

|

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DO SETOR DE
GEMAS: AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE GEMAS
NA MASSA CERÂMICA**

Fernando Roberto Bruxel

UNIVATES

Lajeado, junho de 2011

Fernando Roberto Bruxel

**A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DO SETOR DE
GEMAS: AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE GEMAS
NA MASSA CERÂMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento do Centro Universitário Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Eniz C. Oliveira

Co-orientador Prof^º. Dr^º. Odorico Konrad

Lajeado, junho de 2011

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

**A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DO SETOR DE
GEMAS: AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE GEMAS
NA MASSA CERÂMICA**

Elaborado por
Fernando Roberto Bruxel

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Ambiente e Desenvolvimento

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Eniz Conceição Oliveira
(Orientadora)

Prof. Dr. Odorico Konrad
(Co-orientador)

Prof^a. Dr^a. Simone Stülp

Prof. Dr. Bernardo F. TutiKian

Lajeado, junho de 2011

DEDICATÓRIA



Dedico este trabalho à minha noiva Dieine e à minha família pelo longo tempo que fiquei ausente em função dos estudos e pela paciência que tiveram comigo pelos momentos de estresse.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Eniz Conceição Oliveira pela paciência e ajuda nestes mais de dois anos de trabalho. Pela disponibilidade e atenção quando solicitado nos demorados encontros para discussão e orientação do andamento da pesquisa. Em especial, a ajuda na área de química, na orientação dos passos a serem seguidos em uma dissertação e no incentivo recebido para participar de eventos e congressos.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Odorico Konrad pelo apoio e incentivo no desenvolvimento da pesquisa, principalmente na orientação dos rumos dos trabalhos.

Ao Centro Tecnológico de Gemas e Jóias pela sala disponibilizada para que fosse possível montar os equipamentos usados nas análises dos corpos de prova.

À Prof^a. Dr^a. Simone Stülp pela atenção e esclarecimento das dúvidas levantadas sobre a pesquisa durante as aulas do mestrado. Pela orientação durante as análises dos corpos de prova no laboratório. Pela ajuda no artigo elaborado e enviado para o Engema.

Ao Prof. Dr. Henrique Fensterseifer pelo convite para participar do evento realizado no Centro Tecnológico de Gemas e Jóias e pela ajuda no esclarecimento de dúvidas sobre as gemas. Também pela companhia e apoio na visita realizada na empresa Caye Pedras Brasil.

À empresa Caye Pedras Brasil pela recepção calorosa na visita realizada na empresa, pelos esclarecimentos sobre o processo de manufatura das gemas e seu respectivo resíduo e pelo fornecimento da amostra de lodo de serra, sem qual não seria possível a elaboração desta pesquisa.

À Cerâmica Bruxel por disponibilizar o uso de seus equipamentos para a produção dos corpos de prova e pelo fornecimento da argila, sem qual, também não seria possível a realização desta pesquisa.

Às bolsistas de iniciação científica Emanuele Hoss e Cristine Muller pela ajuda e dedicação na realização das análises e dos testes nos corpos de prova.

Ao departamento da Engenharia da Univates por disponibilizar a prensa usada nos testes de resistência à compressão dos tijolos.

Ao técnico em cerâmica e administrador Marcos Dittmar Kopsch pelo apoio exercido durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Gilmar Bruxel por ter transportado a amostra de lodo de serra da empresa fornecedora até a cerâmica, onde foram produzidos os corpos de prova.

Ao Astor Kuhn pela ajuda na preparação das diferentes composições de massa cerâmica com lodo de serra adicionado e na produção dos tijolos com os respectivos percentuais de resíduo incorporado.

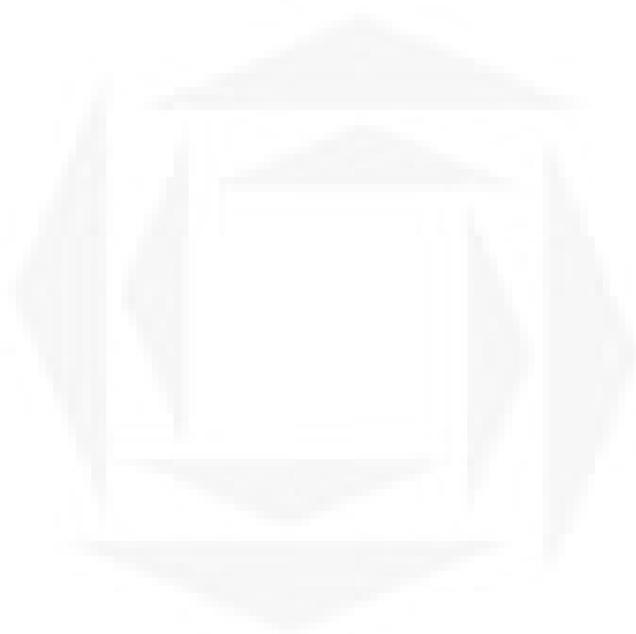
Ao Gilberto Bruxel pela ajuda na confecção dos bloquinhos de tijolos com argamassa para a realização do teste de resistência à compressão.

Ao Felipe Caio pela ajuda com a prensa na realização dos testes de resistência à compressão.

Ao Prof. Dr. Eduardo Périco pelo apoio e esclarecimentos de dúvidas sobre as questões estatísticas da pesquisa.

À Simone e a Fabiane da empresa Geoambiental pela colaboração e fornecimento de bibliografias usadas no desenvolvimento teórico da pesquisa.

Ao Marcos Turatti pela colaboração e apoio com referências usadas na elaboração desta pesquisa.



UNIVATES

RESUMO

Numa época repleta de novos conceitos ambientais, quando se busca alcançar um desenvolvimento sustentável para preservar as condições adequadas de vida às gerações futuras, a produção de resíduos é um dos problemas a serem resolvidos, ou pelo menos, minimizados. Uma das alternativas muito estudada ultimamente, é a introdução de alguns desses resíduos na massa cerâmica para a fabricação de tijolos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi adicionar o resíduo (lodo) oriundo do corte de gemas na matéria-prima usada para produzir tijolos cerâmicos. Foram preparados corpos de prova com 0%, 5%, 9%, 13% e 17% de resíduo adicionado em peso. A composição química da massa cerâmica e do lodo de serra foi avaliada por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X e Espectrometria de Absorção Atômica. As análises físicas estudadas foram: a retração linear, a absorção de água, a resistência mecânica à compressão, a homogeneidade e a densidade de acordo com a norma técnica vigente. Após a realização das análises foi constatado que é possível a utilização de lodo de serra na massa cerâmica. Devido ao fato de o resíduo (lodo) ser formado por grande quantidade de sílica, poderia se investigar o seu uso em outros produtos mais nobres, como produtos da cerâmica branca (pisos, azulejos, louça, etc.).

Palavras-chave: Resíduo. Lodo de gemas e cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The emergence of new environmental concepts and seeking to achieve sustainable development to preserve adequate conditions of life for future generations, the production of waste is one of the problems to be solved, or at least minimized. One of the alternatives studied much lately is the inclusion of some residues in the ceramic body for brick manufacturing. The objective is to add the residue (sludge) coming from the cutting of gems in the raw material used to produce clay bricks. Specimens were prepared with 0%, 5%, 9%, 13% and 17% waste added to the ceramic body mass. The determination of the chemical analysis of samples was performed by fluorescence spectrometry X-ray and Atomic Absorption Spectrometry. The physical analysis were: the compressive strength, linear shrinkage, water absorption, uniformity and density in accordance with current technical standard. The results demonstrated that it is possible to incorporate the sludge gem in bulk ceramics.

Keywords: Waste. Sludge yolks and red ceramic.

UNIVATES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - Porcentagem/Percentual

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AA - Absorção de água

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

°C - Graus Celsius

CO₂ - Dióxido de carbono

CO - Monóxido de carbono

CaO - Óxido de cálcio

cm - Centímetro

cm² - Centímetro quadrado

Fe₂O₃ - Óxido de ferro III

FEPAM-RS - Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul

g - Grama

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

km² - Quilômetro quadrado

km - Quilômetro

kgf - Quilograma força

K₂O - Óxido de potássio

kg - Quilograma

Ltda - Sociedade Limitada

LATEC - Laboratório de Tecnologia de Construção

MB - Mercedes Benz

m³ - Metro cúbico

Mesh – Tamanho de malha

m/m – Relação massa massa

mL - Mililitro

Mu - Massa úmida

Ms - Massa seca

mm - Milímetro

MPa - Megapascal

MgO - Óxido de magnésio

MnO - Óxido de manganês II

NBR - Norma Brasileira

n° - Número

N - Newton

Na₂O - Óxido de sódio

n - Número de amostras

Psi – Psi unidade de pressão

P₂O₅ - Pentóxido de difósforo

PF - Perda ao fogo

RS - Rio Grande do Sul

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SiO₂ - Dióxido de silício

TiO₂ - Óxido de titânio II

UNIVATES – Centro Universitário Univates

V₂O₅ – Óxido de vanádio V

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balança utilizada para o preparo das amostras na Cerâmica Bruxel...	37
Figura 2 – Recipientes usados para as medidas de argila e lodo de serra. (a) jarra; (b) balde.....	38
Figura 3 – Lodo de serra sendo incorporado à massa cerâmica.....	39
Figura 4 – Maromba e cortador de tijolos.....	39
Figura 5 – Adição de lodo de serra à massa cerâmica.....	40
Figura 6 – Visão da entrada do secador e as fendas por onde o calor sai para secar os tijolos. (a) entrada do secador; (b) “gateiras”.....	41
Figura 7 – Entrada dos produtos no forno (a); saída dos produtos queimados do forno (b).....	42
Figura 8 – Processo de medição dos corpos de prova.....	43
Figura 9 – Blocos de tijolos e argamassa preparados para o teste de resistência à compressão.....	45
Figura 10 – Prensa com os corpos de prova, utilizada para o teste de resistência à compressão.....	46
Figura 11 – Gráfico demonstrando a retração dos tijolos com a adição do lodo de serra.....	51
Figura 12 – Resistência à compressão em relação ao percentual de lodo de serra adicionado à massa cerâmica.....	52

Figura 13 – Absorção de água em relação à adição de lodo de serra.....	54
Figura 14 – Gráfico do resultado da análise da densidade dos materiais.....	55
Figura 15 – Micrografias obtidas dos materiais estudados com 0% (a), 5% (b), 10% (c), 15% (d), 20% (e) e 5% (f) de lodo de serra adicionado.....	56



LISTA DE TABELAS

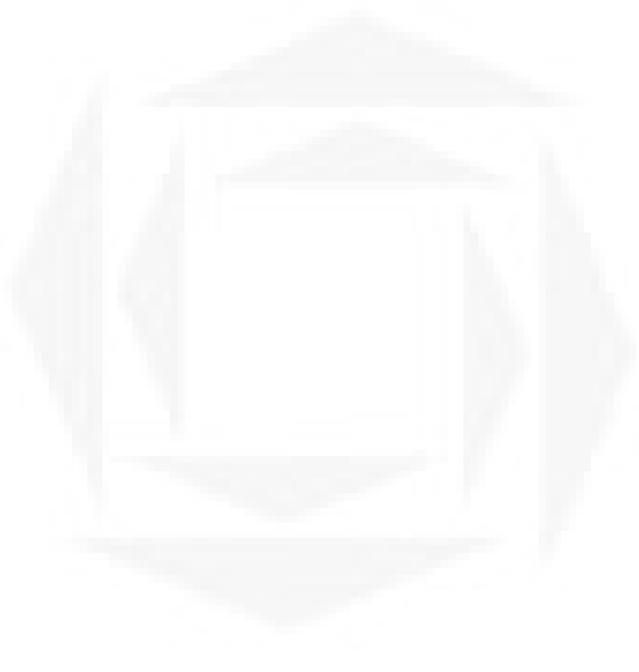
Tabela 1 – Composição química (% massa) das matérias-primas.....	48
Tabela 2 – Retração linear para as amostras de tijolos com diferentes composições.....	50
Tabela 3 – Resistência à compressão das amostras de tijolos com diferentes composições.....	51
Tabela 4 – Classificação dos tijolos maciços segundo sua resistência.....	51
Tabela 5 – Resultado das análises da absorção de água.....	53
Tabela 6 – Resultado da análise da densidade do material estudado.....	54

UNIVATES

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 História da cerâmica.....	20
3.2 Argila.....	21
3.3 Ágata.....	25
3.4 Desenvolvimento sustentável.....	29
3.5 Resíduos utilizados para incorporação na massa cerâmica.....	32
4 MÉTODOS.....	35
4.1 Amostras.....	35
4.2 Preparo das amostras para os testes químicos.....	36
4.3 Análise química das amostras de argila e lodo de serra.....	37
4.4 Corpos de provas.....	38
4.5 Análise dos corpos de prova.....	42
4.5.1 Retração linear.....	42
4.5.2 Absorção de água.....	44
4.5.3 Resistência à compressão.....	45
4.5.4 Densidade.....	46
4.5.5 Homogeneidade.....	47
5 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	48
5.1 Análise química das amostras de argila e lodo de serra.....	48
5.2 Testes físicos.....	50
5.2.1 Retração linear.....	50
5.2.2 Resistência à compressão.....	51

5.2.3 Absorção de água.....	53
5.2.4 Densidade.....	54
5.3 Homogeneidade.....	55
5.4 Considerações finais.....	57
6 CONCLUSÃO.....	58
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61



UNIVATES

1 INTRODUÇÃO

Num tempo em que uma superpopulação mundial com expansiva atividade industrial é responsável pelo surgimento de novas técnicas produtivas, as questões ambientais merecem atenção. Hoje, a Terra é vista com outros olhos, uma vez que os impactos das descobertas humanas resultaram numa maior compreensão das pessoas referente ao ambiente do planeta. De acordo com Capra (2006) e Morin (2007), a vida na Terra é um sistema integrado, ou seja, o ambiente e a sociedade formam um único sistema.

