

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM
ENGENHARIA QUÍMICA – NÍVEL MESTRADO

INCORPORAÇÃO DE LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
TAMANDUÁ, COMO ADITIVO EM MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA.

RODRIGO TARTARI

TOLEDO – PR

2008

RODRIGO TARTARI

INCORPORAÇÃO DE LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
TAMANDUÁ, COMO ADITIVO EM MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Desenvolvimento de Processos, linha de pesquisa em Monitoramento e Controle Ambiental.

Orientador: **Prof. Dr. Aparecido Nivaldo Módenes**

Co-orientadora: **Prof^a. Dr^a Nora Díaz Mora**

TOLEDO – PR

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

T194 Tartari, Rodrigo

Incorporação de lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha / Rodrigo Tartari. – Toledo, 2008.

103 f.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Nivaldo Módenes.

Co-orientadora: Pro^a. Dr^a. Nora Diaz Mora.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Engenharia química. 2. Argilas para cerâmicas. 3. Resíduos – Controle ambiental. I. Título.

CDU 66.0

666.32

504.064

Miriam Fenner R. Lucas – CRB/9:268 – UNIOESTE – Campus de Foz do Iguaçu

*A dificuldade atrai o homem de caráter,
porque é enfrentando-a que ele se realiza,
“Autor desconhecido”*

*“Nunca se vence uma guerra lutando sozinho”
(Raul Seixas)*

*Dedico essa dissertação à minha Família, Mãe Eusa,
Pai Luiz e Irmão Luiz Filho!*

Agradecimentos...

Ao Professor Aparecido Nivaldo Módenes pela sintonia, orientação, paciência e amizade.

À Professora Nora Diaz Mora pelo desempenho na orientação e amizade.

Ao Programa de Desenvolvimento Tecnológico Avançado da Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPDTA) pelo financiamento do projeto e incentivo a pesquisa.

À SANEPAR / SANETEC pelo financiamento do projeto e incentivo a pesquisa.

Aos amigos pesquisadores de iniciação científica da UEPG: Simone B. Derosi e Ericson L. Matos, pela contribuição e desempenho na fase experimental do trabalho.

Aos Professores: Sidnei Antonio Pianaro e Amauri Deniz; e aos técnicos: Gaspar (Lab. Solos), Milton, Dirceu pela orientação na realização dos experimentos laboratoriais, operação de equipamentos e amizade.

Ao amigo Mario Laurindo Piazza e família, por serem bons vizinhos e parceiros.

À Equipe do Laboratório de Materiais - LAMAT: Alcione, Juliana, Tiago(s), Mayara, Maycon e Eduardo Velasquez pela amizade, companheirismo e contribuição científica.

Aos amigos da Dispekar, Helder, Marcelo, Sandro, pela grande amizade, festas e apoio logístico.

À cerâmica Santa Rita LTDA e a Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu pelo fornecimento de matérias primas para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos contribuintes da Sanepar Victor, Jacir e Péricles, participaram decisivamente para o desenvolvimento da pesquisa.

À Vanessa e ao Matheus pelo carinho e apoio em toda a trajetória do mestrado.

Aos amigos de Ponta Grossa Alexandra, Cláudio e Leonete pela hospitalidade, amizade e festividade.

À todos os amigos(as) e companheiros(as) de estudo do mestrado.

À equipe Palmares, Carol, Claudio, Felipe e Haroldo, que apoiaram o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Aos professores e colaboradores do Programa de Pós – Graduação da Engenharia Química de Toledo-PR pela oportunidade e contribuição a distância, em especial a Cléusa.

A minha Mãe, Pai e Irmão com muito amor e carinho, Muito Obrigado Por Tudo!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	18
2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 TRATAMENTOS DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LODOS	4
2.1.1 Processos Convencionais de Tratamento de Água.....	5
2.1.2 Geração de Lodo nas ETAs.....	7
2.1.3 Características do Lodo de ETA.....	8
2.1.4 Alternativas de Tratamento Prévio, Desidratação e Disposição do Lodo.....	10
2.1.5 Estudos de Reaproveitamento de Lodo de ETA em Matriz Cerâmica.....	15
2.2 ARGILAS E MATERIAIS CERÂMICOS	18
2.2.1 Caracterização de Argilas e Ensaio Tecnológicos.....	21
2.2.1.1 Propriedades das partículas do solo.....	21
2.3 CERÂMICA VERMELHA E VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO	26
2.3.1 Processamento de Materiais Cerâmicos.....	27
2.3.2 Tratamento Térmico.....	31
2.4 TÉCNICAS ESPECTROMÉTRICAS	33
2.4.1 Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF).....	33
2.4.2 Difração de raios X (XRD).....	34
2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LODO NA ETA – TAMANDUÁ	37
3.2 SELEÇÃO, COLETA E AMOSTRAGEM DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	40
3.2.1 Amostragem da coleta do lodo da ETA – Tamanduá.....	40
3.2.2 Seleção das Argilas.....	41
3.2.2.1 Argilas da Cerâmica Santa Rita.....	42
3.2.2.2 Argila da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu /PR – COOAFOZ ..	42
3.3 PROCESSOS METODOLÓGICOS	43
3.4 BENEFICIAMENTO E PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	46
3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS	46
3.6 PREPARAÇÃO DAS MASSAS CERÂMICAS	49
3.6.1 Conformação das Massas por Prensagem Uniaxial.....	49
3.6.2 Conformação das Massas por Extrusão.....	50
3.6.3 Sinterização.....	51
3.7 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COPOS CERÂMICOS	51
3.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise por Energia Dispersiva....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS	56
4.1.1 Discussão da Caracterização das Matérias-Primas.....	66
4.2 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS	67
4.2.1 Plano de Misturas “A” e “B”	68
4.2.2 Adição de Lodo às Massas Cerâmicas.....	75
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1 SUGESTÕES	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição física da água na partícula do lodo de ETA	9
Figura 2.2 – Ilustração da molécula de água comportando-se como dipolo elétrico.	23
Figura 2.3 – Estados de consistência para solos em função do teor de umidade.	24
Figura 3.1 – Mapa de localização da Estação de Tratamento de Água Tamanduá, inserida no município de Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil.....	38
Figura 3.2 – Processo convencional de tratamento de água da ETA Tamanduá	39
Figura 3.3 – (a) Lodo sendo descarregado pelo decantador, (b) Maquinário de centrifugação com acondicionamento em contêineres.....	40
Figura 3.4 – Lodo centrifugado, armazenado no contêiner em tempo de espera.....	41
Figura 3.5 – Argilas utilizadas pela Empresa Cerâmica Santa Rita para fabricação de cerâmicas vermelha.	42
Figura 3.6 – Argilas utilizadas pela COOAFOZ para fabricação de cerâmica artística.....	43
Figura 3.7 – Fluxograma da metodologia empregada para caracterização das matérias-primas e misturas para preparação das massas cerâmicas.....	45
Figura 3.8 – Fluxograma de preparação das massas cerâmicas	50
Figura 3.9 – Extrusora Faenza, utilizada na confecção dos blocos cerâmicos conforme a NBR 7171/95.....	51
Figura 3.10 – Ensaio de tensão de ruptura a flexão tracionando em três pontos.	54
Figura 4.1 – Difrátogramas de raios X das materiais primas: Lodo; argilas AP; AA; AO; e OP. (Ca = Caulinta; Qz = Quartzo; Hm = Hematita).....	59
Figura 4.2 – Distribuição Granulométrica das cinco matérias-primas.....	60
Figura 4.3 – Apresentação das características das matérias-primas de acordo com gráfico de classificação e identificação de propriedades de argilas, adaptado de Atterberg.....	62
Figura 4.4 – Análise Granulométrica do lodo ETA e das Argilas OA e OP.....	63
Figura 4.5 – Análise Granulométrica lodo ETA e das Argilas AA e AP.....	64
Figura 4.6 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Geral da amostra identificando matéria orgânica, ampliada em 100 X. (b) Partículas lamelares conglomeradas, ampliadas em 1.500 X.	65
Figura 4.7 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Grânulos de lodo, ampliada em 500 X. (b) superfície do Grânulo, ampliado em 3.000 X.....	65
Figura 4.8 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Grânulos aglomerados ampliado em 500 X. (b) Grânulo ampliado em 2.000 X.....	66

Figura 4.9 – Corpo cerâmico confeccionado com lodo puro sinterizado na temperatura de 950°C.....	67
Figura 4.10 – Contração linear de secagem 110 ± 5 °C, contração linear total após sinterização a 950 e 1050 °C para as composições das Mistura – “A” e “B”.	69
Figura 4.11 – Absorção de água para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.....	71
Figura 4.12 – Porosidade aparente para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.....	71
Figura 4.13 – Massa específica aparente para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.....	72
Figura 4.14 – Perda ao Fogo para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.....	72
Figura 4.15 – Resistência a Flexão para as misturas “A” e “B” após, sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C	73
Figura 4.16 – Ilustração dos corpos de prova referentes as composições AL, sinterizadas em dois regimes de temperaturas.	76
Figura 4.17 – Ilustração dos corpos de prova referentes as composições BL, sinterizadas em dois regimes de temperaturas.	77
Figura 4.18 – Contração linear das Misturas AL e AL', BL e BL' com % peso de lodo.	78
Figura 4.19 – Absorção de Água das Misturas AL e AL', BL e BL' com % peso de lodo	79
Figura 4.20 – Porosidade Aparente das Misturas AL e AL', BL e BL' com % peso de lodo.	79
Figura 4.21 – Massa Específica Aparente da Mistura AL, AL', BL e BL com % peso de lodo.	80
Figura 4.22 – Perda ao Fogo da Mistura AL, AL', BL e BL com % peso de lodo.....	80
Figura 4.23 – Tensão de Ruptura a Flexão das composições AL, AL', BL e BL' com % peso de lodo.	81
Figura 4.24 – Microanálise da amostra AL com 8% de lodo por μ EDX-RF, apresentando o pico do ferro.	82
Figura 4.25 – Microanálise da amostra AL' com 8% por μ EDX-RF, apresentando o pico do titânio.....	83
Figura 4.26 – Microanálise da amostra AL' com 8% de lodo por μ EDX-RF, apresentando pico do alumínio.....	85
Figura 4.27 – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do alumínio.	85

