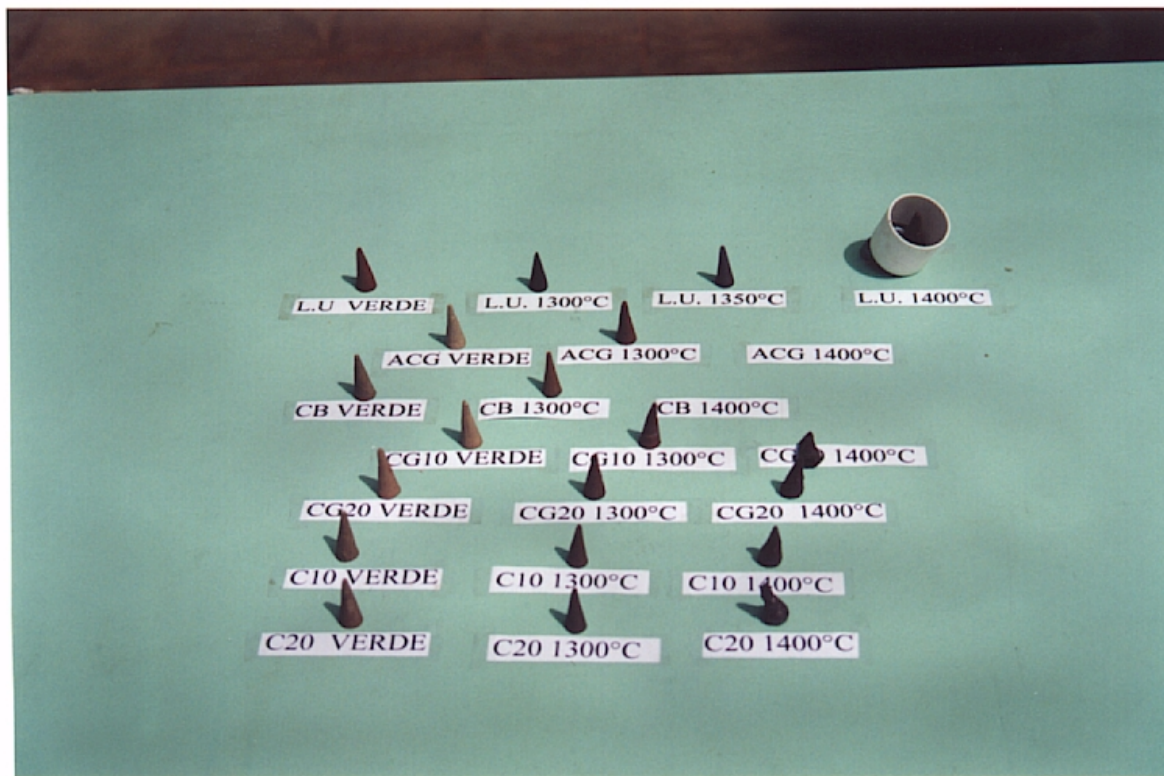


Figura 41: Fotografia dos cones queimados