A indústria, para se adequar ambientalmente, precisa conhecer as leis e normas que regem seu setor, para poder ofertar produtos ecologicamente corretos que serão exigidos pela sociedade. A preocupação de pesquisadores e produtores com a geração de resíduo faz com que busquem a possibilidade de reduzir ou redirecionar esses resíduos e uma das alternativas, seria utilizar os resíduos na composição de argilas cerâmicas.

A indústria cerâmica é considerada uma das indústrias mais antigas da sociedade e seu principal insumo é a argila. Sua cor avermelhada, oriunda do processo de queima é que a caracteriza como cerâmica vermelha. No Brasil, segundo Bordignon *et al.* (2008), há cerca de 5.500 empresas cerâmicas, produzindo dos mais variados produtos, como: tijolos maciços, tijolos furados, lajotas, telhas, blocos estruturais, pisos, tubos, etc, e no Rio Grande do Sul, a grande maioria está localizada nas regiões do Vale do Caí e no Vale do Taquari.

O uso de resíduos sólidos na composição da argila para a produção de produtos cerâmicos se tornou uma alternativa estudada a nível mundial e no meio científico. Inúmeros autores, como Borlini *et al.* (2005), Oliveira e Holanda (2008), Silva *et al.* (2005) e Vieira *et al.* (2006), realizaram pesquisas no setor da cerâmica vermelha com o intuito de oferecer um destino adequado a diversos tipos de resíduos sólidos. Eles acreditam que a composição da massa argilosa da cerâmica vermelha e sua heterogeneidade, podem tolerar a presença de diversos tipos de materiais, mesmo que em quantidades maiores. A massa da cerâmica vermelha, além de ser um destino final ambientalmente correto para os resíduos, também contribui na inertização de elementos potencialmente tóxicos.

Outro ponto favorável da adição de resíduos na massa argilosa é a obtenção de economia na matéria-prima, proporcionando uma redução da quantidade de argila extraída e usada no setor cerâmico, conseqüentemente, prolongando o tempo útil da jazida desse recurso natural não renovável. Atualmente, 77% das empresas cerâmicas utilizam por mês até 500 toneladas de argila e 16% das empresas consomem entre 500 e 1 000 toneladas por mês (BORDIGNON *et al.*, 2008).

Entretanto, não se pode esquecer do fator econômico envolvido nessa questão, considerando que a argila é uma matéria-prima que também precisa ser adquirida. Nesse caso, com a adição de resíduo, a quantidade proporcional de argila não será comprada, gerando uma redução de custo para a empresa. Da mesma forma, a empresa que gerar o resíduo, irá minimizar o gasto necessário para tratá-lo e destiná-lo, pois o mesmo poderá servir de matéria-prima na cerâmica, beneficiando as duas pontas do processo.

O resíduo gerado pelas empresas que trabalham com gemas, é o objeto de estudo deste trabalho, ou seja, sua incorporação na massa cerâmica. O resíduo é oriundo da serra de corte das pedras. As pedras utilizadas neste setor são constituídas por ágatas, que correspondem por mais de 95% do total, ametistas, jaspes e quartzo. Isso significa que todo resíduo gerado, basicamente é formado por pó de ágata.

Uma das empresas visitadas, consome cerca de 14 toneladas de pedras por mês. Já na primeira etapa do processo produtivo, onde as pedras são serradas na

serra caixão, 30% da matéria-prima é transformada em lodo. E na etapa seguinte do processo produtivo, as pedras passam pela serra normal, onde mais de 20% da matéria-prima viram lodo. Neste cenário, pode-se calcular que 50% da matéria-prima usada pela empresa, vira resíduo, que corresponde a 7 toneladas de lodo por mês. A empresa fornecedora do lodo de pedra situa-se no município de Teutônia, onde existem mais três empresas, que geram quantidades de resíduos similares.

Vale ressaltar que a empresa possui uma estação de tratamento de efluentes, pois, na primeira etapa do processo produtivo é adicionado óleo diesel marítimo para lubrificar a serra e esse acaba se juntando ao pó da pedra, virando no lodo citado anteriormente. Esse lodo composto pelo pó de pedra e óleo diesel marítimo é armazenado em tambores de 200 e 100 litros. Em seguida, o lodo é colocado dentro de um misturador (betoneira), onde é acrescentado água para bater o lodo e tentar separar o óleo. Após bater, o óleo por ser menos denso do que a água, fica na superfície e é retirado para ser novamente utilizado no processo produtivo. O restante do líquido segue por uma canaleta até uma estação de tratamento, formada por diversos tanques, sendo que, o primeiro tanque fica ligeiramente mais alto do que o segundo e assim, sucessivamente. Nesta estação, o objetivo é separar a água, por gravidade, do restante do óleo que ainda ficou misturado. O óleo retirado da água é reutilizado no processo produtivo e a água é usada para lavar os equipamentos e para novamente ser usada na betoneira. Com isso a empresa busca adotar os processos de Produção Mais Limpa.

O lodo que sobra depois do tratamento é destinado a um aterro de resíduos industriais controlado, situado no município de Bento Gonçalves, no Rio Grande do Sul. Isso acarreta um custo considerável para a empresa, pelo transporte do resíduo de Teutônia até Bento Gonçalves e pelo custo de manutenção de um aterro licenciado. Este lodo, pós-tratamento, que será incorporado à massa cerâmica, proporciona um destino mais nobre ao resíduo, pois além de colaborar com o ambiente, deixa de desperdiçar um material que pode ser matéria-prima em outro produto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a utilização de lodo de gemas, provenientes da serra de corte, na massa da cerâmica vermelha para produzir tijolos.

2.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar composições com incorporação do lodo de gemas na massa argilosa vermelha com diferentes percentuais em massa para a produção de tijolos;
- b) Determinar a porcentagem de lodo mais indicada para adicionar à massa argilosa cerâmica para os materiais estudados neste trabalho;
- c) Avaliar a qualidade do tijolo produzido com a incorporação do lodo de gemas em termos de:
 - Resistência à compressão;
 - Absorção de água;
 - Retração linear;
 - Homogeneidade;
 - Densidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 História da cerâmica

Em toda história, os avanços e o desenvolvimento das civilizações está diretamente ligada às habilidades dos humanos em produzir e manusear materiais para satisfazer suas necessidades. As civilizações antigas, segundo Callister (2008), foram denominadas pelo seu grau de desenvolvimento em relação aos tipos de materiais que dominaram. Pode-se citar como exemplo a Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Ferro. Os primeiros humanos só conseguiam manipular os materiais que estavam disponíveis na natureza: pedra, madeira, argila, peles, etc. Com o passar do tempo, os humanos desenvolveram algumas técnicas para produzir materiais, que não fossem os naturais, destacando neles as cerâmicas e os metais. Com uma das técnicas usadas para manipular os materiais, eles aprenderam que a utilização de um tratamento térmico, serviria para produzir outros objetos.

Há mais de 2000 anos, bem antes do domínio português, no Brasil já havia produção de materiais cerâmicos. A origem desses materiais cerâmicos está vinculada às culturas avançadas dos indígenas, habitantes do Brasil na época, que fabricavam potes, baixelas e outros produtos para uso doméstico. Alguns estudos arqueológicos apontam para indícios de material cerâmico presente na região amazônica, em torno de 5000 anos atrás (GALLUCCI e CUNHA, 2008).

No entanto, quando se trata de cerâmica vermelha, encontram-se pouquíssimas informações sobre seu histórico. Os pesquisadores Gallucci e

Cunha (2008) descrevem sobre algumas técnicas de produção rudimentar implantadas pelos jesuítas, na época Colonial do Brasil, para produzir tijolos a serem usados na construção de colégios e conventos. Os pesquisadores relatam também que, em 1549, o governador-geral Tomé de Souza, incentivou a fabricação de materiais de construção para desenvolver cidades mais planejadas. Em 1575 iniciou o uso de telhas na construção de vilas que mais tarde se tornaram a cidade de São Paulo. Foi neste momento que a atividade cerâmica cresceu substancialmente, considerando as olarias como o marco inicial da indústria de São Paulo.

No final do século XIX, o processo produtivo nas pequenas olarias era manual e os principais produtos fabricados eram: tijolos, telhas, tubos, manilhas, vasos e potes. Pelas características dos transportes da época, os produtos das olarias eram comercializados dentro da própria vila. Pelo estudo realizado por Gallucci e Cunha (2008), a primeira grande olaria que se estabeleceu no Brasil, foi fundada em 1893 por quatro irmãos franceses, naturais da cidade de Marselha. A empresa se situou na cidade de São Paulo, com o nome de “Estabelecimentos Sacoman Frères”, sendo mais tarde seu nome mudado para “Cerâmica Sacoman S.A.”, encerrando suas atividades em 1956. Devido a esses franceses, surgiram as telhas “francesas” e/ou “marselhesas”, que estão sendo comercializadas no mercado até os dias de hoje.

Entre o final do século XIX e o início do século XX, com a especialização dos processos produtivos nas empresas cerâmicas, houve uma separação nos termos “olaria” e “cerâmica”. O termo “olaria” compreenderia a produção de tijolos e telhas em geral. Já o termo “cerâmica”, compreenderia produtos considerados mais sofisticados, como manilhas, tubos, azulejos, louças, potes, etc. No decorrer do trabalho será abordada a matéria-prima utilizada nas olarias para produzir os tijolos e outros produtos cerâmicos (GALLUCCI e CUNHA, 2008).

3.2 Argila

A argila é um material natural e terroso, formado por finas partículas cristalinas, criando certa plasticidade em contato com quantidade limitada de água.

O termo “argila” é utilizado para expressar uma rocha e para determinar uma faixa de dimensões de partículas de rochas sedimentares e solos. Santos (1989), explica que o termo “argila” designa o material resultante do intemperismo, da ação hidrotérmica e ou o material que se depositou como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos. E continua, as análises químicas demonstram de que a argila é formada principalmente por silício, alumínio, água e por quantidades de ferro e de metais alcalinos e alcalinos terrosos.

Entretanto, é complicado conseguir definir as propriedades de uma argila, devido às variadas condições geológicas em que se encontram e foram formadas. As argilas podem variar, em sua composição mineralógica, qualitativa e quantitativa dentro dos argilominerais e nos componentes não-argilominerais. Os argilominerais, de acordo com Santos (1989), são minerais característicos das argilas, quimicamente compostos por silicatos de alumínio hidratados, podendo também conter magnésio, ferro, cálcio, sódio, potássio, lítio e outros. Os argilominerais, com a adição de água, se transformam em uma pasta plástica que, após a secagem e a queima, endurecem.

Para corroborar com a discussão da dificuldade de denominação da composição de uma argila, recorre-se a diferentes trabalhos realizados com argila, onde Vieira *et al.* (2007) e Silva *et al.* (2005) definiram que a composição química da argila é constituída principalmente por sílica e alumina. Porém, abordam os autores, a argila também é formada por muitos outros componentes em quantidades inferiores, como alguns óxidos. O óxido de ferro, que durante a queima confere uma coloração escura aos produtos, é um dos componentes citados. Outros autores como Vieira, Margem e Monteiro (2008) e Vieira e Monteiro (2006) ressaltam a grande variação que as argilas sofrem de acordo com a região em que se localizam. Em seus estudos, descrevem que as argilas do Rio de Janeiro são constituídas, além dos componentes principais citados anteriormente, por: caulinita, quartzo, mica muscovita e gibsita. No Rio Grande do Norte, foram encontrados grandes concentrações de quartzo e illita, além de picos pouco intensos de muscovita, ortoclase e hematita.

Pela grande variação que sofrem as argilas em suas composições, elas poderão ser descritas seguindo alguns fatores: composição mineralógica dos

argilominerais qualitativos e quantitativos; a distribuição granulométrica das partículas; a natureza e o teor de componentes orgânicos e as características texturais da argila (SANTOS, 1989).

Segundo Santos (1989), os dados de uma análise química, isoladamente, oferecem poucas informações sobre as propriedades de uma argila e podem conduzir a conclusões erradas. No entanto, quando há o intuito por uma propriedade específica, por exemplo, a cor após a queima ou o ponto de fusão, a análise química torna-se importante. A complexidade das argilas gera enormes dificuldades para sua classificação, conduzindo a um conceito de que não irão se encontrar duas argilas idênticas. Por isso, originaram-se nomenclaturas geográficas para as argilas, identificando-as de acordo com a localidade de onde são encontradas e extraídas.