Figura 4.28 – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do titânio na amostra.	87
Figura 4.29 – Experimento realizado por artesã do Ñandeva, sinterizado a 900 °C	88
Figura 4.30 – Cerâmica vermelha industrial.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais tecnologias de desidratação mecânica do lodo	12
Tabela 2.2 – Exemplo de composição química dos lodos de ETA's já caracterizados.....	18
Tabela 2.3 – Linhas de produção e processamento de materiais cerâmicos.....	28
Tabela 2.4 – Equipamentos básicos de laboratório para simulação industrial do processo cerâmico, principais parâmetros de operação e propriedades tecnológicas	29
Tabela 3.1 – Formulações das composições binárias em porcentagem peso	49
Tabela 4.1 – Resultados de caracterização das matérias-primas	56
Tabela 4.2 – Óxidos dos elementos químicos detectados por ED-XRF.....	58
Tabela 4.3 – Limites de consistência de solos de Atterberg.....	61
Tabela 4.4 – Resultados significativos do ensaio de resistência a flexão.....	74
Tabela 4.5 – Composição das massas com adição de porcentagem peso de lodo.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AÁ	- Absorção de Água;
AA	- Artesão Areia (Argila da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu-PR);
AP	- Artesão Plástica (Argila da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu – PR);
CLQ	- Contração Linear de Queima;
CLS	- Contração Linear de Secagem;
CLT	- Contração Linear de Total;
COOAFOZ	- Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu-PR;
DNER	- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens;
ED XRF	- Energia Dispersiva por Fluorescência de Raios X;
ETA	- Estação de Tratamento de Água;
IAP	- Instituto Ambiental do Paraná;
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia Estatística;
IPARDES	- Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social;
MEA	- Massa Específica Aparente;
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura;
MO	- Matéria Orgânica;
MTFC	- Módulo de Tensão de Ruptura a Compressão;
MTRF	- Módulo de Tensão de Ruptura a Flexão;
ÑANDEVA	- Programa para Desenvolvimento do Artesanato de Foz do Iguaçu e Região;
OA	- Olaria Areia (Argila utilizada pela cerâmica Santa Rita, Foz do Iguaçu – PR);
OP	- Olaria Plástica (Argila utilizada pela cerâmica Santa Rita, Foz do Iguaçu – PR);
PA	- Porosidade Aparente;
PF	- Perda ao Fogo;
RES	- Resíduos;
XRD	- Difração de Raios X

INCORPORAÇÃO DE LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA TAMANDUÁ, COMO ADITIVO EM MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA

Autor: **Rodrigo Tartari**

Orientador: **Prof. Dr. Aparecido Nivaldo Módenes**

Co-orientadora: **Prof^a. Dr^a Nora Díaz Mora**

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química;

Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua da Faculdade, 645; CEP 85903-000 – Toledo – PR, Brasil, defendida em 05 de Dezembro de 2008. 103 p.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo pesquisar o desenvolvimento de métodos para utilizar o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, localizada na cidade de Foz do Iguaçu/PR, como matéria-prima para produção de cerâmica vermelha. Para atingir a finalidade proposta, utilizaram-se além do lodo, quatro argilas de formação geológica da região oeste do Paraná, denominadas por: Plástica (OP) e Areia (OA) da Cerâmica Santa Rita e Plástica (AP) e Areia (AA) da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu – PR (COOAFOZ), empregadas para produção de cerâmica vermelha. A metodologia subdividiu-se em: caracterização das 5 matérias-primas pela determinação da umidade, matéria orgânica, perda ao fogo, limites de consistência de solos, resíduos, granulometria, composição química e mineralógica. Na segunda fase da investigação, fez-se sete misturas binárias entre as argilas da Cerâmica Santa Rita e da COOAFOZ, variando o peso de ambas em 0, 30, 40, 50, 60, 70 e 100%. Foram confeccionados 336 corpos de prova por prensagem uniaxial, analisados a seco e após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C, avaliados perante os seguintes ensaios: contração linear total, absorção de água, porosidade aparente, perda ao fogo, massa específica aparente, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura e microanálise. Verificou-se que as argilas AP e OP apresentaram características de alta plasticidade com presença majoritária de SiO₂, Al₂O₃, e Fe₂O₃ e grãos < 2μ, iguais a 19,4 e 21,6 respectivamente. As argilas AP e OP em maiores porcentagens peso nas misturas intensificaram as interações entre os argilominerais, isto é, no processamento obtiveram-se resultados positivos diante a avaliação das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova. As misturas A1 (100% AP), A2 (70% AP + 30% AA), B1 (100% OP) e B2 (70% OP + 30% OA), apresentaram

melhores resultados com relação à absorção de água menor que 25% e resistência à flexão superior a 60 kgf/cm² na temperatura de sinterização a 950 °C e superior a 80 kgf/cm² à 1050 °C. Nestas composições, incorporaram-se 4, 8, 12 e 16% de lodo seco para determinar a carga máxima admissível sem causar trincas e deformações. Verificou-se que o lodo apresentou características de argilas siltosas de baixa plasticidade, podendo substituir argilas similares em até 8% na produção de cerâmica vermelha. De acordo com análise dos resultados obtidos, fizeram-se blocos estruturais de 6 furos pelo método de extrusão incorporando 8% de lodo úmido, e verificou-se que as propriedades físico-mecânicas avaliadas foram as seguintes: 8,6% de contração linear, 24% de absorção de água e 46 kgf/cm² de resistência à compressão, estando dentro das normas de produção de cerâmica vermelha para revestimento (tijolos). Destacou-se que o lodo incorporado na forma úmida à massa de argila, com cerca de 75% de água inicial quando recebido da Estação de Tratamento de Água Tamanduá, contribuiu no processamento de maturação da mesma. Portanto, conclui-se com base nos resultados que o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água da unidade Tamanduá em Foz do Iguaçu – PR pode ser utilizado como aditivo na fabricação de massas para cerâmica vermelha.

Palavras Chave: Lodo de estação de tratamento de água; caracterização de argilas; cerâmica vermelha; e reutilização de resíduos.

INCORPORATION OF SLUDGE GENERATED IN THE TAMANDUÁ WATER TREATMENT PLANT INCORPORATED, WITH ADDITION OF A RED CERAMIC MASS

Autor: **Rodrigo Tartari**

Supervisor: **Prof. Dr. Aparecido Nivaldo Módenes**

Co - supervisores: **Prof^a. Dr^a Nora Díaz Mora**

Master Thesis; Post- Graduate Program in Chemical Engineering; West State University of Paraná; rua da faculdade, 645; CEP 85903-000 – Toledo – PR, Brasil, presented on 5 de December 2008. 102 p.

ABSTRACT

The objective of this work is to research the development of methods for utilizing the sludge generated in the Tamanduá water treatment plant, located in the city of Foz do Iguaçu - PR, as a prime material for the production of red ceramic. For this purpose, it was used beyond the mud, four clays originating geological region of western Paraná, called: Plastic (OP) and Sand (AO) from Santa Rita Ceramic and Plastic (AP) and Sand (AA) from de Artisans' Cooperative of Foz do Iguaçu – PR (COOAFOZ), used for production of red ceramic. The methodology is divided into: characterization of the 5 materials for determination of humidity, organic matter, loss by fire, limits of sil consistency, residues, grain fineness, chemical and mineralogy, in the second phase of the investigation, seven binary mistures were made among the clays from Santa Rira Cermics and from COOAFOZ, varying the weight of both in proportion of 0, 30, 40, 50, 60, 70 and 100%. Were up 336 bodies of evidence by uniaxial pressing, tested dry and after sintering at temperatures of 950 ° and 1050 °C, measured before the following tests: total linear contraction, water absorption, apparent porosity, loss by fire, apparent specific mass, strength the bending, scanning electron microscopy and microanalysis. It was found that the clay AP and OP showed characteristics of high plasticity with major composition of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ and grains < 2μ equivalent to 19.4 and 21.6, respectively. When these clays the AP and OP in greater weight percentages in the mixtures, the intensities of interaction between clay processing were positively evaluate the physical-mechanical properties of bodies of evidence. Mixtures A1 (100% AP), A2 (70% AP + 30% AA), B1 (100% AP) and A2 (70% AP + 30% AA), showed

better results on water absorption of less than 25% and resistance to bending than 60 kgf/cm² at a temperature of 950 °C and more than 80 kgf/cm² to 1050 °C. In these compositions, is incorporated 4, 8, 12 and 16% of dry sludge to determine the maximum permissible load without causing cracks and deformations. It was found that the sludge presented characteristics of silty clay of low plasticity, can replace clay similar to 8% in the production of red ceramic. According to analysis of results, have been building blocks of 6 holes for the method of extrusion incorporating 8% of wet mud is found that the physical mechanical properties evaluated were: linear contraction of 8.6%, 24% water absorption and 46 kgf /cm² of resistance to compression, and within the rules for production of red ceramic coating for (bricks). It appears that the sludge was incorporated as the mass of wet clay, about 75% of initial water when received from the water treatment plant Tamanduá, contributing to process of maturation. It was concluded that based on the results obtained in the laboratory that the sludge generated in the water treatment plant of the unit Tamanduá in Foz do Iguaçu - PR can be used as an additive in the manufacture of bodies for red ceramic.