Frequentemente, as argilas são analisadas em laboratório para determinar o seu uso ou não na indústria cerâmica. Santos (1989) descreve que a argila pode ser classificada em três grupos cerâmicos pela cor que apresenta depois da secagem e da queima. Dependendo da cor que a argila apresentar, ela pode ser denominada de argila para cerâmica vermelha, argila para cerâmica branca e argila para a fabricação de material refratário. As argilas para a cerâmica vermelha, na natureza são pretas, vermelhas, marrons, amarelas ou esverdeadas. Essas argilas, a 950°C, apresentam a cor vermelha e em temperatura de 1250°C, apresentam a cor marrom ou preta. As argilas deste grupo são abundantes em fundentes, como: ferro, potássio e cálcio. Na concepção de Vieira *et al.* (2007), a coloração avermelhada da cerâmica é proveniente da oxidação do ferro metálico e dos compostos do ferro.

Por volta de 200 anos atrás, na Inglaterra apareceram os primeiros resultados de pesquisas sobre a cerâmica, dos quais surgiram inúmeras experiências de queima de sistemas cerâmicos que serviram de base à indústria inglesa atual. Na cerâmica vermelha a argila é utilizada na produção de materiais para a construção civil. A indústria da cerâmica vermelha é uma das poucas deste setor, em que usa somente uma matéria-prima (argila) para moldar na sua forma final e queimar, sem a adição de qualquer outro mineral ou minério. Santos (1989) define a cerâmica como aquela que trabalha com todos os minerais não-metálicos insolúveis encontrados na crosta terrestre e com todos os compostos inorgânicos insolúveis e não-metálicos que o homem já sintetizou.

De acordo com Santos (1989), a produção de materiais cerâmicos compreende algumas etapas em seu processo, como: preparação das matérias-primas, conformação, fabricação e processamento térmico.

a) Preparação das matérias-primas: também chamada de cominuição, acontece a redução granulométrica das partículas das argilas por peneiramento ou outro meio mecânico e a mistura de água, de modo que haja melhor ligação entre as partículas;

b) Conformação e fabricação: ocorre a compactação e a moldagem das argilas fragmentadas em uma massa plástica já com as características das peças desejadas. Essa etapa também pode ser chamada de extrusão da massa cerâmica, onde as argilas fragmentadas são processadas em uma extrusora;

c) Processamento térmico: são obtidas as transformações desejadas com o uso de energia térmica. Nesta etapa, acontece a secagem das peças, buscando retirar a maior quantidade possível de umidade de dentro das peças e depois as mesmas passam pelo processo de queima (cozedura), onde as partículas da argila se fundem.

Os produtos da cerâmica vermelha, como tijolos de alvenaria, tijolos furados, lajes cerâmicas, tijolos prensados e telhas, na descrição de Santos (1989), utilizam matérias-primas constituídas de argilas plásticas caulinito-ilíticas ou em camadas mistas com matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Esses materiais comumente são encontrados em margens de rios, lagos ou de várzeas, contendo um apreciável teor de matéria orgânica, fator responsável pela alta plasticidade das argilas. O material geralmente, para obter uma boa cozedura, precisa ser queimado entre 900 °C e 1 000 °C.

As argilas usadas para a fabricação de tijolos devem ter uma fácil modelagem e ter uma média ou alta resistência à tensão de ruptura à flexão. A sua temperatura usual de queima pode ser de aproximadamente 950 °C, precisando apresentar o mínimo de trincas e empenamentos. Na visão de Santos (1989), um alto teor de

ferro divalente, elementos alcalinos¹ e alcalinos-terrosos² nas argilas, é prejudicial à fabricação de tijolos cerâmicos, pois provocam uma excessiva retração e podem causar colorações indesejadas no produto. Esses tipos de argila para cerâmica vermelha são as mais avaliadas tecnologicamente no Brasil, provavelmente devido à expansão da construção civil no país, embora existam poucos estudos sobre sua composição mineralógica. As argilas usadas na cerâmica vermelha, basicamente são formadas por argilas recentes (quaternárias) e algumas terciárias. A composição mineralógica dessas argilas é uma mistura de caulinita com illita ou montmorilonita, além de um teor de ferro na forma de hidróxidos férricos. Isso só vem a confirmar a enorme variação que a argila apresenta, dependendo da região em que se localiza. A inconstância da argila é uma realidade, que necessariamente sugere a todas as empresas cerâmicas realizarem uma análise química, toda vez que forem utilizar uma argila de lugar diferente (jazida nova), na produção de seus cerâmicos.

3.3 Água

O Brasil, desde o período colonial, sempre foi um dos principais exportadores de pedras (diamantes e gemas de cor). Neste meio, o Rio Grande do Sul e Minas Gerais possuem o maior número de empresas que comercializam e beneficiam o material gemológico, segundo Heemann (2005). Na mesma linha, o autor prossegue afirmando, de que o Rio Grande do Sul têm os maiores depósitos mundiais de geodos de água e ametista. O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional dessas gemas e exporta quase sua totalidade produzida. A água e a ametista correspondem a 25% do total das exportações brasileiras.

¹ Metais alcalinos: as propriedades físicas e químicas desses elementos estão intimamente relacionadas com sua estrutura eletrônica e seu tamanho. São metais, excelentes condutores de eletricidade, moles e altamente reativos. Possuem na camada mais externa um elétron fracamente ligado ao núcleo e geralmente formam compostos monovalentes, iônicos e incolores. Pertencem ao grupo dos metais alcalinos os seguintes elementos químicos: lítio (Li), sódio (Na), potássio (K), rubídio (Rb), célio (Cs) e frâncio (Fr) (SHRIVER e ATKINS, 2003).

² Metais alcalinos terrosos: estes elementos apresentam as mesmas tendências nas propriedades que os metais alcalinos, com exceção do berílio (Be) que tem propriedades bem diferenciadas dos demais. Geralmente apresentam-se na forma divalente, são um pouco menos reativos que os metais alcalinos. São metais alcalinos terrosos os seguintes elementos: berílio (Be), magnésio (Mg), cálcio (Ca), estrôncio (Sr), bário (Ba) e o rádio (Ra) (SHRIVER e ATKINS, 2003).

Pelo fato de formarem os maiores depósitos mundiais, a ágata e a ametista são pedras conhecidas pelo mundo todo. No entanto, de acordo com Heemann (2005), a inexistência de estudos adequados incorre ao mau aproveitamento das reservas, reduzindo sua produtividade e gerando impactos e passivos ambientais. Devido a este aspecto, há a necessidade de utilizar uma nova metodologia para otimizar as reservas ainda existentes, uma vez que alguns estudos de viabilidade econômica apresentam uma enorme valorização da industrialização das gemas no Rio Grande do Sul. O mercado de exportação desse setor, que está em plena expansão, é outro fator a ser ressaltado.

No Rio Grande do Sul, na região central do Estado, onde se localiza o município de Salto do Jacuí, existe o maior depósito brasileiro de ágata, abrangendo uma área estimada em 250 km², pois, esta região é formada por derrames basálticos e dacíticos, fazendo parte da Formação Serra Geral. As jazidas são do tipo geodo em basalto, ocorrendo em duas unidades vulcânicas principais: dacito semi-vítreo inferior e basalto vesículo-amigdaloidal mineralizado. Por causa de suas características geológico-estruturais, os geodos de ágata desta região, foram denominados do Tipo Salto do Jacuí (HEEMANN, 2005).

A exploração de ágata na região de Salto do Jacuí, iniciou entre 1820 e 1830, com a chegada dos imigrantes europeus ao Rio Grande do Sul, principalmente alemães e italianos. De acordo com Agostini *et al.* (1998), os imigrantes alemães não eram jovens aventureiros que acharam ágata por acaso, mas sim homens de meia idade que vieram ao Brasil com o intuito específico de encontrar geodos de ágata, pois tinham conhecimento e fortes suposições sobre reservas dessas gemas no sul do Brasil.

Em Lajeado e Soledade também ocorreram registros históricos de extração de ágata, porém, essas jazidas hoje em dia estão praticamente esgotadas. No período entre 1950 e 1970, a atividade de extração das gemas ainda era artesanal, usando-se pás e picaretas. Entretanto, de 1975 em diante, a extração das pedras preciosas começou a ser facilitada com a ajuda de maquinário pesado, como tratores esteiras e retroescavadeiras. Na época da extração artesanal, as ágatas eram achadas em áreas baixas, por causa da erosão mecânica do basalto

mineralizado, constituindo-se solos residuais. Hoje, com o uso de equipamentos mais sofisticados, a extração é realizada por lavra a céu aberto e subterrânea.

Agostini *et al.* (1998), relatam que o tipo de ágata mais frequente no Brasil é um tipo que forma grandes geodos de coloração cinza, sem atrativos naturais. Esta ágata recebeu o nome de “umbu”, pois foi encontrada em grande quantidade na antiga Fazenda Umbu, localizada no Salto do Jacuí. Esta região, segundo descreve Heermann (2005), é o único lugar do mundo, onde se encontra a ágata do tipo Umbu, constituída de calcedônia. A ágata do tipo Umbu ostenta uma cor azul escuro homogênea, sendo uma pedra adequada para o tingimento e de grande valor no mercado.

Na concepção de Heermann (2005), os geodos são formados por calcedônia, quartzo incolor e algumas vezes por calcita e ametista. O quartzo é a forma cristalina da sílica (SiO_2). Conforme Campos *et al.* (2007), o quartzo normalmente é transparente, dificilmente se decompõe e é o mineral mais duro das rochas. No quartzo se encontram sílica amorfa e criptocristalina (calcedônia).

A calcedônia é um tipo de microcristalina de quartzo, correspondendo a um agregado de quartzo micro a criptocristalino, granular ou fibroso, com enorme quantidade de microporos. O material é translúcido, de cor amarelada e cinzenta e com brilho resinoso, normalmente possuindo água infiltrada em seus microporos. Heermann (2005) descreve a ágata como um tipo de calcedônia, tendo como características, camadas milimétricas com diferentes cores. Na mesma linha, Agostini *et al.* (1998) afirmam que a ágata é uma variedade de calcedônia e ressalta, entre as diferentes variações da calcedônia, a ágata é a mais importante, devido a suas características camadas com diferentes cores e espessuras, além de sua transparência, textura e porosidade. Como a ágata é um material poroso, facilmente aceita o tingimento com processos químicos e térmicos, provocando modificações em suas cores originais.

A industrialização da ágata no Brasil teve seu maior crescimento registrado a partir da década de 70, porque até aquele momento, as pedras eram exportadas de maneira bruta. Nos anos 80, quantitativamente, a lapidação da ágata evoluiu consideravelmente, entretanto, qualitativamente, a lapidação continua deficitária, ou

seja, os processos utilizados no trabalho com a ágata se resumem basicamente ao corte, lixamento e polimento de superfícies planas. Os produtos comercializados ressentem a falta do emprego de melhores tecnologias em sua manufatura para lhes proporcionar um maior valor agregado (AGOSTINI *et al.*, 1998).

A ágata produzida no Rio Grande do Sul, conforme Agostini *et al.* (1998), é comercializada para dois fins específicos: ornamental e indústria cerâmica. Na indústria cerâmica, a ágata é utilizada como corpos moedores nos moinhos para a cominuição da argila, na produção de cerâmica branca. Para fins ornamentais, parte da ágata é exportada de forma bruta e parte é beneficiada para posteriormente ser exportada. A ágata ornamental serve para produzir objetos de arte, de adorno pessoal e de ambientes e de objetos para utilidade doméstica. Esta região é o único lugar do mundo, onde se encontra a ágata do tipo Umbu, constituída de calcedônia. A ágata do tipo Umbu ostenta uma cor azul escuro homogênea, sendo uma pedra adequada para o tingimento e com muito valor no mercado.

No Brasil, a indústria da ágata se concentra em três municípios do Rio Grande do Sul: Salto do Jacuí, Soledade e Lajeado. Também há diversos outros municípios que possuem indústrias de ágata, mas, conforme Agostini *et al.* (1998), os três municípios são os principais centros. Lajeado, que engloba os municípios de Estrela e Teutônia, foi onde iniciou a industrialização de pedras preciosas. Até 1973, basicamente toda lapidação de ágata era realizada em Lajeado, no entanto, a partir desse momento, as empresas começaram a se deslocar para a região de Soledade. Soledade, hoje é considerada o grande pólo das indústrias de pedras do Rio Grande do Sul e segundo levantamento feito pela prefeitura em 1993, havia 117 empresas envolvidas na manufatura de pedras preciosas.

Em se tratando de aspectos ambientais, as indústrias do Rio Grande do Sul, de acordo com Agostini *et al.* (1998), deixam a desejar. Dentro do processo produtivo, mais precisamente na operação de corte das gemas, a lâmina abre um sulco de alguns milímetros de espessura. O material desse sulco mistura-se com o óleo de refrigeração da lâmina. Periodicamente, retira-se este material, deixando-o decantar para reaproveitar o óleo sobrenadante. O lodo remanescente, geralmente é destinado como abrasivo na operação de polimento, ou é destinado para aterros de resíduos industriais.

Além do lodo gerado no corte, há perdas de matéria-prima no processo de beneficiamento das gemas, como retalhos que sobram após os cortes, que dificilmente são aproveitados. A maior parte do desperdício acontece nas pequenas oficinas informais, principalmente por falta de conhecimento ou falta de espaço, desprezando a sobra do material que, na maioria das vezes é destinado em áreas pelas prefeituras para depósitos de lixos. Em um panorama otimista, 65% do total da ágata bruta é transformada em produto final comerciável. Numa abordagem parecida, Menezes *et al.* (2002), afirmam existir uma crescente preocupação com este tipo de resíduo, baseado nos altos índices de crescimento no setor mineral, principalmente quando se refere às rochas ornamentais. Esse fato, somado ao grande desperdício do setor, que pode atingir a 50% em massa do total produzido, contribui para um cenário de alerta aos ambientalistas e a sociedade em geral.

3.4 Desenvolvimento sustentável

Diante de um quadro problemático, surge o conceito de desenvolvimento sustentável. Desde a década de 80, na visão de Amaral (2005), o assunto está sendo estudado e difundido pelo mundo. O conceito engloba políticas públicas, ações governamentais e não-governamentais até metas de desenvolvimento para setores agrícolas, industrial, comercial e de serviços.

A nossa vida e a das futuras gerações dependem do bom funcionamento a longo prazo, de um complexo sistema de que chamamos de natureza. Assim sendo, o homem não deveria interferir nos ciclos naturais, em que se baseia seu sustento, para não prejudicar o seu capital natural, que será repassado aos seus descendentes. Manzini e Vezzoli (2005) defendem que o princípio de equidade afirma que cada pessoa tem direito ao mesmo espaço ambiental e a mesma quantidade de recurso natural disponível na terra.

Até a Revolução Industrial, mesmo com a interferência do homem, segundo Goldemberg e Lucon (2008), a vida no planeta Terra conseguia manter um certo equilíbrio natural. Porém, após a Revolução Industrial, a superpopulação e a exploração predatória de recursos naturais não-renováveis, principalmente os países

industrializados, foram os principais fatores que contribuíram para a situação delicada em que se encontra o clima do planeta. O desenvolvimento sustentável não é um exemplo a ser seguido, mas precisa ser um objetivo a ser alcançado.

Quer dizer que, nem tudo aquilo que demonstrar alguma melhoria ambiental, será compreendido como desenvolvimento sustentável. Para ser realmente considerado desenvolvimento sustentável, de acordo com Manzini e Vezzoli (2005), deverá seguir alguns pré-requisitos. O alicerce de uma ação sustentável é a utilização de recursos renováveis, otimizar o uso dos recursos não-renováveis, não depositar lixo que o ecossistema não consiga decompor e fazer com que cada indivíduo, da sociedade “rica”, fique em seu espaço ambiental, para que o indivíduo, da sociedade “pobre”, possa usufruir do espaço ambiental ao qual tem direito.

Considerando os requisitos mencionados anteriormente, pode-se perceber como a sociedade industrial contemporânea está distante do objetivo do desenvolvimento sustentável, isso através do uso incorreto de recursos renováveis, como por exemplo, a pesca indiscriminada e o pequeno aproveitamento da energia solar. Além disso, há a abundante exploração de recursos não-renováveis e o acúmulo de lixo e emissões no ambiente de materiais e substâncias, os quais a natureza não é capaz de “renaturalizar”. E, sem deixar de mencionar, a crescente disparidade no uso de recursos disponíveis entre os países ricos e os países pobres.

Considerando esse quadro atual, é necessário encontrar esforços para aproximar-se da sustentabilidade, elaborar novos planos que dependam da intervenção de cada setor da sociedade. Entretanto, para poder avaliar o desempenho dos esforços atribuídos, requer-se informações quantitativas que possam medir a redução necessária no consumo dos recursos ambientais e que posteriormente seja passível de avaliação. Para tanto, Amaral (2005) considera como alguns indicadores gerais de desenvolvimento sustentável, os indicadores ambientais, econômicos e sociais. Ele conceitua que, um indicador de sustentabilidade mede a distância entre o impacto ambiental e aquilo que o meio pode absorver. Além dos indicadores gerais, existem os mais diferentes indicadores, onde se pode citar de exemplo os indicadores relacionados à energia: esgotamento de combustíveis fósseis, o consumo de energia primária e secundária e o uso de energia no transporte rodoviário; e os indicadores sobre as mudanças climáticas:

mudança da temperatura global, aquecimento da atmosfera, emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e emissões de dióxido de carbono (CO₂) de termelétricas.

Os autores afirmam que, para uma empresa poder avaliar seu desempenho em relação aos conceitos de sustentabilidade, os indicadores devem considerar a intensidade no uso dos materiais, a intensidade no uso da energia, o consumo de recursos e o descarte de seus resíduos. Neste contexto, surge o conceito de ecoeficiência, abordado por Amaral (2005), que tenta fazer uma relação da melhoria no desempenho ambiental e econômico das empresas, ou seja, a ecoeficiência objetiva utilizar adequadamente os recursos materiais e energéticos, buscando reduzir os custos e maximizar lucros. Na mesma linha, Lenzi (2006), afirma que um desenvolvimento sustentável busca promover uma integração dos interesses econômicos com as exigências ambientais. No Brasil, as empresas também aderiram a este conceito, pois, com a implantação de uma boa gestão ambiental, se consegue adicionar valor ao negócio e proporcionar maior atratividade ao empresário. Nas empresas, os indicadores de ecoeficiência mais usados são: consumo de água, energia, matéria-prima e resíduos gerados.

Para contribuir no enriquecimento dessa contextualização, sobre um desenvolvimento sustentável, cita-se Dupas (2008), que prega uma profunda mudança no modelo produtivo dominante e nos seus modos de fabricação. Sugere que, ao invés de uma economia linear, que ao mesmo tempo desperdiça recursos e acumula dejetos, deveria se adotar uma economia circular, que procurasse correlacionar os ecossistemas industriais em um funcionamento equilibrado, assemelhando-se em relação aos ecossistemas naturais.

Essa mudança nos processos produtivos resultaria em uma redução no uso de recursos materiais e energéticos e substituiria a concepção de fabricar produtos novos com bens descartáveis. Na visão de Dupas (2008), a estratégia industrial mudaria seu foco para redução, recuperação, reutilização, reparação, refabricação e reciclagem da produção. O objetivo principal dessa profunda mudança no sistema produtivo industrial é transformar os resíduos em recursos em novas matérias-primas para a fabricação de outros produtos. Tentar mudar a relação do processo de fabricação com o seu ambiente, interligando as indústrias em rede, onde o resíduo

de uma seria a matéria-prima de outra. Vale ressaltar que, no momento atual, o modelo econômico está longe disso, entretanto, a construção de um sistema de ciclo fechado, autossustentável, é o objetivo que se deseja alcançar.

3.5 Resíduos utilizados para incorporação na massa cerâmica

A indústria de cerâmica vermelha está adotando um papel fundamental como receptor de resíduos sólidos, visando um destino mais adequado para esses materiais. Existem inúmeras pesquisas desenvolvidas sobre esse assunto no Brasil, como pode ser constatado a seguir.

Vieira e Monteiro (2006) estudaram a possibilidade de incorporar um resíduo oleoso proveniente do setor petrolífero a massa cerâmica. Esse resíduo era constituído por uma borra pastosa retirada do processo de separação de água e óleo realizado na plataforma marítima depois da extração do petróleo. Para avaliação do resíduo foram elaboradas cinco composições nos corpos de prova contendo 0, 1, 3, 5 e 10% de resíduo em peso. No estudo com os corpos de prova foi verificada a densidade aparente, absorção de água, retração linear, tensão de ruptura à flexão e micrografia eletrônica de varredura na superfície dos materiais. Para tanto, obtiveram nesta pesquisa, um melhor desempenho técnico da cerâmica, com aumento na densidade aparente, redução na absorção de água e um aumento na resistência mecânica.

Vieira *et al.* (2007) pesquisaram a adição de lama fina de aciaria, ou seja, lama oriunda de um sistema de despoeiramento dos exaustores de uma indústria siderúrgica integrada. Prepararam corpos de prova com 0, 5, 10 e 20% de resíduo em peso. Fizeram análise da composição química dos materiais, além de usarem a micrografia eletrônica de varredura e o teste de tensão de ruptura à flexão. Como principal ponto positivo, concluíram que a lama fina de aciaria contribui significativamente para enaltecer a coloração avermelhada nos materiais cerâmicos.

No trabalho de Souza *et al.* (2008), foram avaliados os gases poluentes provenientes da queima da massa cerâmica com incorporação de escória de aciaria. Foi utilizada como metodologia, uma técnica fototérmica para medir as

concentrações dos gases, ou seja, um sistema que quantifica e detecta os gases, consistindo em um analisador de gases por infravermelho ligado ao forno. Desta forma detectou-se a presença elevada de CO₂ e de CO. De acordo com este estudo, indica-se limitar a queima em até 550 °C em caso de altas concentrações de lama de aciaria, sendo assim, no caso da cerâmica vermelha seria melhor incorporar percentuais inferiores a 10% de resíduo.

No estudo de Menezes *et al.* (2002) foi pesquisado o uso de rejeitos de granito na massa cerâmica. O resíduo utilizado foi serragem do granito proveniente das fábricas de beneficiamento destes materiais. Elaboraram corpos de prova com 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60% de resíduos em peso na massa argilosa. Concluíram que o resíduo do granito possui propriedades semelhantes às matérias-primas normalmente utilizadas na indústria da cerâmica vermelha. Além disso, o aumento da porcentagem de resíduo na massa cerâmica provoca um aumento da absorção de água e uma redução na resistência à compressão. Os corpos de prova com até 50% de resíduo incorporado, apresentaram especificações dentro das normas pertinentes ao setor.

Silva *et al.* (2005) também realizaram um estudo com a adição de lama de mármore e granito na massa cerâmica. Esta lama foi o rejeito que sobra do beneficiamento de mármore e granitos. Em suas conclusões, relataram que é possível incorporar doses elevadas de resíduos de granitos e mármore na massa argilosa sendo que as propriedades especificadas nos corpos de prova ficaram dentro dos limites exigidos pelas normas da cerâmica vermelha.

Em contrapartida, Vieira, Margem e Monteiro (2008) realizaram uma pesquisa utilizando lodo de estação de tratamento de água para incorporar na massa cerâmica e avaliar as alterações das microestruturas dos corpos de prova, onde concluíram que somente é possível adicionar pequenas doses. Isso porque, o lodo proveniente da limpeza das unidades de filtração da estação de tratamento de água, contém um elevado percentual de material orgânico. E esse material orgânico é eliminado durante a fase da queima, aumentando consideravelmente os defeitos microestruturais dos produtos cerâmicos.

Em outro estudo, os autores Vieira *et al.* (2006) buscaram avaliar a substituição da areia presente na argila por um resíduo gerado no corte das lajes de uma variedade da pedra miracema. Esse resíduo foi usado em forma de lama, retirado dos tanques de decantação do tratamento feito por uma serraria. O resíduo é a gnaïsse, uma rocha composta predominantemente por quartzo, feldspatos e mica. Após a realização dos testes concluíram que o uso de gnaïsse fina não modifica a trabalhabilidade da massa cerâmica. Como ponto positivo, a gnaïsse possui uma granulometria mais fina que a areia, fazendo com que o nível de resistência mecânica dos tijolos aumente. É o poder fundente deste resíduo que proporciona o aumento da resistência mecânica e da retração linear e diminui a absorção de água.

O resíduo gerado pela produção de papel foi avaliado por Pinheiro *et al.* (2008), onde tentaram adicionar até 10% de resíduo em peso. Também na forma de lodo, o resíduo incorporado foi oriundo do decantador primário de uma indústria de papel reciclado. Os autores recomendaram o uso de até 3% de lodo de papel na massa argilosa, pois à medida que se incorpora o resíduo, a tendência é de um aumento na porosidade, provocando conseqüentemente aumento na absorção de água e uma diminuição de resistência mecânica. O aumento da porosidade é em função da combustão da celulose presente em grande quantidade no resíduo avaliado.

Por outro lado, segundo Borlini *et al.* (2005), o uso de cinza tende a diminuir a porosidade nos produtos cerâmicos. No trabalho estudaram a incorporação de cinza, gerada basicamente pela queima da lenha de eucalipto em indústrias cerâmicas, na massa argilosa. A utilização da cinza na massa cerâmica pode contribuir para a diminuição da porosidade por meio da formação de fase líquida durante a queima.

Com esses exemplos, pode se perceber a crescente preocupação com os resíduos industriais gerados e seu respectivo destino. Isso vem a fortalecer a importância do presente trabalho com o objetivo de buscar um aproveitamento adequado do resíduo (lodo).