Key Words: Sludge from the Water Treatment Plant; Clay; Characterization of Clays, Red Ceramic, Reutilization of Residues.

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água potável é um indicativo básico de qualidade de vida. A porcentagem de água doce disponível no planeta para suprir as necessidades humanas é baixa, cerca de 2,5%, com tendências de serem reduzidas, decorrente o aumento da poluição dos mananciais que compromete principalmente os meios urbanos onde há maior demanda de água potável. As características físico-químicas da água são indicadores de qualidade existente no manancial, que nem sempre são adequadas às condições de uso que se pretende, logo, utiliza-se das propriedades naturais da água do manancial como requisito base para determinar o processo artificial de purificação da água, visando assegurar os padrões de potabilidade e qualidade desejável para abastecimento público.

No Brasil, a maioria das empresas de saneamento utiliza o processo convencional para o tratamento da água, sendo as seguintes fases principais: captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Esses processos destroem microorganismos potenciais causadores de doenças, retiram sedimentos em suspensão e controlam o aspecto de cor e gosto, conforme requisitos normativos para operação do sistema de tratamento. Por consequência destes processos, geram-se subprodutos formados por sólidos e precipitados químicos resultantes da fase de floculação, onde ocorre a aglomeração de partículas orgânicas e inorgânicas por influência direta do coagulante químico utilizado e ações físicas de movimento que favorecem a formação de uma torta densa e viscosa, denominada “lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo de ETA)”.

As características qualitativas e quantitativas do lodo de ETA podem variar de acordo com o processo de tratamento, dos métodos de operação da ETA (periodicidade de limpeza dos decantadores e filtros e da dosagem de produtos químicos), entre outros fatores, que estão relacionados às condições físico-químicas do ambiente aquático, às condições físico-climáticas locais, à formação geológica onde o manancial está inserido e ao uso e ocupação do solo da área da bacia hidrográfica em termos de atividades impactantes dentro do espaço territorial de influência.

O lodo de ETA contém metais pesados que, quando dispostos de forma inadequada, podem gerar severos impactos de ordem ambiental e social. Por este fato, atualmente os órgãos ambientais de fiscalização requerem as empresas do setor de saneamento o

gerenciamento para disposição final adequada destes lodos, gerando co-responsabilidade e comprometimento no manejo dos recursos naturais utilizados.

Devido esses lodos serem por natureza heterogênea e não apresentarem grande variação física, química e mineralógica, pesquisas de incorporação em cerâmica vermelha têm apontado como possível solução para destinação ambientalmente correta. Além disso, suas características possuem relações diretas com os produtos que são desenvolvidos e comercializados atualmente pelas indústrias de materiais cerâmicos. Salienta-se que essa ação contribui para o aumento da vida útil dos aterros sanitários, para melhoria da qualidade da água a jusante da captação, contribuindo positivamente na redução do consumo de argilas.

Na região Oeste do Paraná, há possibilidades econômicas e grande potencial industrial para incorporação de lodo de ETA em concentrações admissíveis em argilas para produção de cerâmica vermelha. Para aceitação comercial de um novo produto, é de fundamental importância a realização de estudos tecnológicos que visem identificar os métodos para utilização, bem como, sua eficácia do ponto de vista do processo de produção, da qualidade do produto, da viabilidade financeira, do impacto ambiental agregado, com requisito de atender as normas e legislações aplicáveis.

Portanto, este trabalho teve por objetivo principal o desenvolvimento de métodos para utilização do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, de Foz do Iguaçu/PR, como matéria-prima para produção de cerâmica vermelha. Para atingir a finalidade da pesquisa, os objetivos específicos foram os seguintes: a) caracterizar quatro argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha, especificamente tijolos (Cerâmica Santa Rita - argilas OP e OA) e artefatos artesanais (Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu - argilas AP e AA), juntamente com o lodo gerado na ETA Tamanduá; b) realizar misturas binárias entre as argilas da Cerâmica Santa Rita da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu, e avaliar os materiais produzidos por ensaios físico-mecânicos, visando definir as melhores misturas; e, c) incorporar porcentagens do lodo da ETA Tamanduá às massas definidas para avaliar nos materiais produzidos, a carga máxima admissível perante os requisitos técnicos de qualidade propícias para reaproveitamento em cerâmica vermelha.

Nesta pesquisa verificou-se que o setor do saneamento vem buscando continuamente soluções para disposição adequada do lodo gerado em ETA. Esta é uma ação a salutar contra os impactos ambientais causados pelo setor, fundamental para melhoria contínua do sistema de gestão ambiental ISO 14000. Busca-se neste trabalho contribuir no processo de pesquisa da SANEPAR/SANETEC, apresentando alternativas de reaproveitamento do lodo gerado na ETA Tamanduá em cerâmica vermelha como método de destinação final.

A dissertação esta subdividida em 5 capítulos. No capítulo 2 está descrita a contextualização teórica que apresenta os pilares do processo de tratamento de água, geração de resíduos e métodos para destinação final, contemplando estudos alternativos de incorporação de lodos em cerâmica vermelha, com fundamentação teórica em tecnologia de argilas e processos de produção de materiais cerâmicos.

O capítulo 3, descreve os materiais e métodos utilizados para as coletas e caracterização das matérias-primas, bem como, o plano de misturas entre as argilas e incorporação de porcentagens peso de lodo nas composições que apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas.

O capítulo 4 apresenta os principais resultados obtidos e discutidos com base nos requisitos técnicos e normas para cerâmica vermelha.

No capítulo 5, encaminham-se as considerações finais e sugestões para a continuidade e desenvolvimento de novos trabalhos. Na sequência relacionam-se as referências utilizadas no estudo.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A contextualização teórica está subdividida em tópicos relacionados ao processo de tratamento de água, aos princípios de geração dos resíduos em decantadores, contemplando as principais alternativas utilizadas para disposição final do lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA). Como proposta de disposição final do resíduo, vinculou-se aos conceitos de tecnologias de argilas, processos de produção de cerâmica vermelha, sustentando assim, o pilar principal que é a incorporação do lodo gerado na ETA Tamanduá (Foz do Iguaçu/PR) em matriz de cerâmica vermelha como método alternativo de destinação ambientalmente adequada.

2.1 TRATAMENTOS DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LODOS

Os serviços de tratamento e abastecimento de água são responsáveis pelo fornecimento de água de boa qualidade, dentro nos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004). Para que essa meta seja atingida, na escolha do manancial de captação de água para tratamento e abastecimento, a qualidade da água deve ser analisada por uma série histórica, periódica, que revele através de suas condições físico-químicas e microbiológicas, a necessidade ou a dispensabilidade de qualquer processo de tratamento, destacando que deverá contemplar somente os processos imprescindíveis para purificação da água (RICHTER & AZEVEDO, 2003).

Na maioria dos municípios brasileiros, a poluição dos recursos hídricos tem contribuído significativamente para alteração da qualidade da água de abastecimento público, o que impulsiona utilizar tecnologias avançadas em processamento para tratamento de água em escala produtiva industrial, bem como, o uso de novos produtos químicos e/ou com elevadas concentrações, tendendo a gerar aumento nos custos operacionais e maiores quantidades de lodos residuais com concentrações elevadas de metais pesados (PENALVA REALI, 1999).

Segundo Sabogal-Paz & Di Bernardo (2005), a produção de resíduos no setor do saneamento representa um sério problema para as instituições que gerenciam tais sistemas, considerando que no Brasil, existem restrições para disposição final, conforme a Resolução

CONAMA ° 357 (2005), Norma NBR 10.004 (2004), Lei nº 9433 (1997), Lei nº 9.605 (1998), entre outras leis específicas aplicáveis aos estados brasileiros distintamente. Por isso, instituições do setor vêm buscando gerenciar seus resíduos, decorrente de exigências legislativas, e fazendo cumprir com requisitos normativos de Gestão Ambiental ISO 14000, que em seu escopo de ações, busca-se a redução na geração de resíduos e a destinação ambientalmente correta.

Segundo Sabogal – Paz & Di Bernardo (2005), para escolha do método de tratamento dos resíduos gerados em ETA's, os fatores a serem considerados são:

- Estudos preliminares nos processos de tratamento de água, analisando o funcionamento hidráulico, a operação e a manutenção das unidades de filtração e de decantação, a dosagem de produtos químicos, o mecanismo de coagulação e a vazão de operação do sistema;
- Análises dos resíduos gerados em laboratório e/ou em escala piloto, considerando suas características qualitativas e quantitativas;
- Características da água bruta a ser tratada e da tecnologia adotada;
- Tecnologia de tratamento prévio do lodo, considerando as condições climáticas da região, acondicionamento, área necessária para implantação e vazão de operação;
- Método escolhido para aproveitamento e disposição do lodo considerando a distância da ETA até a destinação final;
- Experiências e tecnologias disponíveis na região, estado ou país;
- Custos de investimentos iniciais, futuros e disponibilidade de recursos humanos capacitados, além das despesas de operação, manutenção e administração do sistema;
- Condições sócio-econômicas, culturais, institucionais e normativas da região.