4 MÉTODOS

4.1 Amostras

Neste trabalho, para a realização da pesquisa, foram coletados dois materiais: a argila e o lodo proveniente da serra. A argila usada na pesquisa foi fornecida pela empresa Cerâmica Bruxel Ltda de Arroio do Meio – RS. A argila escolhida para realizar a pesquisa foi a mesma que a empresa cerâmica utiliza para fabricar os tijolos, extraída em uma jazida pertencente à empresa, devidamente licenciada pelo órgão ambiental responsável (FEPAM-RS) e está localizada na localidade de Passo do Corvo, em Arroio do Meio, a uma distância aproximada de 3,5 km da empresa. Esse material argiloso foi escavado e carregado por uma retroescavadeira da marca Case 580L (1999) e transportado até a fábrica por um caminhão caçamba basculante Ford 11000 (1981). Foi extraído e transportado cerca de 6 m³ de argila, destinada a esta pesquisa.

Já o lodo a ser incorporado na massa cerâmica, é proveniente da empresa Caye Pedras Brasil de Teutônia – RS. Esse lodo estava acondicionado em tambores poliméricos de 100 litros, devidamente fechados para evitar derramamento e alocados no pátio da empresa. Para o transporte desse material, foi usado o caminhão carroceria MB1721 (1997), da empresa Cerâmica Bruxel Ltda, que buscou os tambores na empresa geradora do resíduo e os levou até a olaria, onde foram confeccionados os corpos de prova. O caminhão chegou à olaria com os tambores de lodo, onde os mesmos foram descarregados por uma empilhadeira Mitsubischi de capacidade para 2,5 toneladas (2002) e acondicionados no pátio da empresa

cerâmica. Foram transportados e descarregados para serem utilizados na fabricação dos corpos de prova, seis tambores do tamanho de 100 litros cada.

O lodo é constituído por pequenas partículas de pó de coloração acinzentada, sendo, basicamente, composto por ágata (95%) e o resto formado por ametistas, jaspes e quartzo. No lodo, também há óleo diesel marítimo, usado para lubrificar a serra de corte. As gemas são oriundas de jazidas localizadas no município de Salto do Jacuí e Ametista do Sul, no Rio Grande do Sul e no município de Artigas, Uruguai.

4.2 Preparo das amostras para os testes químicos

Após a coleta da argila e do lodo de serra, foram preparadas as amostras dos dois materiais. A amostra da argila foi retirada dos 6 m³ extraídos e transportados até a empresa. Dos cerca de 6 m³ de argila, foram retirados 20 kg para a preparação da amostra. Esses 20 kg de argila foram secos em temperatura ambiente até que fosse possível realizar o peneiramento. Foi utilizada uma peneira com 12 mesh (1,68 mm) para diminuir o tamanho das partículas de argila, para reduzi-las e deixá-las mais homogêneas. Pois a argila em sua forma natural é úmida e possui uma granulometria maior e desproporcional, dificultando a análise química. Esse processo de peneiramento foi efetuado de acordo com a norma da ABNT, a NBR – 7181 (1984), que regulamenta o processo. Do lodo de serra que estava acondicionado em tambores, foram retirados 2 kg para a preparação da amostra. Esse material também foi seco em temperatura ambiente. O lodo após a secagem se transformou em um pó constituído por finas partículas de gemas, não sendo necessário utilizar o processo de peneiramento para sua homogeneização.

A Figura 1 mostra a balança utilizada para a pesagem das amostras na Cerâmica Bruxel.



Figura 1 – Balança utilizada para o preparo das amostras na Cerâmica Bruxel

4.3 Análise química das amostras de argila e lodo de serra

O próximo passo foi realizar uma análise química da argila e do lodo de serra, para avaliar as suas respectivas composições. Foi enviada uma amostra de 100 g de lodo de serra em pó e uma amostra de 100 g de argila seca para o Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do Centro de Tecnologia de Materiais do SENAI de Criciúma em Santa Catarina. No laboratório foi realizada a Determinação da Análise Química por Espectrometria de Fluorescência de Raios X e Espectrometria de Absorção Atômica. A Espectrometria de Fluorescência de Raios X foi usada para determinar os óxidos presentes na argila e no lodo de serra. Espectrometria de Absorção Atômica foi realizada para a análise de Vanádio nas amostras. Os percentuais dos óxidos foram avaliados em base calcinada a 1000°C. Estas análises foram realizadas no período correspondente a dez de setembro de 2010 até cinco de outubro de 2010.

4.4 Corpos de provas

Foram produzidas cinco composições diferentes, misturando a argila cerâmica com o lodo de serra de gemas. Baseado em um estudo de Vieira e Monteiro (2006), foi realizada a produção de corpos de prova, sendo uma composição de massa cerâmica (argila) 100% pura e as demais composições de argila com 5% (m/m), 9% (m/m), de 13% (m/m) e 17% (m/m) de lodo de serra adicionada.

O primeiro passo foi determinar de que maneira seria feita esta mistura para que a adição dos diferentes percentuais fossem os mais exatos possíveis. Então se definiu como medida a massa e volume. Para medir a quantidade de argila usou-se uma balde e para a quantidade de resíduo a ser adicionado foi usada uma jarra. No balde foi colocado 20 kg de argila e na jarra 1 kg de lodo de serra. Para que não fosse necessário pesar toda vez que se enchesse um balde e/ou a jarra, pesou-se somente da primeira vez e foi usado um ponto de referência no balde e na jarra para que se pudesse utilizar sempre a mesma quantia, tanto em massa, como em volume. Isso pode ser visualizado na Figura 2.

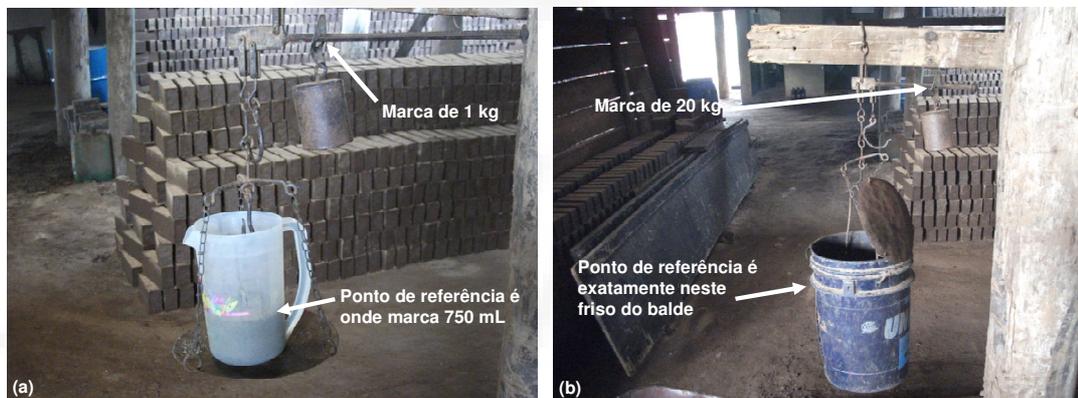


Figura 2 - Recipientes usados para as medidas de argila e lodo de serra. (a) jarra; (b) balde

Depois de definidas as medidas, foi a vez de fazer a mistura da argila com os diferentes percentuais de resíduo. Para uma melhor homogeneização dos materiais, foi usado um misturador com capacidade para 120 litros no tambor (betoneira). Para facilitar sua mistura com a argila e assim conseguir uma massa mais homogênea, o lodo de serra foi incorporado seco. Veja na Figura 3.



Figura 3 - Lodo de serra sendo incorporado à massa cerâmica

Após os materiais serem misturados, a composição formada foi transportada por um carrinho-de-mão até a esteira transportadora, e levada até a maromba para ser extrusada. A partir do ponto da mistura, a produção destes corpos-de-prova, foi realizada em escala industrial. Assim, os corpos-de-prova produzidos foram tijolos maciços com as seguintes medidas: 10,5 cm x 5,5 cm x 22,5 cm (largura x altura x comprimento). A maromba utilizada na fabricação destes corpos-de-prova é da marca Varle, nº 2. Antes de ser usada para este experimento, ela foi totalmente aberta e limpa em seu interior (câmara de extrusão). Para o corte dos tijolos produzidos, foi usado um cortador pneumático, também da marca Varle, com capacidade de corte de seis peças. Com o objetivo de evitar alguma margem de erro nas composições que pudessem distorcer os resultados das futuras análises, toda vez que uma nova mistura era jogada na maromba, a primeira parte da massa que era extrusada, foi descartada. Um pedaço de massa equivalente a dois cortes ou doze tijolos. A Figura 4 mostra a maromba e o cortador dos tijolos.



Figura 4 - Maromba e cortador de tijolos

Na produção dos tijolos maciços com a utilização de matéria-prima normal, ou seja, com 0% de lodo de serra incorporado, foram fabricados 108 tijolos. Com a

adição de 5% de lodo de serra à massa cerâmica, também foram produzidos 108 tijolos maciços. Nesta composição, foram usados 25 baldes (20 kg/balde) de argila e 25 jarras contendo resíduo até a marca “referência” para 1 kg, ou seja, para 500 kg de argila foram misturados 25 kg de lodo de serra.

Nos tijolos maciços produzidos com 9% de resíduo incorporado, foram misturados 30 baldes (20 kg/balde) com 30 jarras contendo lodo de serra até o ponto que marca 1500 mL. Em outras palavras, foram misturados 600 kg de argila e 60 kg de lodo de serra. Com 9% de lodo adicionado foram produzidos 108 tijolos maciços. O lodo de serra sempre foi adicionado no balde com argila, para depois ser levado ao misturador, como se vê na Figura 5.



Figura 5 - Adição de lodo de serra à massa cerâmica

Para compor a massa cerâmica com a adição de 13% de resíduo, foram preparados 30 baldes e 22,5 jarras de lodo de serra. Isso equivale a 600 kg de argila e 90 kg de lodo de serra, sendo confeccionados 111 tijolos maciços. Na fabricação dos corpos de prova com 17% de pó de serra, foram utilizados 30 baldes de argila e 60 jarras de pó. Neste caso, misturaram-se 600 kg de material cerâmico e 120 kg de resíduo, sendo produzidos 115 tijolos maciços.

Totalizando, foram produzidos 550 tijolos maciços com suas diferentes composições em percentuais de lodo de serra incorporados. Após sua produção, os tijolos maciços ficaram “descansando” por cerca de 48 horas antes de serem levados ao secador. Esse “descanso” é recomendado para que a massa dos tijolos perca suas tensões, ou seja, depois de extrusado, a argila sofre o processo de compactação e com isso há a tendência natural de ter muitas tensões em seu interior. De acordo com Van Vlack (1984), antes da queima, dentro do material

cerâmico, as partículas ainda estão separadas entre si, possuindo maior porosidade. Pois, no processo de secagem, com o impacto do calor e umidade, a argila compactada começa a sofrer outro processo químico, a perda de água. Se isso acontecer tudo muito rápido, a chance de haver trincas é maior.

O processo de secagem dos tijolos maciços produzidos com a adição de lodo de serra foi realizado em um secador de “gateiras”. O secador de “gateiras” não possui equipamentos autoviajantes (ventiladores) em seu interior. O calor, oriundo do forno, é soprado por exaustores para um canal que fica no interior do secador. Esse canal, por sua vez, é cheio de fendas verticais por onde o calor viaja até atingir os tijolos. O secador possui 80 metros de comprimento, por onde os tijolos passam enfrentando um calor que varia de forma crescente entre 30°C a 100°C e uma umidade que varia de forma decrescente entre 65% a 3%. Esse processo leva em torno de 48 a 60 horas (Figura 6).



Figura 6 - Visão da entrada do secador e as fendas por onde o calor sai para secar os tijolos (a) entrada do secador; (b) “gateiras”

Depois da secagem dos corpos de prova, os mesmos foram encaminhados para o processo de queima. Para o processo de queima do material elaborado, foi usado um forno túnel de 80 metros de comprimento. O forno túnel é dividido em três partes: zona de aquecimento, zona de queima e zona de resfriamento. Os tijolos maciços foram queimados em uma temperatura que se eleva gradativamente da temperatura ambiente até atingir o ponto máximo no meio das fornalhas (zona de queima) que varia entre 800°C e 860°C. Após transpor a zona de queima, os tijolos passam pela zona de resfriamento, local onde o calor é retirado pelos exaustores e enviado para ser aproveitado no secador e resfriando os tijolos, que saem do forno em condições de serem carregados (Figura 7). O processo de queima, assim como o processo de secagem, também leva de 48 a 60 horas.



Figura 7 - Entrada dos produtos no forno (a); saída dos produtos queimados do forno (b)

Em todo o processo de produção dos corpos-de-prova, desde sua fabricação até a sua queima, cada tijolo foi devidamente numerado para que se possa identificá-los e analisá-los corretamente.

4.5 Análise dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos entre os dias 04 e 11 de maio de 2010. Após os tijolos estarem prontos e devidamente identificados, iniciou-se a análise dos mesmos para avaliar o uso do lodo de serra na massa cerâmica. Como parâmetro de avaliação, as análises físicas realizadas foram aquelas que são exigidas pelo Inmetro para os tijolos maciços e outras análises comumente utilizadas em pesquisas com cerâmica vermelha. Podendo ser citado como exemplo autores como Vieira *et al.* (2007), Silva *et al.* (2005) e Menezes, Neves e Ferreira (2002). As análises realizadas foram: retração linear, absorção de umidade, resistência à compressão, densidade, homogeneidade.

4.5.1 Retração linear

A análise da retração dos corpos de prova foi efetuada utilizando um paquímetro da marca Tramontina. Os tijolos maciços foram medidos em três etapas. A primeira medida aconteceu logo que os tijolos saíram da extrusora e foram cortados. A segunda medição ocorreu após a secagem dos tijolos e a terceira foi feita depois deles queimados. Para avaliar a retração desse material, mediu-se o comprimento e a altura dos tijolos maciços.

Do total dos 550 tijolos fabricados, foram aleatoriamente retirados 75 tijolos para serem avaliados, e destes, 15 tijolos de cada composição foram analisados. Esses tijolos foram devidamente separados e identificados para que, fosse possível realizar a medição do mesmo tijolo em cada uma das três etapas, evitando erros e distorções nos resultados. Além disso, em cada um desses tijolos, na primeira etapa de medição, foi marcado o ponto exato de medição do paquímetro, para possibilitar que a medição ocorresse no mesmo ponto nas etapas posteriores, como aparece na Figura 8.

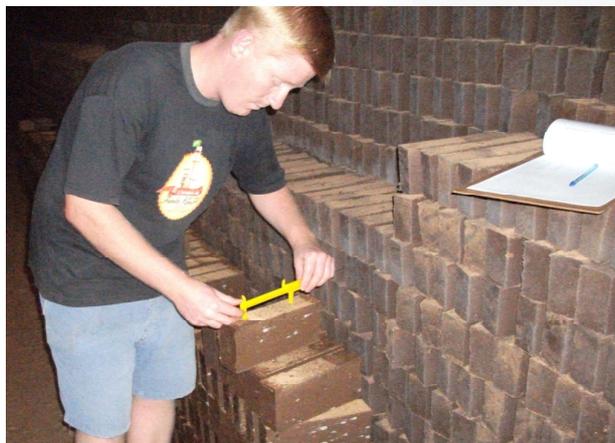


Figura 8 - Processo de medição dos corpos de prova

Os 75 tijolos analisados passaram pelo mesmo processo de secagem e de queima, ou seja, foram secos e queimados na mesma temperatura, no mesmo local e na mesma data. Tendo finalizado todas as medições, os dados foram compilados em uma planilha, onde se obteve a média de retração de cada composição. Realizou-se a medição em três etapas, para se poder avaliar o percentual de retração em cada etapa, do tijolo úmido ao tijolo seco e do tijolo seco ao tijolo queimado.

Para facilitar a avaliação dos números obtidos na análise de retração, calculou-se a média de retração dos tijolos em cada composição e as convertemos em percentuais para uma melhor compreensão dos resultados finais.

4.5.2 Absorção de água

O teste de absorção de água foi realizado utilizando balança de precisão marca Bel Engeneering e estufa marca Biopar. Para efetuar os procedimentos desta análise, foi usado como base a NBR 15270-3 (2005).

Aleatoriamente pegou-se quatro tijolos maciços de cada composição produzida para serem usados na avaliação de absorção de água. Primeiramente, os corpos de prova foram postos na estufa a uma temperatura de 110°C por um período de uma hora. Depois de retirados da estufa, e frios, cada um dos tijolos foi pesado. Em seguida, usando um recipiente com água e em temperatura ambiente, as peças foram completamente imersas, por 24 horas. Passado esse período, os tijolos foram retirados da água e com um pano seco retirou-se o excesso de água do material cerâmico. Usando uma balança de precisão, no laboratório do Centro Tecnológico de Gemas e Joias, pesaram-se os tijolos novamente. Esse procedimento foi repetido com todos os corpos de prova, identificados e separados de acordo com suas composições.

Para avaliar os dados levantados nesta análise, construiu-se uma planilha com os pesos em gramas de cada tijolo seco e molhado. A determinação do índice de absorção de água (AA) de cada corpo de prova foi determinada pela seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde M_u é massa úmida e M_s é massa seca de cada corpo de prova, representados em gramas.

Como parâmetro de avaliação, foi utilizada a NBR 15270-1 (2005), onde o índice de determinação de absorção de água é estipulado em valores percentuais que podem variar entre o mínimo de 8% e o máximo de 22%.

4.5.3 Resistência à compressão

Os testes da resistência à compressão foram realizados no laboratório da LATEC (Laboratório de Tecnologia de Construção), na UNIVATES. Para estes testes, foi utilizada a prensa da marca Solotest, com curso máximo de 30 mm, com indicador digital e bomba de marca Emerson, modelo B e com 10000 psi de capacidade máxima. Para este teste, foi seguida a NBR 6460 (1983), que normatiza a verificação da resistência à compressão do tijolo maciço cerâmico para alvenaria. E como normas complementares, sustentou-se nas NBR 7170 (1983) e na NBR 8041 (1983).

A NBR 7170 determina o uso de uma amostra de 8 tijolos para um lote de 1000 a 3000 tijolos, porém, não prevê o número de amostra para lotes menores de 1000 tijolos. Como foram produzidos 550 tijolos para esta pesquisa, estimou-se utilizar 5 tijolos maciços, de cada composição, para serem testados.

Seguindo as normas citadas acima, cada tijolo foi cortado ao meio pela sua maior dimensão e depois cada metade, usando sua face maior, foi sobreposta uma na outra, ligando-as com uma camada de cerca de 2 a 3 mm de argamassa. Utilizando como base de apoio uma tábua plana, o bloco formado pelas duas metades do tijolo, foi revestido por uma camada de 2 a 3 mm de argamassa, no seu lado superior e inferior. Isso pode ser melhor compreendido na Figura 9.



Figura 9 - Blocos de tijolo e argamassa preparados para o teste de resistência à compressão

A argamassa foi usada nas extremidades para corrigir qualquer imperfeição que as faces possam apresentar, pois estas áreas precisam ser planas para

encaixarem de forma adequada na prensa e possibilitem uma boa distribuição de carga por todo corpo de prova (Figura 10). A argamassa usada foi preparada com cinco baldes de areia de construção e com um balde de cimento comum usado em assentamento de parede (5/1).



Figura 10 - Prensa com os corpos de prova utilizada para o teste de resistência à compressão

Estando a argamassa seca, os corpos de prova foram mergulhados em água à temperatura ambiente, por um período de 24 horas. Antes de começar com os testes na prensa, os tijolos foram retirados da água, tirou-se o excesso de umidade e mediram-se os mesmos. Em seguida, foi realizado o teste na prensa para cada tijolo.

4.5.4 Densidade

A avaliação da densidade foi determinada no laboratório de Caracterização de Materiais do Centro Tecnológico de Gemas e Joias da UNIVATES. A densidade, também citada por alguns autores como massa específica, foi determinada pelo método de Arquimides em água, utilizando uma balança da marca Bel Engineering modelo Mark 210A com kit hidrostático e determinada pela ABNT NBR 15270-1,2,3 (2005). A realização desta medida consistiu na razão entre a massa inicial do corpo-de-prova e a massa do mesmo imerso na água. Para cada medida foram utilizados cinco fragmentos dos corpos-de-prova de cada composição.

4.5.5 Homogeneidade

A análise da homogeneidade foi realizada no laboratório do Centro Tecnológico de Gemas e Joias da UNIVATES. Foi utilizado um microscópio óptico, da marca Quimis, com capacidade de aumento em até 1000 vezes.

Foram quebrados cinco tijolos de cada composição, e seus respectivos fragmentos foram analisados no microscópio. Para que fosse possível uma melhor visualização, os fragmentos foram lixados para obter uma face mais plana. Nesta análise, o aumento usado foi de até 100 vezes do tamanho real.

Para cada composição estudada, foram utilizados 5 fragmentos. De cada fragmento obteve-se 5 micrografias, das quais foram selecionadas as melhores imagens.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise química determinada pela Espectrometria de Fluorescência de Raios X na amostra de argila e na amostra de lodo de serra. Além disso, também serão demonstrados os resultados dos testes de retração, de resistência à compressão, de absorção de umidade, de homogeneidade e de massa específica.

5.1 Análise química das amostras de argila e lodo de serra

A determinação da composição química foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X e Espectrometria por Absorção Atômica e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química (% massa) das matérias-primas

Amostras	Porcentagem em massa (%)										
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	PF*
Argila	15,13	0,98	12,15	1,52	0,78	0,25	0,75	0,23	58,96	1,86	7,4
Lodo de serra	0,25	0,45	0,64	<0,01	0,22	0,01	0,08	<0,01	94,77	0,04	3,53

* Perda ao Fogo.

A composição determinada na amostra da argila está dentro daquilo que a maior parte das argilas tem apresentado como também relatam Silva *et al.* (2005), Menezes *et al.* (2002) e Oliveira e Olanda (2008). A argila usada na produção dos corpos de prova é abundante em sílica (58,96%) e alumina (15,13%), apresentando

quantidades menores de outros óxidos. O que pode ser destacado é a presença considerável de óxido de ferro (12,15%), que segundo vários autores e dentre eles Vieira *et al.* (2006), é responsável pela coloração avermelhada nos produtos após sua queima. De acordo com Silva *et al.* (2005), a perda ao fogo (7,4%) está dentro do normal para as argilas usadas na cerâmica vermelha, que na maioria das vezes está relacionada à perda de voláteis, queima de material orgânico e decomposição de carbonatos. Dentro da mesma linha, Vieira e Monteiro (2006), também relatam que a perda ao fogo neste tipo de argila, acontece devido à combustão de material orgânico, eliminação de água e desidratação de hidróxidos.

Na amostra de lodo de serra, sua composição é basicamente formada por sílica (94,77%) e pelos demais óxidos que representam uma quantidade menor. Isso se explica, pois, de acordo com Fonseca (2002), os silicatos e a sílica formam aproximadamente 95% do volume da crosta terrestre. Desta maneira, a maioria das rochas é formada por silicato, sendo raras as rochas encontradas sem silicato como material essencial.

A areia, como a sílica é popularmente chamada, é um material que sofre uma retração menor durante a queima. Quando chega a uma temperatura em torno de 570 °C tende a expandir. No resfriamento, a areia volta ao tamanho normal podendo provocar algumas trincas nos materiais. Além do mais, como observam Menezes *et al.* (2002), houve uma grande variação ($\pm 94\%$) nos teores dos fundentes (Fe_2O_3 , Na_2O e K_2O). Sendo, conforme Menezes *et al.* (2002), a principal função dos fundentes colaborar com a diminuição da temperatura de queima dos materiais e a possibilidade de economizar no consumo energético. A sílica e a argila na temperatura em que os corpos de prova foram queimados, não chegam a se fundir, pois para isso precisaria de uma temperatura mais elevada, em torno de 1200 °C. Portanto, o que ocorre com esses materiais é uma difusão de suas partículas (SHRIVER e ATKINS, 2003).

A presença de areia nas peças cerâmicas, faz com que haja maior porosidade nos tijolos e conseqüentemente uma maior facilidade na perda de água, ou seja, no processo de secagem, porém isso pode afetar a resistência dos tijolos. A areia é um material abrasivo, que provoca maior desgaste nos equipamentos usados na produção de tijolos (maromba, laminador, homogeneizador, caixa alimentador).

Isso se deve ao formato das partículas da sílica, que são pontiagudas e muito duras, ao contrário das partículas da argila, que são geometricamente retangulares e plásticas. Com certeza, isso dependerá da quantidade de areia presente na argila e no resíduo (VIEIRA *et al.* 2006).

5.2 Testes físicos

5.2.1 Retração linear

A Tabela 2 apresenta os resultados de retração linear para as amostras estudadas.

Tabela 2 - Retração Linear para as amostras de tijolos com diferentes composições

Amostra (% de lodo adicionado)	Retração Linear (%)
0	8,23 ± 1,40
5	6,82 ± 1,79
9	6,14 ± 1,88
13	5,12 ± 1,28
17	4,17 ± 1,62

Valor médio ± desvio padrão (n= 5)

A retração mesmo não sendo regulamentada por nenhuma norma, é fundamental que tenha seus números conhecidos para o uso correto das medidas da fôrma na produção dos tijolos e demais materiais cerâmicos, porque as medidas dos produtos cerâmicos, depois de queimados, são regulamentadas pelas NBRs pertinentes. Portanto, para que seja possível chegar à medida correta dos produtos após a queima, é necessário que se saiba a porcentagem de retração da matéria-prima utilizada.