Sendo assim, para escolha do processo de tratamento de água, há necessidade de um conhecimento prévio e histórico, das características físico-químicas e microbiológicas da água bruta, cuja finalidade, é determinar os procedimentos específicos a serem adotados para purificar a água com economia e distribuir com padrão de qualidade.

2.1.1 Processos Convencionais de Tratamento de Água

A maioria das ETA's utilizam o processo convencional para tratamento em função das águas brutas apresentarem graus elevados de turbidez e cor, com presença de matérias

coloidais, conduzindo os processos de tratamento para que ocorram de acordo com as seguintes fases sucessivas: mistura rápida (coagulação química), floculação, decantação, filtração e desinfecção para posterior distribuição.

Segundo Richter & Azevedo (2003), os termos coagulação e floculação são usados freqüentemente como sinônimos, significando o processo integral de aglomeração de partículas. Entretanto, é na mistura rápida que ocorre a dispersão do coagulante na água, um processo de aglutinação e precipitação que reduzem as forças de repulsão, a qual tende a manter separadas as partículas em suspensão. Para que a dispersão do coagulante na água seja a mais homogênea possível, é comum o uso do dispositivo hidráulico denominado *Calha Parshall*, que além de proporcionar a mistura rápida, possibilita a medição da vazão afluente, condicionando a adição líquida precisa de coagulante por m³ de água a ser tratada (HUDSON & WOLFNER, 1967, citado por GUERRA, 2005).

São dois fenômenos envolvidos no processo de coagulação: o químico e o físico. O químico está presente nas reações com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, que dependem da concentração do metal e do pH final da mistura. O físico influi no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água. Este processo tem como finalidade, melhorar a remoção de substâncias coloidais dissolvidas na água. São vários os coagulantes químicos utilizados nas estações de tratamento de água a base de sais de alumínio e ferro, como exemplo, o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), o cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), o sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e o sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Recentemente foi lançado no mercado o Policloreto de Alumínio (PAC) que é um coagulante inorgânico, catiônico e pré-polimerizados. Esse coagulante possui cadeias de polímeros pré-formadas, exibindo uma alta concentração de carga catiônica na unidade polimérica. A velocidade de formação dos flocos é superior aos coagulantes tradicionais, não pré-polimerizados, garantindo aos flocos maior peso e conseqüente precipitação mais rápida e eficiente (CARDOSO, 2006).

A fase de floculação tem a função de promover a aglomeração de partículas desestabilizadas de tamanho coloidal, de forma a induzir movimentos causados, pelo gradiente de velocidade gerado e por floculador hidráulico ou mecânico, (RICHTER & AZEVEDO, 2003). Na coagulação as forças primárias são de natureza eletrostática, e na floculação as ações das partículas desestabilizadas formam pontes químicas, conceituadas forças de Van der Waals. Macroscopicamente a floculação transforma as partículas

coaguladas de tamanho sub-microscópico em tamanhos visíveis, para que a remoção seja realizada por ação da gravidade principalmente na fase de decantação.

No processo de decantação prevalecem forças gravitacionais para remoção das partículas com densidades superiores à da água, depositando-se em uma superfície ou zona de armazenamento. As partículas que não são removidas no processo de decantação, sejam pelo seu pequeno tamanho ou por sua densidade ser próxima a da água, sua remoção deverá ser realizada na fase de filtração (RICHTER & AZEVEDO, 2003).

A filtração é um processo de separação sólido-líquido, que envolve fenômenos físicos, químicos e às vezes biológicos, pois, buscam retirar impurezas presentes na água pela passagem em meio poroso. Os maiores problemas no meio filtrante são decorrentes da saturação de conglomerados que induzem a paralisação do processo para lavagem de filtros, onde geram-se sólidos diluídos chamados de “águas de lavagem de filtros” (RICHTER & AZEVEDO, 2003).

2.1.2 Geração de Lodo nas ETAs

No processo convencional de tratamento de água, os resíduos denominados lodos de ETA, são gerados nos decantadores e nos filtros. De acordo com Castro et al (1997), a vazão média de resíduos gerados em ETA's é de 1 a 3% da vazão tratada. Em termos volumétricos, segundo Ferreira Filho (1997), a maior quantidade de resíduos gerados são provenientes da água de lavagem de filtros. No entanto, em termos mássicos, as maiores quantidades de lodo provêm dos decantadores. Cada linha geradora de resíduos apresenta características diferenciadas, quanto à vazão e composição de sólidos (SABOGAL-PAZ & DI BERNARDO, 2005).

Segundo Richter (2001), na coagulação da água para remoção de cor e turbidez com sais de alumínio e ferro, 60 a 95% dos flocos formados são removidos pelas unidades de decantação e o restante retidos nos filtros, dependentemente da natureza física e química da água bruta, da eficiência hidráulica das unidades de processo e do tipo e dosagem do coagulante aplicado.

A remoção do lodo dos tanques de decantação pode ser contínua ou intermitente. A primeira forma é a preferida para instalações de sistemas com grande capacidade. A concentração de sólidos no lodo decantado aumenta com o tempo de retenção. Tanques de decantação horizontal de limpeza manual, podem ter o lodo acumulado entre 2 a 3 meses.

Nestes casos, a concentração de sólidos é geralmente alta, enquanto que, a unidade de remoção contínua apresenta menores concentrações, aproximando-se das águas de lavagem de filtros. A concentração de sólidos contidos na água de lavagem de filtros é dependente da quantidade de flocos carregada para o filtro (RICHTER, 2001).

O lodo formado a partir da utilização do sulfato de alumínio é caracterizado como sendo uma suspensão não newtoniana, gelatinosa, cuja fração de sólidos, é constituída de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, colóides de cor e outros resíduos orgânicos, inclusive bactérias e outros organismos que são removidos no processo de coagulação. Em geral, o conteúdo de sólidos totais no lodo de tanques de decantação varia entre 1.000 à 40.000 mg/l (0,1 a 4%) e na água de lavagem de filtros entre 40 à 1.000 mg/l (0,004 a 0,1%). Normalmente, entre 75 à 90% destes valores representam sólidos suspensos e 20 à 35% compostos voláteis (RICHTER, 2001).

Os lodos são basicamente produtos da coagulação dos constituintes orgânicos e inorgânicos, dissolvidos e suspensos na água bruta, com composição físico-química característica dos produtos utilizados no processo, principalmente na fase de coagulação, correção de pH e abrandamento para remoção da dureza. De modo geral, as características do lodo variam de acordo com a natureza das águas brutas, dos processos unitários e produtos químicos utilizados (RICHTER, 2001).

A geração de lodo em ETA é resultado dos processos que fazem a remoção de impurezas indesejáveis no produto final, estando inclusos: areia, silte, compostos orgânicos em solução ou estado coloidal, íons que causam dureza, microorganismos e outras substâncias que reduzem a qualidade da água produzida (AWWA, 1996).

2.1.3 Características do Lodo de ETA

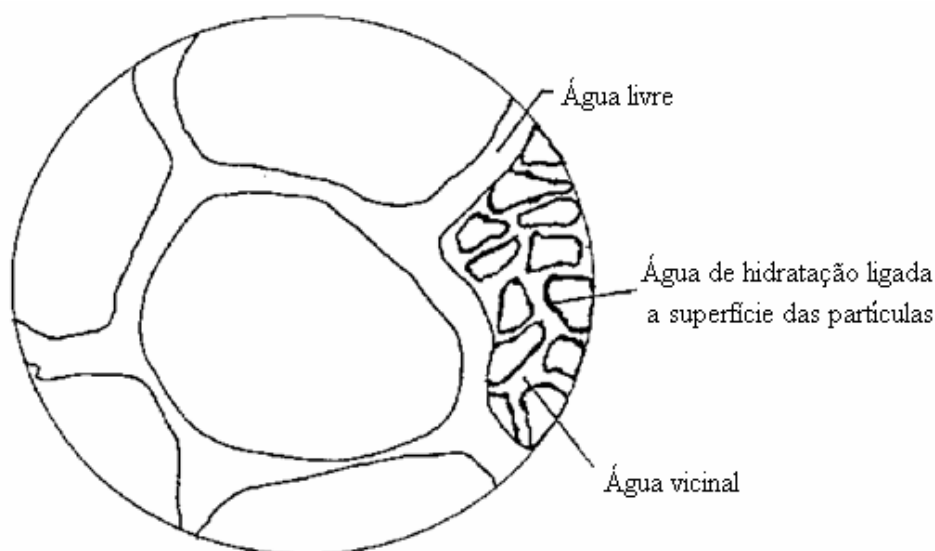
Nas fases de tratamento de resíduos, tanto a eficiência quanto a viabilidade técnica dos processos de adensamento e desaguamento, dependem primordialmente das características do lodo, devido os resíduos em seu estado natural apresentarem dificuldades para remoção da água presente nas partículas do lodo, uma vez que, as variáveis associadas a esse processo, segundo Paz-Sabogal & Di Bernardo (2005), são explicadas a seguir:

- A hidratação das partículas pode formar uma película líquida, carregada negativamente, impedindo a aproximação das mesmas para que se aglutinem;

- As partículas de lodo carregadas eletricamente e tendem a se repelir em vez de formar flocos, e;
- A agitação durante seu processamento pode reduzir o tamanho médio dos flocos e, conseqüentemente, aumentar a área superficial das partículas impondo maior resistência à separação das fases sólidas e líquidas.

A Figura 2.1 apresenta a definição de Penalva Reali (1999), sobre os diferentes estados físicos da água presente nas partículas de solos, bem como, nas partículas de lodo em ordem crescente de dificuldade de separação:

- Água livre: água que está adsorvida no material sendo em abundancia. Pode ser perdida facilmente nas temperaturas próximas da ebulição.
- Água intersticial ou capilar: água ligada mecanicamente que se encontra presa aos interstícios dos flocos;
- Água vicinal: constituídas por diversas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, que se encontram firmemente presas a superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação: água ligada quimicamente à superfície das partículas sólidas;



Fonte: Adaptado de Technology Transfer Handbook Management of Water Treatment Plant Residuals. 1996.

Figura 2.1 – Distribuição física da água na partícula do lodo de ETA

Os lodos geralmente estão diluídos em água, necessitando serem submetidos a operações unitárias que realizem o adensamento das partículas, deixando-as com pequenas parcelas de água presentes. Para tal função, o adensamento faz indução dos sólidos à

precipitação, separando assim, grande parcela dos sólidos da fase líquida. Para o adensamento do lodo, o tipo de coagulante químico exerce influência sobre a capacidade de adensamento, sendo necessário o uso de testes preliminares com diversos coagulantes químicos, que indicará a seleção perante melhores resultados (TEIXEIRA et al, 1999). Estudos mostraram que a umidade do lodo ao sair do sistema de desidratação, é de no mínimo 70%, o que implica em custos nos transportes e restrições para disposição final em aterros sanitários (CORDEIRO, 1993; ANDREOLI et al, 2003; PAIXÃO, 2005, RICHTER, 2001).

A análise do tamanho das partículas é fundamental para previsão da redução do volume ao retirar a umidade do lodo. O tamanho das partículas depende de alguns fatores, como: natureza da matéria contida nas águas brutas, tipo de coagulante e eficiência no processamento, floculação, eficiência de sedimentação, formas de remoção de lodo dos decantadores, tratamento prévio de desidratação e natureza do polímero utilizado na desidratação (COORDEIRO, 1993).

A porosidade da massa do lodo influencia na resistência específica, ou seja, se a porosidade do meio é baixa, os canais por onde a água passa serão pequenos, tornando resistente a saída da água, constituindo um fator fundamental na desidratação do lodo. Sua determinação pode ser feita através da comparação da água dentro dos vazios, medidos pela quantidade de sólidos secos na massa do lodo (COORDEIRO, 1993).

2.1.4 Alternativas de Tratamento Prévio, Desidratação e Disposição do Lodo

Existem diferentes alternativas de tratamento prévio para disposição final do lodo que merecem destaque, principalmente se tratando do possível aproveitamento em processos produtivos de materiais passíveis de serem utilizados, sendo os principais descritos a seguir:

- O método de **adensamento**, segundo Richter (2001), deve ser realizado após remoção dos lodos dos decantadores, os quais possuem água distribuída livremente nas partículas e que necessitam serem retiradas para redução do volume da torta. A viabilidade do adensamento consiste na produção de uma torta concentrada de sólidos, mais adequada para prosseguir com seu tratamento. O adensamento dos lodos gerados nas ETA's pode ser feito por gravidade, flotação com ar dissolvido ou adensadores mecânicos por tela (ASCE, 1996). Após o adensamento existem várias tecnologias aplicáveis a desidratação do lodo.

- A desidratação de lodos dispostos em **lagoas** ocorre nas três seguintes fases: drenagem, evaporação e transpiração. Algumas experiências têm mostrado que a drenagem é

independente da profundidade da lagoa, ressaltando-se que a evaporação é um dos principais fatores para “desidratação” (AWWA, 1991). Vários são os fatores que devem ser avaliados como critérios de projeto, pois o tempo para desidratação pode variar principalmente em função do clima, da permeabilidade do solo, das características do lodo, da profundidade da lagoa, da área superficial, entre outros. Ressalta que as lagoas podem ser naturais ou construídas através de diques ou escavações que possuam sua localização próxima às ETA's, com condições geofísicas e topográficas adequadas.

- Os **Leitos de Secagem** são utilizados na remoção de águas e obedecem basicamente os mesmo critérios de projetos destinados à secagem de lodos de estações de tratamento de águas residuárias industriais e sanitárias. Pesquisas para remoção de água dos lodos em leitos de secagem têm sido efetuadas desde 1900, quando verificou-se que lodos digeridos desidratavam-se mais rapidamente do que os lodos brutos (FERRANTI et al, 2005).

- Para **Desidratação Mecânica do Lodo** existem diversos equipamentos atualmente disponíveis no mercado brasileiro, citam-se em ordem crescente de custo, e que atendem a exigências de uma torta com 15 a 35% de sólidos, os seguintes:

- ✓ Prensa desaguadora;
- ✓ Centrífuga;
- ✓ Filtro prensa;
- ✓ Filtro rotativo a vácuo;

As tecnologias atualmente disponíveis para secagem de lodos realizam uma ou mais combinações dos seguintes princípios:

- (a) Separação por sedimentação em um campo de forças gravitacionais, centrípeta; e
- (b) Filtração, quando os sólidos são grandes o suficiente para serem retidos num meio ou superfície filtrante.

A aplicação do primeiro princípio (a) inclui o adensamento por gravidade, a flotação e a centrifugação. O filtro a vácuo, o filtro prensa e a prensa desaguadora são aplicações do segundo princípio (b).

A Tabela 2.1 a seguir, adaptada de Richter (2001), apresenta as características destas tecnologias e as principais vantagens e desvantagens dos equipamentos ou processos de desidratação de lodos utilizados, com ênfase para a prensa desaguadora e a centrífuga, que recentemente tem mostrado os processos mais adequados para lodos provenientes da coagulação da água.

Tabela 2.1 – Principais tecnologias de desidratação mecânica do lodo

Técnica	Generalidades Práticas	Aplicações	Limitações	Custo Relativo
Prensa desaguadora	Apropriada para secagem de lodos provenientes da coagulação da água. A eficiência da prensa depende das características do lodo em seu acondicionamento, do tempo de prensagem e da pressão aplicada pelas telas e de seu tipo de abertura da malha.	Capaz de obter um lodo relativamente seco, com 40-50% de sólidos secos. Lodo de sulfato de alumínio 15-20 %.	Sua eficiência é muito sensível às características da suspensão. As correias podem se deteriorar na presença de material abrasivo	Baixo
Decantação centrífuga ou centrifugas de tambor	Essa tecnologia já aperfeiçoada e funciona paralelamente com o uso de polímeros no condicionamento, têm expandido seu emprego no tratamento de lodos de coagulantes metálicos. Seu princípio de funcionamento é o de uma centrífuga que força os sólidos a se concentrar junto as paredes do cilindro, enquanto o líquido clarificado é drenado por passagens próximas ao eixo.	Capaz de obter um lodo desidratado com 15-35% de sólidos. Lodo de sulfato 16-18%. Lodos de cal desidratam mais facilmente. Taxa de captura de sólidos entre 90 e 98%. Adequada para áreas com limitações de espaço.	Não tão efetiva na desidratação. Médio como a filtração. O tambor está sujeito a abrasão.	Médio
Filtro Prensa	O sistema de filtro prensa para remoção de água de lodos funciona de forma intermitente. O lodo é introduzido em câmeras, onde “telas” filtrantes estão alojadas. Através de aplicação de pressões diferenciais, inicia-se a compreensão do material sobre o meio filtrante, fazendo com que o filtrado seja removido, formando-se na câmara uma mistura com teor elevado de sólidos, usualmente denominado “torta”.	Usado para desidratar sedimentos finos. Capaz de obter torta com 40-50% de sólidos em lodos com cal, com uma taxa de captura em até 98%.	Necessita de aplicação de cinza e cal. A elevação do pH a 11,5. Troca do meio filtrante é demorada. Elevado custo operacional e de energia.	Alto
Filtro Rotativo a vácuo	Não funciona bem com lodos leves como o de sulfato de alumínio, mesmo com o condicionamento por polímeros. O lodo não é retido pelo tecido do filtro e os poros da tela são obstruídos muito rapidamente. Fazendo-se um pré-revestimento da tela com terra diatomácea, porém com custo operacional elevado.	Mais indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35 – 40% de sólidos e uma torta de captura entre 88 à 95%.	É o método menos eficaz de filtração. Elevado consumo de energia.	Muito Alto

Fonte: Adaptado de Richter (2001).

• **Aplicação em Solos** deverá ser determinada em função das características físicas e químicas específicas para cada lodo, principalmente pela existência de nutrientes benéficos às culturas e por ausência de contaminantes (Dayton et al, 2001). O lodo por ser gerado em processos de tratamento físico-químico, não envolvendo processos biológicos, deve ser demonstrado suas eficiências através de experimentos específicos para aplicação diretamente no solo em benefício agrícola. Apesar de conter certo teor de matéria orgânica, os lodos de ETA's normalmente não são atrativos para disposição direta no solo, segundo requisitos

técnicos de concentração de metais pesados para plantas, a exemplo, a presença excessiva de alumínio proveniente principalmente do coagulante utilizando no processo de coagulação.

- **Disposição em Aterros Sanitários.** No Brasil, a NBR 10.004 tem sido utilizada para licenciar e operar aterros sanitários, estendendo-se seus conceitos para enquadramento dos lodos de ETA's e ETE's e suas respectivas disposições. As caracterizações realizadas em alguns estudos (SABESP, 2002, SANEPAR 2006) enquadraram os lodos das ETA's como sendo de Classe II, não inerte. A disposição do lodo em aterros é uma alternativa conhecida e segura para a saúde pública e ambiental, quando corretamente projetado e operado, podendo essa prática ser viabilizada a partir de aterros existentes ou da implantação de aterros exclusivos. No caso de aterros particulares ou municipais, a disposição dos lodos desidratados implica em custos de transporte e disposição e, no caso de aterros exclusivos, em custos de implantação, operação e transporte até o local.