Na Figura 11, pode-se visualizar a tendência de diminuição da retração à medida que se acrescenta mais lodo de serra nos tijolos. Isso vem a confirmar de que a areia é refratária, ou seja, como o lodo de serra é constituído por quase 95 % de sílica, à medida que se incorpora mais resíduo na massa argilosa, proporcionalmente o tijolo tende a retrair menos (VAN VLACK, 1984).

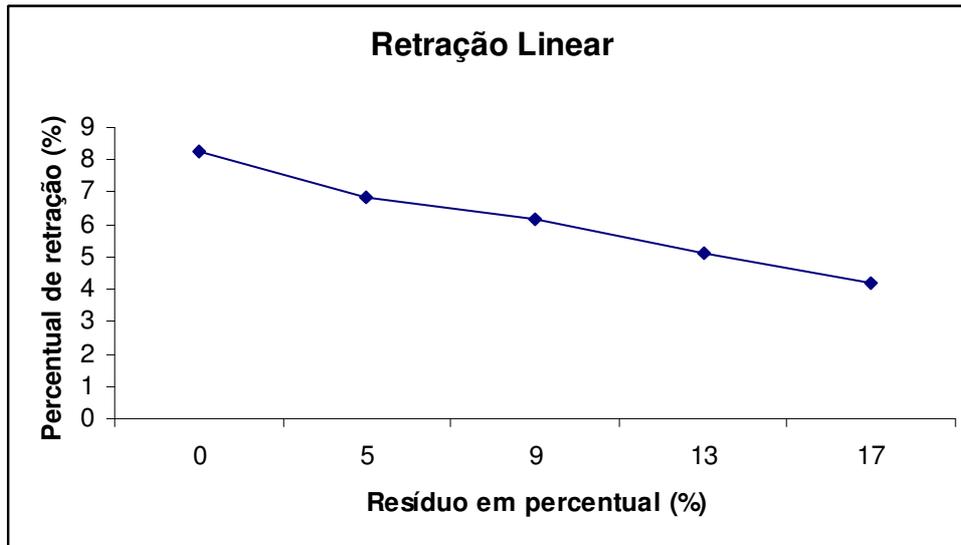


Figura 11 - Gráfico demonstrando a retração dos tijolos com a adição do lodo de serra

5.2.2 Resistência à compressão

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados para a resistência à compressão das amostras de tijolos usados neste estudo.

Tabela 3 - Resistência à compressão das amostras de tijolos com diferentes composições

Amostra (% de lodo adicionado)	MPa (Mega Pascal)
0	11,44 ± 1,70
5	7,90 ± 1,29
9	6,39 ± 1,13
13	4,68 ± 0,90
17	3,57 ± 0,52

Valor médio ± desvio padrão (n=5)

De acordo com a Tabela 4 citada na NBR 7170 (1983), os tijolos maciços são classificados em categoria A, B e C, dependendo a resistência à compressão que os mesmos atingirem.

Tabela 4 - Classificação dos tijolos maciços segundo sua resistência (NBR 7170)

Categoria	Resistência à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

Sendo assim, pode-se verificar que todos os tijolos analisados no teste de resistência à compressão, estão acima do mínimo exigido pela norma. Com a exceção dos tijolos que contém 17% de resíduo incorporado. Ressaltando que, à medida que aumenta a porcentagem de lodo de serra incorporado na massa cerâmica, diminui o grau de resistência dos tijolos. Mesmo assim, a resistência verificada nos corpos de prova é consideravelmente superior àquilo exigido pela norma nos tijolos que foram produzidos com 9, 5 e 0% de resíduo incorporados.

A Figura 12 mostra a tendência da resistência à compressão relacionada ao percentual de lodo de serra adicionado.

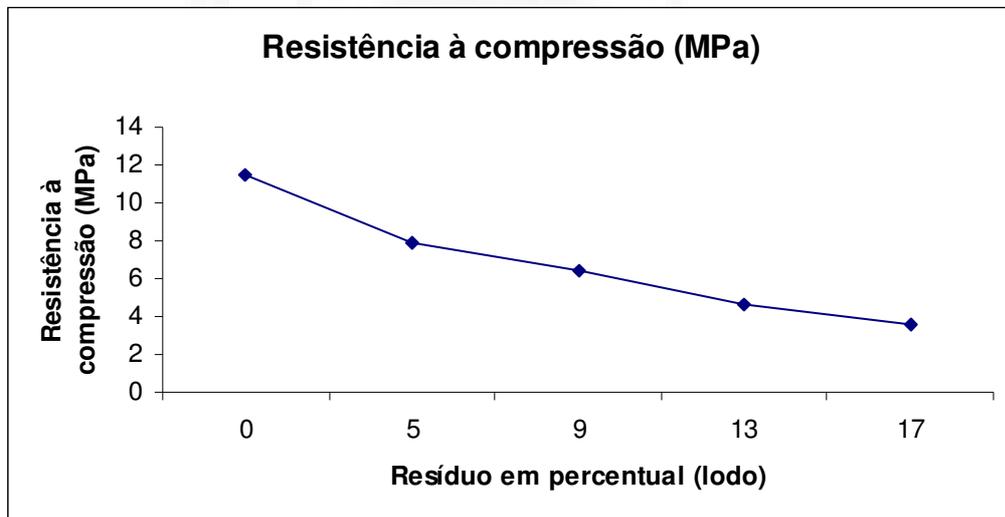


Figura 12 - Resistência à compressão em relação ao percentual de lodo de serra adicionado à massa cerâmica.

Observou-se uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do lodo de serra adicionado a massa cerâmica. A tendência observada na Figura 12 fica evidente, quanto mais lodo de serra for incorporado nos tijolos, menor será a resistência dos mesmos. Isso provavelmente, de acordo com Vieira *et al.* (2007), deve ser ocasionado pela maior porosidade que a areia provoca nas peças cerâmicas e pela menor agregação entre as partículas de sílica e as partículas da argila. Para se conseguir uma maior resistência nos tijolos incorporados com mais areia, a temperatura de queima deveria ser mais alta para que as partículas de sílica se fundissem. E, no entanto, na temperatura de 800 °C a 860 °C, temperatura de queima do material, a sílica não chega a se fundir, ao contrário de outros materiais

presentes na argila, que se fundem a temperaturas mais baixas. Isso deve explicar a diminuição de resistência à medida que se adiciona mais lodo de serra.

Na concepção de Silva *et al.* (2005), o resíduo adicionado na massa argilosa funciona como um redutor de plasticidade, podendo influenciar em mudanças na conformação dos tijolos. Entretanto, o lodo de serra incorporado em altas quantidades contribui positivamente na secagem do material, mas, por outro lado, as peças fabricadas poderão perder resistência mecânica. À medida que se introduz mais resíduos à massa cerâmica, durante o processo e queima, tem-se uma menor quantidade de material que se funde.

5.2.3 Absorção de água

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com as análises realizadas no Centro Tecnológico de Gemas e Joias da Univates, sobre a absorção de água dos corpos de prova com as diferentes composições.

Tabela 5 - Resultado das análises da absorção de água

Amostra (% de lodo adicionado)	Absorção de água (%)
0	19,28 ± 0,57
5	21,26 ± 0,59
9	22,77 ± 0,74
13	24,25 ± 1,03
17	24,96 ± 1,22

Valor médio ± desvio padrão (n=5)

A absorção de água não é estipulada nas NBRs que regem o tijolo maciço, no entanto, foi utilizado a NBR 15270 (2005), que trata sobre os blocos cerâmicos para alvenaria de vedação, segundo qual, especifica a absorção permitido entre 8% e 22%. Como pode ser visto na Figura 13, a absorção de umidade também tende a aumentar à medida que é acrescentado mais resíduo de gemas. Neste quesito, somente estaria dentro da norma os tijolos maciços produzidos com até 5% de lodo de serra incorporados em sua massa.

O aumento da absorção de água está diretamente ligado ao aumento da porosidade que a areia proporciona aos tijolos, à medida que se acrescenta mais sílica, segundo Vieira e Monteiro (2006).

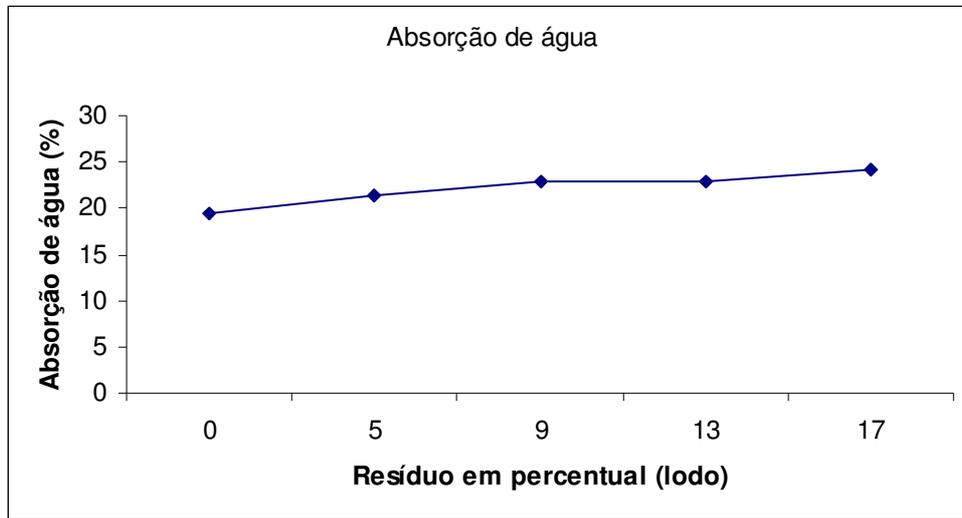


Figura 13 - Absorção de água em relação à adição de lodo de serra.

Para Silva *et al.* (2005), a absorção de água aumenta com o aumento da adição de resíduos e tende a diminuir com o aumento da temperatura de queima, pois, neste caso, o ponto de sinterização dos tijolos também cresce. A incorporação de maiores quantidades de lodo de serra na massa cerâmica e o uso de temperaturas mais baixas na queima remetem a menores índices de resistência à compressão, o que pode ser causado pela porosidade elevada dos materiais.

5.2.4 Densidade

A Tabela 6 mostra os resultados para a densidade dos tijolos com diferentes percentuais de lodo de serra adicionado.

Tabela 6 - Resultado da análise da densidade do material estudado

Amostra (% de lodo adicionado)	Densidade (g/cm ³)
0	1,94 ± 0,15
5	1,84 ± 0,03
9	1,83 ± 0,00
13	1,82 ± 0,01
17	1,81 ± 0,01

Valor médio ± desvio padrão (n=5)

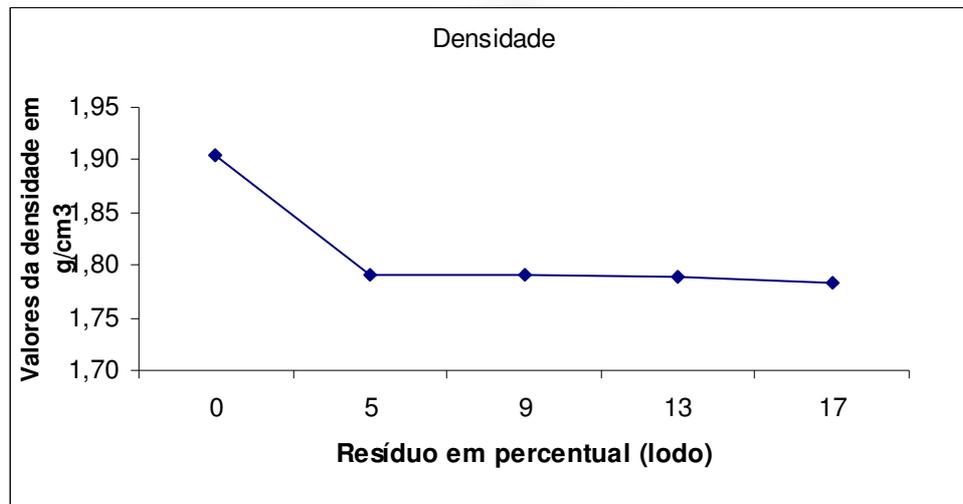


Figura 14 - Gráfico do resultado da análise da densidade dos materiais.

Silva *et al.* (2005), observaram uma diminuição na massa específica à medida que aumenta o teor de resíduo adicionado. Porém, há uma queda mais significativa a partir da incorporação do lodo de serra (Figura 14) e entre as demais composições a diminuição de massa específica é insignificante.

5.3 Homogeneidade

A homogeneidade foi determinada pelas micrografias obtidas pelo microscópio óptico, utilizando de um aumento em até 100 vezes, dessas micrografias foram selecionadas algumas para serem analisadas a seguir:

A Figura 15 mostra as micrografias para as diferentes composições dos tijolos.