- **A Disposição Final do Lodo de ETA na Rede Coletora de Esgoto** é um método consideravelmente adequado, porém, sua utilização depende de fatores econômicos e logísticos, como a existência de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) nas proximidades da ETA com condições técnicas operacionais de receber os resíduos e ter disponibilidade adequada para seu transporte desde a ETA até a ETE (BRINK et al, 2005).

A princípio, o envio de lodos de ETA para ETE é uma solução tecnicamente viável, uma vez que as operações de tratamento de ambas as fases sólidas serão concentradas em uma única unidade de tratamento, com significativa economia de escala nos custos operacionais. No entanto, considerando que as ETE's podem possuir diferentes concepções com respeito a seus processos unitários, cada um deles deveram ser avaliado individualmente quanto aos seus prováveis impactos no tocante ao processamento dos sólidos suspensos totais (SST), bem como, na eventual interferência nos processos biológicos de tratamento aeróbio e anaeróbio (Brinck, 2005). Deve ser enfatizado que a disposição de lodo de ETA em ETE não representa uma solução a custo zero, uma vez que, mesmo sendo possível o processamento de uma maior quantidade mássica de lodo, a ETE terá que ser preparada para o aumento do volume de lodo a ser processado em seu sistema de desidratação, e prevendo custos de transporte e disposição final.

Esta alternativa é particularmente atraente quando não há áreas disponíveis na ETA para a implantação do sistema de tratamento de lodos (adensamento e desidratação) ou quando a ETA se encontra em área densamente urbanizada, onde o transporte do lodo desidratado por caminhões pode causar transtornos ao trânsito local. Brink et al. (2005) demonstraram através de ensaios de laboratório a possibilidade de lançar o lodo da ETA

Guaraú/SP diretamente na rede coletora de esgoto da ETE Barueri, ambas operadas pela Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP). Decorrente da inviabilidade de construção de um sistema de tratamento de lodo na própria ETA, por falta de espaço físico, a solução encontrada e analisada foi a de lançar na rede coletora de esgoto. Neste trabalho, pode-se concluir que houve um acréscimo de 20 a 30% de massa de sólidos na torta de lodo gerado na ETE, além do tempo de filtração ter aumentado próximo de 100%. Entretanto, os autores citam que existem ajustes a fazer em escala real para que essa prática seja realizada com sucesso.

• **Incineração.** É um método dispendioso, sendo que os custos podem chegar a R\$ 2.000,00 por tonelada de lodo desidratado (SABESP, 2002). Algumas análises efetuadas demonstraram que o lodo de ETA tem baixo poder calorífico, gerando aproximadamente 10 a 15% de cinzas a 600 °C (SABESP, 2002). O método é uma alternativa muito dispendiosa, por não eliminar a fase de desidratação dos lodos e, por não resolver integralmente o problema, já que restam cinzas a serem dispostas em aterros, apesar de que diminui significativamente seus volumes finais.

• **Toxicidade do Alumínio no Meio Ambiente.** Várias pesquisas apontam seus efeitos negativos quando lançados no meio ambiente sem controle. Segundo Cornwell (1987), citado por Cordeiro (1993), pesquisas utilizando peixes da espécie *S. Trutta*¹, mostram que dosagens entre 0,2 e 0,5 mg/L de alumínio causaram sintomas de apatia e inabilidade para se manterem em equilíbrio, coloração escurecida tendendo a morte. AWWA (1987), citado por Cordeiro (2001), identificou-se no monitoramento biológico das águas que o alumínio provoca alterações na estrutura macro-bentônica.

Mendes de Meneses et al (2005), evidenciaram a alteração das características físico-químicas do rio Avenca/PB, ao receber continuamente o lodo gerado no decantador da ETA Pedra do Fogo. A investigação procedeu-se no sentido longitudinal do rio partindo do ponto de lançamento até 200 metros a sua jusante. Detectou-se em sete meses de monitoramento, alterações significativas das concentrações de alumínio para rio de Classe II e valores superiores aos limites de cor, segundo resolução CONAMA 357/05. A partir destas informações pôde-se evidenciar que a poluição dos recursos hídricos mediante o lançamento de lodo gera riscos à população que utiliza o rio como bem público.

Os lodos provenientes de ETA contêm concentrações elevadas de metais pesados, sobretudo de alumínio e ferro (HALL & HALL, 1989; BARBOSA, 2000), que ao serem

¹ Peixe da Europa e da Ásia (*S. trutta*), encontrado geralmente em rios de áreas montanhosas, tendo sido introduzido nas Américas e na Austrália; (*Truta-salmoneja*)

lançados "*in natura*" em cursos d'água, pode induzir toxicidade aos organismos aquáticos e aumentar a degradação destes ambientes, considerando que estes efluentes além de conterem metais pesados, possuem elevadas concentrações de sólidos, alta turbidez e potencial de demanda química de oxigênio (DQO), que são indícios críticos para causar o assoreamento do curso d'água e alterações biológicas na cor e na composição química da água vazante. Tem sido argumentado que os lodos gerados nos decantadores e nos filtros originam-se da água bruta e, por isso, devem retornar a sua fonte. Em termos de carga total, este argumento só faz sentido se lançado na mesma proporção de entrada, porém, essa prática torna-se inviável frente à adição de produtos químicos e concentrações superiores encontradas na água bruta (LIN et al, 1984).

Segundo Cordeiro (1993), os lodos de ETA possuem grandes concentrações de alumínio, apresentadas na Tabela 2.2. Esse material quando disposto com baixa velocidade nos rios ou lagos, poderá causar alterações, principalmente nas camadas bentônicas, podendo inviabilizar o lançamento de lodos de ETA em cursos d'água. No entanto, esta atividade em muitos países gera enormes quantidades de resíduos que são descartados diariamente nos corpos hídricos (WANG et al, 2005).

As alternativas para reutilizar o lodo contendo sulfato de alumínio como agente auxiliar no processo de floculação, foi pesquisada e identificou-se eficiente (CORDEIRO, 1981).

Vários trabalhos foram realizados para classificar o lodo de ETA conforme a NBR 10.004 – RESÍDUOS SÓLIDOS, concluíram que o lodo pode ser classificado como resíduo sólido de Classe II – não perigoso, não inerte e não patogênico (OLIVEIRA, et al, 2004; GUERRA, 2005). Pesquisas de disposição alternativa de lodos de ETA foram desenvolvidas e estão apresentadas a seguir como requisito base para a presente investigação.

2.1.5 Estudos de Reaproveitamento de Lodo de ETA em Matriz Cerâmica

O setor de saneamento vem buscando soluções práticas de reciclagem e reutilização dos resíduos gerados no processo de tratamento de água. Sabe-se que, quando disposto de forma inadequada poderão ocasionar severos impactos de ordem ambiental e social, por outro lado, em função das propriedades físicas e químicas dos lodos serem por natureza heterogênea, há possibilidade de serem reaproveitados de forma a agregar valor ao resíduo e dispor de forma ambientalmente correta.

O trabalho de Andreoli et al (2003), teve por objetivo principal a caracterização do lodo gerado na ETA Passauna/PR. O lodo foi amostrado por um período de dois meses consecutivos, cuja finalidade foi detectar a possível variação nas suas características. Identificou-se que o teor médio de umidade do lodo após centrifugação foi de 87% e pH 6,7. A perda ao fogo foi relativamente alta, em torno de 50%, e elementos químicos majoritários encontrados foram Al_2O_3 (23,6%), SiO_2 (14,1%) e Fe_2O_3 (8,4%), conforme apresentado na Tabela 2.2. Hoppen et al (2005), dando continuidade a este trabalho, observou-se através de análises termogravimétricas perda de massa média de 87% à 25 e 1000 °C. A massa específica do lodo resultou em $1,06 \pm 0,01$ mg/L, dentro da faixa para lodos contendo 12% de sólidos, sendo 1,03 mg/L a 1,08 mg/L. Na incorporação de lodo em matriz de concreto, verificou-se que é possível incorporar no máximo 7% para produção de artefatos e estruturas pré-moldadas até pavimentos em concreto. Concluiu-se então que, a utilização do lodo reduz o consumo de matérias primas naturais tais como: areia, brita e cimento, diminuindo paralelamente a extração de recursos naturais, como também, a disposição final que na maioria dos casos se faz a jusante do próprio manancial de captação.

Oliveira et al (2004), detectou em seu estudo de caracterização do lodo gerado na ETA de Campos de Goytacazes/RJ, fases cristalinas referentes a caulinita, quartzo e gibsita, com indícios de mica e muscovita. Do ponto de vista químico, verificou-se que o lodo é constituído basicamente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que corresponde a cerca de 80,4% de todos os elementos químicos detectados (TABELA 2.2). A perda ao fogo encontrada foi de 16,9%, o pH pode ser considerado neutro 6,5, e os índices de Atterberg detectado foram os seguintes: LP % (55), LL % (73), e IP % (20). O lodo apresentou morfologia irregular das partículas e larga distribuição de tamanho entre 1 a 425 μm . As características do lodo apresentaram-se próximas as das argilas encontradas na região de Campos de Goytacazes, e os autores concluíram que o lodo é adequado para utilização em argilas de cerâmica vermelha, porém, em concentrações específicas.

Wolf et al (2007), detectou no lodo da ETA Cenibra/MG, uma perda ao fogo na ordem de 17,1%, relacionada com a presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica. Detectou-se que os elementos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , representaram 80,6% de todos os detectados na análise química (TABELA 2.2). Verificou-se que o lodo possui predominância de caulinita, com presença de quartzo, mica, hematita e gibsita, goethita, muscovita e rutilio. A análise granulométrica do lodo mostrou que 50% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 5,4 μm . O diâmetro equivalente médio das partículas foi de 9,3 μm , sendo que 90% delas com diâmetros inferiores a 23,9 μm . Os índices de Atterberg mostraram que a

plasticidade foi de 22%, sendo classificada contendo elevada plasticidade. Deste trabalho concluiu-se que, o lodo pode parcialmente substituir argilas para formulação de massas cerâmicas.

Detectou-se no trabalho de Teixeira et al (2006), os seguintes principais argilominerais presentes: montmorilonita, quartzo, óxido de titânio, gipsita e caulinita. Através da análise gravimétrica, verificou-se que o lodo perde massa na ordem de 25%, e pode ser adicionado em até 10% de lodo em massas para cerâmica vermelha sem causar deformações na peça, mantendo a resistência à flexão na ordem de 22 kgf/cm², em temperatura de 950 °C e com aumento da densificação da massa após sinterizada na temperatura de 1200 °C, elevando-se sua resistência para 33 kgf/cm². Os resultados de absorção de água e porosidade aparente diminuíram com o aumento da temperatura, em função da densificação do corpo de prova pela formação da fase vítrea. Quando adicionados em até 10% de lodo em massa de argila para fabricação de cerâmica vermelha, no caso de telhas e tijolos, os requisitos foram atingidos.

Monteiro et al (2007), estudou as características do lodo gerado na ETA de Campos dos Goytacazes e detectou-se na análise química dos elementos que o SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ são majoritários (TABELA 2.2). Verificou-se que, o lodo possui 86,5% dos grãos com diâmetro menor que 2 µm, 5,5% na faixa de 2-20 µm, 7,6% para 20-200 µm e 0,4% >200 µm. Identificaram-se nos difratogramas as fases predominantes da caulinita. O índice de plasticidade do lodo encontrado foi de 27,1, o que indicou características de argila plástica. Quando o lodo foi misturado à massa cerâmica, verificou-se que a absorção de água foi maior nas temperaturas de sinterização de 700 e 900 °C, diminuindo bruscamente quando sinterizada a 1000 °C, fator preponderante na densificação do corpo cerâmico contribuindo no aumento da resistência mecânica, na ordem de 19 kgf/cm².

No trabalho de aproveitamento de lodo em cerâmica vermelha desenvolvido por Paixão (2005), cujo objetivo foi testar a incorporação de lodo em massa cerâmica para verificar a interação e possibilidade de utilização do resíduo como forma de destinação final, observou-se que, com a adição do lodo na mistura de argila, produziu-se alterações das propriedades mecânicas em comparação aos corpos cerâmicos produzidos somente com argilas puras. Identificou-se que as partículas de lodo atuaram como inclusões amorfas na massa argilosa até 1000 °C, o que favoreceu a fratura do corpo cerâmico, diminuindo assim a resistência. Entretanto, foi possível adicionar até 10% de lodo à matriz cerâmica, na qual as propriedades apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos para cerâmica vermelha para construção civil.

Sabbag et al (2003), realizou o estudo de reutilização de lodo da ETA de Cubatão em misturas de argilas para produção de blocos cerâmicos. Descobriu que o lodo pode ser incorporado em até 12,5% à massa de argila, em função dos valores obtidos de resistência a compressão dos blocos idênticos aos obtidos somente com argila, com baixa retração e resistência a compressão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7171/95.

Na Tabela 2.2, observa-se que o lodo quando submetido a sinterização em elevadas temperaturas (~1000 °C), ocorre a perda de massa, caracterizando ser uma matéria com indicativo de deformação e retração, devido a presença de matéria orgânica e elementos fundentes a baixa temperatura.

Tabela 2.2 – Exemplo de composição química dos lodos de ETA's já caracterizados

Óxidos dos Elementos Químicos	Oliveira et al (2004)	Ferranti, et al (2005)	Andreoli et al (2003)	Wolff et al (2007)	Hoppen et al (2005)	Monteiro et al (2007)	Paixão (2005)
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO₂	35,92	37,28	14,10	37,70	16,55	24,68	12,55
Al₂O₃	31,71	25,63	23,62	30,50	13,07	30,39	8,57
Fe₂O₃	12,79	9,97	8,39	12,40	4,15	11,59	72,90
TiO₂	1,10	0,84	0,35	1,00	0,19	0,90	-
MnO	0,09	0,05	-	0,30	0,22	-	0,54
MgO	0,37	0,74	0,15	0,40	0,15	0,17	-
CaO	0,10	0,29	0,33	0,20	0,43	0,16	5,23
Na₂O	0,06	0,09	0,02	0,20	0,04	-	-
P₂O₅	0,35	0,75	0,34	0,30	0,26	-	-
Perda ao Fogo	16,93	25,15	49,01	17,10	49,79	30,67	15,00

Ressalta-se que as pesquisas com lodo de ETA são recentes no Brasil e estão crescendo positivamente para o avanço científico e tecnológico, contribuindo com soluções práticas para disposição final e redução de impacto ambiental.

2.2 ARGILAS E MATERIAIS CERÂMICOS

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que adquire certo grau de plasticidade após ser umedecida com água, rígida após a secagem, e quando sinterizada em temperaturas elevadas adquire propriedades de resistências e de interação química mineralógica (SANTOS, 1989).

As argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas, com número restrito de minerais conhecidos como argilominerais. Uma argila pode ser composta por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de diversos

argilominerais. Quimicamente, são constituídas por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo certos teores de elementos alcalinos e alcalinos-terrosos (SANTOS, 1989).

As argila são pertencentes a um grupo de partículas do solo, onde dimensões encontram-se em uma faixa de granulação fina, formadas geologicamente na crosta terrestre pela desintegração de rochas ígneas sob a ação incessante dos agentes atmosféricos e intemperismos. A origem mais comum das argilas é resultado da decomposição dos feldspatos, minerais existentes nos granitos e pórfiros, entretanto, a argila pode se formar igualmente a partir de gnaisses e micaxistos (SANTOS, 1989).

As diferentes espécies de argilas, consideradas puras, são na verdade misturas de diferentes hidrossilicatos de alumínio denominados materiais argilosos. Os materiais argilosos são unidades estruturais simples e se diferenciam uns dos outros pela diferente relação entre alumina e sílica estrutural e pela quantidade de água de constituição. São muitos os minerais argilosos, entretanto, os mais importantes para fabricação de produtos cerâmicos são: a caulinita, a montmorilonita e a illita, todas com estrutura lamelar ou foliácea (PETRUCCI, 1998).

Os constituintes do solo são classificados pelo tamanho de suas partículas. Portanto, a argila como sendo “solo” apresenta características marcantes de plasticidade quando suficientemente úmidas. Facilmente molda-se em diferentes formas e quando seca, apresenta coesão suficiente para constituir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos. Suas propriedades são determinadas pelas frações de grãos com diâmetro máximo inferior a 0,005 mm (CAPUTO, 2003).

O uso de argilas no ramo da cerâmica vermelha é tão antigo ou mais do que a cerâmica branca. A argila é utilizada para fabricação de inúmeros materiais utilizados para construção civil, tais como: tijolos, telhas, ladrilhos de pisos, manilhas, elementos vazados, cerâmica utilitária entre outros.

Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de compósitos que incluem: matérias-primas naturais, matérias-primas beneficiadas, e matérias-primas sintéticas de características controladas. Por meio de um processamento adequado, as propriedades dessas matérias primas são alteradas em termos de composição em estrutura cristalina, bem como, no arranjo das diversas fases dos componentes (textura ou microestrutura e na forma externa).

Geralmente, em pelo menos uma etapa do processamento, os materiais são submetidos a temperaturas elevadas para que as propriedades úteis desejadas desenvolvam-se. Os materiais cerâmicos constituem-se por uma fase vítrea ou por uma fase cristalina.

A fase cristalina pode ser um monocristal ou um policristal e pode ser formada por um sistema constituído por vidros e cristais, denominado vitrocerâmicos. Podem ainda, conter metais (cermetos) ou polímeros (abrasivos) substituindo total ou parcialmente a fase vítrea e os compósitos. Assim, as interpretações das propriedades físicas e químicas dos materiais cerâmicos deveram ser feitos em termos: a) da identidade das fases constituintes; b) do arranjo das fases componentes (microestrutura); e, c) do grau de perfeições das fases componentes em relação aos defeitos estruturais.

A complexidade das matérias-primas cerâmicas (argilas) e dos materiais cerâmicos processados exigem que a tecnologia cerâmica esteja familiarizada com as técnicas e métodos modernos, tais como: a fluorescência de raios X, a difração de raios X, a microscopia eletrônica de varredura, a microscopia óptica, os ensaios mecânicos de precisão, entre outros (SANTOS, 1989).

A produção de materiais cerâmicos compreende etapas de manufatura e processamento, para que adquiram propriedades úteis desejadas. As principais etapas do processamento podem ser agrupadas da seguinte forma:

(I) preparação das matérias primas: a) redução da granulometria das partículas por forças mecânicas; b) fracionamento granulométrico; e c) mistura ou dispersão para promover um íntimo contato entre as partículas.