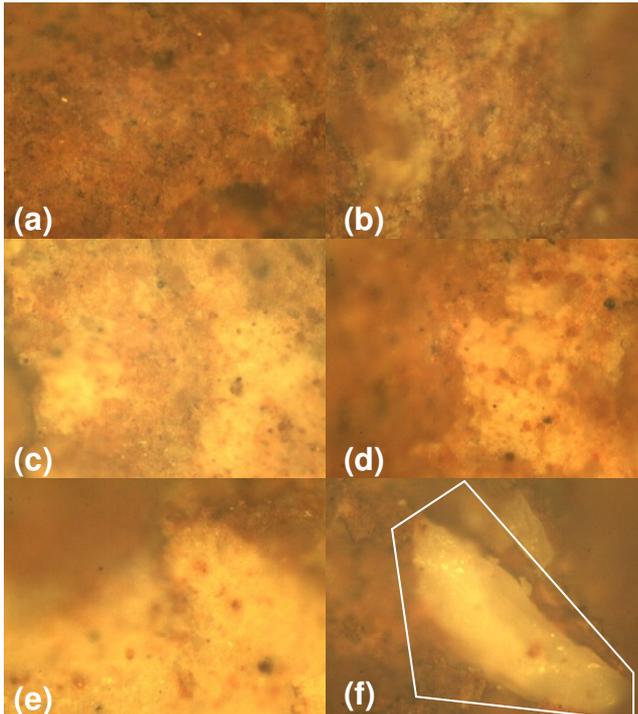


Figura 15 - Micrografias obtidas dos materiais estudados com 0% (a), 5% (b), 9% (c), 13% (d), 17% (e) e 5% (f) de lodo de serra adicionado

As micrografias expostas na Figura 15 demonstram a diferença entre os corpos de prova com 0% e 9% de resíduo adicionado. Isso fica evidente em sua coloração, pois o tijolo produzido com somente argila apresenta uma coloração mais escura enquanto o tijolo fabricado com 9% de lodo de serra, incorporado, apresenta uma coloração mais clara. Outro aspecto que pode ser observado na micrografia com 9% de resíduo é a boa distribuição das partículas do lodo de serra em meio à massa argilosa.

Na micrografia com 5% (f) de lodo de serra adicionado, pode-se visualizar a presença de partículas maiores de ágata. A pedra que aparece na micrografia é um problema na produção de tijolos, pois prejudica o sistema de corte, fazendo com que a produção precise ser interrompida diversas vezes para que os arames de aço do cortador possam ser trocados.

Os tamanhos que essas partículas de gema possuem podem influenciar no aumento da porosidade dos tijolos e conseqüentemente repercutirem no aumento da absorção de água e na diminuição de resistência dos tijolos. Além disso, também podem contribuir no aparecimento de trincas, pois a região onde a pedra está localizada apresenta grande porosidade por onde a umidade tende a sair mais

rapidamente, resultando então, nas rachaduras. Após a discussão dos resultados, seguem algumas considerações finais.

5.4 Considerações finais

Com a realização da análise química torna-se possível identificar a composição de cada amostra estudada. Nestes resultados é possível visualizar um elemento em comum nos materiais, pois tanto na argila como no lodo de serra o principal elemento em suas composições é a sílica. O lodo de serra é formado em quase sua totalidade pela sílica (94,77%) e a argila possui mais da metade (58,96%) de sua composição formada pela sílica. Isso já poderia servir de indício de que seria possível fazer algum aproveitamento desse resíduo na massa cerâmica. No entanto, mesmo identificadas as composições dos materiais estudados, foram produzidos corpos de prova com os diferentes percentuais de lodo de serra incorporados para que se pudesse avaliar os aspectos físicos de acordo com as exigências das normas vigentes.

Os corpos de prova foram fabricados em escala industrial possibilitando a obtenção de resultados mais confiáveis e a chance de avaliar o comportamento do resíduo já em uma produção real dentro da fábrica. No primeiro teste realizado, foi possível identificar uma menor retração com o aumento do volume de lodo de serra introduzido na massa cerâmica. Isso se explica por causa do respectivo aumento de sílica (presente no lodo de serra) nos tijolos, já que a sílica possui a característica de ser menos retrativa. Em um primeiro momento, seria possível concluir que quanto mais lodo de serra fosse adicionado aos tijolos, melhor seria. Mas, se levássemos em conta que a sílica resultaria em maior porosidade no produto, consequentemente facilitaria a secagem (saída de água) e menores seriam os riscos de aparecimento de trincas nos tijolos, embora não seja o suficiente para a obtenção de uma conclusão definitiva.

No teste de resistência à compressão, quase todos os corpos de prova analisados estão acima do limite de resistência exigido pela norma. A NBR 7170 (1983) estabelece um mínimo de 4,0 MPa em sua categoria "C" (a maior). Para se

fazer uma comparação, os tijolos testados com 17% de resíduo incorporado, resistiram a 3,57 MPa, se classificariam como sendo de categoriai “B”.. Considerando somente o teste de resistência à compressão, provavelmente poderiam ser incorporadas quantidades maiores de lodo de serra na massa cerâmica. Porém, não podemos deixar de observar a significativa queda de resistência à compressão dos tijolos com 0% de lodo de serra (11,44 MPa) para os tijolos com 17% de lodo de serra adicionado (3,57 MPa). Isso poderia ser melhorado com um processo de diminuição da granulometria do lodo de serra. Pois as partículas maiores presentes no lodo de serra provoca trincas durante a secagem dos tijolos e conseqüentemente diminui a resistência à compressão. Com um processo para corrigir a granulometria do resíduo, essa diferença na resistência à compressão poderia ser diminuída. Com o aumento da quantidade de resíduo nos tijolos será necessário o aumento na temperatura de queima, pois a sílica funde em temperaturas mais elevadas, causando assim, também um aumento no consumo (custo) de combustível para as fornalhas.

A absorção de água, segundo a norma NBR 15270 (2005), delimita o uso de até 5% de lodo de serra no material cerâmico. A norma especifica a absorção de água tolerada entre 8% e 22%. Neste caso, os resultados demonstraram que os tijolos com 9, 13 e 17% de resíduos adicionados em massa, absorveram mais de 22% de água. Os corpos de prova com 5% de lodo (21,26%) ficaram próximos do limite de 22% estabelecido e os tijolos com 0% de lodo (19,41%), também apresentaram valores elevados de absorção. Isso se deve ao alto teor de sílica presente nos materiais, o que os torna mais porosos.

De acordo com a densidade analisada nos corpos de prova, todas as composições estariam dentro daquilo que é determinado pela NBR 6480 (1985), 1,70 g/cm³. Os tijolos com 0% de lodo de serra apresentaram o valor mais elevado, mas todos demais obtiveram valores acima de 1,70 g/cm³.

As micrografias obtidas para analisar a homogeneidade dos materiais com as diferentes composições demonstraram a boa distribuição das partículas de lodo de serra na massa cerâmica. No entanto, em algumas das micrografias, foi possível identificar partes maiores de ágata em meio à argila e o lodo de serra.

6 CONCLUSÃO

Dessa maneira, pode-se concluir que a porcentagem indicada a ser incorporada à massa cerâmica é 5%. De modo geral, as análises realizadas demonstraram que seria possível a adição de quantidades maiores nos tijolos cerâmicos. Porém, é necessário atender à norma legal que delimita a absorção de água, onde o resultado indicou o uso de até 5% de lodo de serra na massa cerâmica.

Além do mais, a utilização de maiores quantidades de resíduo na produção dos tijolos geraria um desgaste maior nos equipamentos usados, elevaria o custo de produção dos tijolos e conseqüentemente, não seria uma forma sustentável de produção. Outro fator relevante é a imagem que o tijolo maciço da região possui. O fato de ser um tijolo de ótima qualidade, de boa resistência e de uma coloração (avermelhada) impactante, a adição de maiores quantidades de lodo de serra em sua massa, segundo os resultados obtidos nas análises, poderia comprometer a qualidade, a resistência e sua estética.

O projeto pode ser considerado viável, pois há um interesse das duas partes em aplicar o estudo. A fornecedora do lodo de serra no momento descarta este material que como vimos, poder ter um destino melhor. A empresa receptora pretende incorporar outros materiais na massa argilosa. Ambas, além de diminuir seus custos, poderão passar uma imagem de ambientalmente corretos para a sociedade e seus clientes.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aprofundar os estudos nesta pesquisa, pode-se sugerir uma avaliação mais concentrada nas partículas do lodo de serra. Buscar alguma forma de diminuir a granulometria do resíduo e com isso melhorar os índices na resistência à compressão e da absorção de água.

Também seria interessante continuar a observar o comportamento dos tijolos produzidos com lodo de serra, no intemperismo, com a ação do tempo. Visualizar e realizar novos testes nos tijolos após um longo período, para podermos avaliá-los novamente.

Outra hipótese que poderia ser estudada, seria a utilização do lodo de serra em outros produtos mais nobres, da cerâmica branca, como por exemplo, a produção de pisos, azulejos e louça.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, Ivone Maria; FIORENTINI, João Alberto; JUCHEM, Pedro L.; BRUM, Tânia M. M.de.; REICHELT, Vitor Fernando. **Ágata do Rio Grande do Sul**. Ministério de Minas e Energia; Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Brasília: Editada pela Divisão de Minas e Controle Ambiental na Mineração – DMCAM, 1998.
- AMARAL, Sergio Pinto. **Sustentabilidade ambiental, social e econômica nas empresas**: como entender, medir e relatar. 2. ed. São Paulo: Totalino, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 6460-83, **“Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. – Verificação da resistência à compressão”**, Rio de Janeiro, RJ (1983).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 7170-83, **“Tijolo maciço cerâmico para alvenaria”**. Rio de Janeiro, RJ, (1983).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 8041-83, **“Tijolo maciço cerâmico para alvenaria forma e dimensões”**. Rio de Janeiro, RJ, (1983).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 15270-1, **“Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. – Terminologia e requisitos”**. Rio de Janeiro, RJ, (2005).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15270-2: **Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – terminologia e requisitos**, Rio de Janeiro, RJ (2005).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15270-3: **Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio**, Rio de Janeiro, RJ (2005).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 15270-3, “**Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação. – Métodos de ensaio**”. Rio de Janeiro, RJ, (2005).

BORDIGNON, Ângelo; ECKERT Jerson Luiz; RITTER, Jorge Romeu; DIAS, Raimundo Borba. **Diagnóstico da Indústria da Cerâmica Vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. Relatório de pesquisa. – Porto Alegre. SINDICER – Rio Grande do Sul. 2008.

BORLINI, M. C; SALES, H. F; VIEIRA, C. M. F; CONTE, R. A; PINATTI, D. G; MONTEIRO, S. N. **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza**. Revista Cerâmica. v. 51, p. 192-196, 2005.

CALLISTER, Jr, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMPOS, Edson Esteves; FRAZÃO, Ely Borges; CALAES, Gilberto Dias e HERRMANN, Hildebrando. **Agregados para a Construção Civil: contribuições para formulação de políticas públicas**. Belo Horizonte: CETEC, 2007.

CAPRA, Fritjof. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. 1. ed. São Paulo: Cultrix, 2006.

DUARTE, Lauren da Cunha; JUCHEM, Pedro Luiz; PULZ, Gênova Maria; DE BRUM, Tânia Mara Martini; CHODUR, Nelson; LICCARDO, Antônio; FISCHER, Adriane Comin; ACAUAN, Roberta Bonatto. **Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersa (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros**. Pesquisa em Geociências. v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003.

DUPAS, Gilberto. **Meio ambiente e crescimento econômico: tensões estruturais**. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

FONSECA, Antonio Tomás da. **Tecnologia do Processamento Cerâmico**. Universidade Aberta. 1. ed. 2 imp. 554 p. 2002.

GALLUCCI, Laura; CUNHA, Reynaldo Dannecker. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. Revista Técnica ESPM. Estudos de mercado SEBRAE, 2008.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

HEEMANN, Roberto. **Modelagem Estrutural e Tridimensional para a Prospeção dos Depósitos de Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. UFRGS – Porto Alegre: 2005.

LENZI, Cristiano Luis. **Sociologia ambiental: risco e sustentabilidade na modernidade**. Bauru, SP: Edusc, 2006.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MENEZES, Romualdo R.; NEVES, Gelmires de A.; FERREIRA, Heber C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo**. 3 ed. Porto Alegre: Sulina, 2007.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha**. Revista Cerâmica. v. 51, p. 167-173, 2008.

NBR 7181, **Solo, Análise Granulométrica**, 1984.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1989.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W.. **Química inorgânica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

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

VAN VLACK, LAWRENCE HALL. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 22ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Cerâmica argilosa incorporada com resíduo oleoso proveniente do setor petrolífero**. Revista Matéria. v. 11, n. 3, p.217 – 222, 2006.

VIEIRA, C. M. F.; HENRIQUES, D. N.; PEITER, C. C.; CARVALHO, E. A.; MONTEIRO, S. N. **Utilização de gnaiss fino em massa cerâmica para telhas**. Revista Matéria. v. 11, n. 3, p. 211-216, 2006.

VIEIRA, C. M. F.; INTORNE, S. C.; VERNILLI Jr., F.; MONTEIRO, S. N. **Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria**. Revista Matéria. v. 12, n. 2, p. 269 – 275, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; MARGEM, J. I.; MONTEIRO, S. N. **Alterações micro estruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA**. Revista Matéria. v. 13, n. 2, p. 275 – 281, 2008.