(II) conformação, moldagem e fabricação: densificação, compactação, moldagem para conformação.

(III) processamento térmico: nesta etapa são obtidas transformações desejadas em estrutura e composição, pela ação da energia térmica. O processamento térmico pode ocorrer em diferentes pontos da manufatura desde o pré-tratamento das matérias-primas até etapa de sinterização. O processamento térmico pode subdividir-se em: secagem, sinterização e fusão, (SANTOS, 1989).

(IV) acabamento: é o tratamento final da peça cerâmica para torna - lá utilizável em uma finalidade específica. Este tratamento pode incluir cobertura, polimento e galvanoplastia.

Nas indústrias cerâmicas, a matéria-prima que forma composições básicas das massas, encontram-se fragmentadas ou particuladas em pós. Portanto, grande parte dos fatores que controlam o processamento da fabricação dos materiais cerâmicos é dependentes das propriedades físicas e químicas das partículas componentes das matérias-primas (SANTOS, 1989).

2.2.1 Caracterização de Argilas e Ensaios Tecnológicos

A caracterização tecnológica de argilas trabalha com todos os testes laboratoriais voltados para avaliação do comportamento dos materiais argilosos durante o processamento cerâmico. Segundo Dondi (2006), a principal dificuldade encontrada nos testes de desempenho tecnológico e interpretação dos dados é a grande dependência do comportamento da argila em relação aos seguintes fatores:

- Características intrínsecas: composição química ou mineralógica, distribuição do tamanho de partículas, massa específica real dos grãos, limites de consistência de Atterberg, etc;
- Condições específicas de processo adotadas nas fases dos experimentos;
- Avaliação direta do comportamento tecnológico dos materiais cerâmicos nas simulações laboratoriais dos ciclos de fabricação de materiais como: pisos, tijolos, porcelanas, etc; e
- Determinação das características de composição das matérias-primas em comparação com as argilas normalmente usadas pelas indústrias cerâmicas, assumindo que estas argilas comportam-se adequadamente ao processo de produção.

Todos estes estudos levam a economia de matéria-prima, evitando desperdícios, com relação aos custos e à melhoria da qualidade do produto final. De forma geral, para a compreensão das influências no campo de informações da linha de pesquisa de cerâmica vermelha, apresentaram-se os principais fatores como base teórica e aplicada.

2.2.1.1 Propriedades das partículas do solo

A natureza das partículas do solo são constituídas por grãos minerais, (argilominerais), podendo conter substâncias orgânicas que são compostos de oclusão, que em contato com água em determinado tempo de repouso, podem interagir com os argilominerais por meio de adsorção física (forças fracas de atração de Van der Waals) ou adsorção química (troca de íons), como também, podem não ocorrer interações, onde todas as três situações tenderão ao equilíbrio (BARBA et al, 1997). Todavia, quando a substância orgânica fizer uma monocamada ou policamada sobre os argilominerais, seja por adsorção física ou química, obtêm-se propriedades tecnológicas de grande interesse para fabricação de materiais

cerâmicos, em função da ligação das partículas formarem as massas plásticas que influenciaram na melhor moldagem da massa cerâmica (SANTOS, 1989).

As argilas geralmente possuem granulometria bastante fina. As investigações sobre as propriedades das frações muito finas das argilas destacam que a superfície da partícula sólida possui uma carga negativa de intensidade que depende primordialmente de suas características mineralógicas. As atividades físicas e químicas decorrentes dessa carga superficial constituem as denominadas atividades superficiais dos minerais. Dos três grupos minerais argílicos, as caulinitas menos ativas, as illitas intermediárias, e as montmorilonitas mais ativas (CAPUTO, 2003).

Caputo (2003), definiu a atividade dos solos pela razão: $A = IP / (\% < 0,002 \text{ mm})$, entre o Índice de Plasticidade e a porcentagem em peso de partículas menores que 0,002 mm. Em função do valor dos índices das argilas, classifica-se em inativas se $A < 0,75$, normais se $0,75 < A < 1,25$ e ativas se $A > 1,25$, sendo as primeiras, freqüentemente, as que se formam nos depósitos de água doce.

Os minerais argilosos são de natureza majoritária coloidal, e quando dispersos em um líquido permanecem suspensas e não sedimentam. O sistema coloidal, na fase de dispersão são inferiores a 1µm, sendo freqüentemente encontrado tamanho compreendido entre 0,2 a 0,005µm. As partículas que compõem o sistema coloidal estão submetidas a diferentes tipos de forças como a de Wan der Waals, as eletrostáticas, as hidrodinâmicas, sendo o comportamento destes sistemas muito sensíveis aos conjuntos de interações produzidas por estas forças (BARBA et al. 1997).

O tratamento de uma argila que contém sais solúveis e mudam os cátions trocáveis adsorvidos, fornecem um meio para alterar algumas propriedades do sistema argila + água, pois, as forças de interação ou ligação entre as partículas são alteradas e a natureza da água adsorvida na superfície das partículas dos argilominerais podem ser modificadas. Assim, as propriedades da água adsorvida são diferentes da água comum, devido à grande pressão a que estão submetidas decorrente de forças eletrostáticas de adsorção. Um fenômeno importante, denominado troca de cátions, refere-se a faculdade das partículas coloidais de permutarem os cátions adsorvidos em sua superfície (CAPUTO, 2003). Quando a argila entra em contato com a água, as moléculas são polarizadas (H^+ , OH^+), e as partículas sólidas atraem seus íons positivos H^+ , formando assim, uma película de água adsorvida denominada camada adsorvida, ou seja, as moléculas de água pela distribuição assimétrica dos seus átomos comportam-se como dipolos elétricos, sendo elas atraídas pelas partículas de argila, que possuem uma carga elétrica negativa conforme apresentado na Figura 2.2.

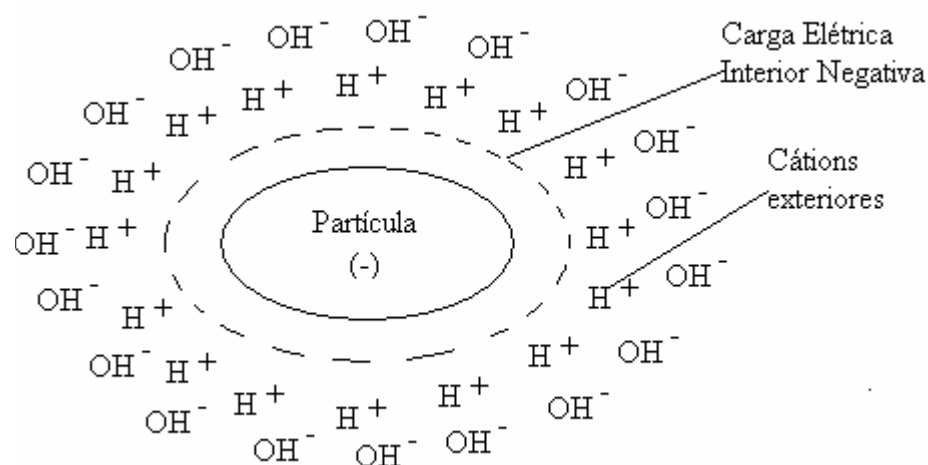


Figura 2.2 – Ilustração da molécula de água comportando-se como dipolo elétrico.

Para descrever o estado físico dos solos, utiliza-se do estudo de consistência, considerando o grau de ligação entre as partículas correspondentes ao teor de umidade que contribui diretamente para modificação das propriedades de uma argila, bem como, da composição mineralógica, tamanho de grão e superfície específica (CAPUTO, 2003).

As argilas de granulometria muito fina são altamente plásticas, entretanto, argilas de granulometria grosseira, contendo pequena quantidade de montmorilonita ou de matéria-prima orgânica rica em ácidos húmicos podem ser plásticas. Por outro lado, folhelhos argilosos, argilitos e argilas tipo *flint*, somente após moagem adquirem granulação fina. Argilas contendo apreciáveis quantidades de minerais como, por exemplo: a areia – diminui a plasticidade da massa. É usual utilizar o limite de plasticidade para determinar a porcentagem mínima de água a ser adicionada ao sistema argila + água para formar uma massa plástica (SANTOS, 1989).

As propriedades de plasticidade dependem do teor de umidade, da forma das partículas e de sua composição química e mineralógica. Suas características consistem na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade sem variar suas propriedades, bem como, sob determinada tensão. Diz-se que o sistema é “elástico” quando recupera sua forma e seu volume primitivo e/ou ao aplicar ação das forças externas que o deformam. Em contraposição, diz-se “plástico” quando não recupera seu estado original ao cessar a ação deformante. O fato de um corpo se comportar como “elástico” ou como “plástico” depende da intensidade das forças aplicadas e da precisão do grau de observação (VAN VLACK, 1973).

• **Limites de Atterberg.** Por definição, a plasticidade é a propriedade que um sistema possui em se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada. A plasticidade em argilas é resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e da ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares, que se desenvolvem quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma película de água rígida (não líquida), mais um pouco de água líquida (não orientada), que atua como meio lubrificante, facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras, assim que uma tensão tangencial externa for aplicada. A relação entre as quantidades de água “rígida” e “líquida” expressas percentualmente em relação à massa de argila seca, determina o limite de plasticidade de Atterberg, fato que, a água age não somente como um meio inerte para separar as partículas dos argilominerais, mas também, podendo variar a intensidade das forças de atração-repulsão entre elas, o que exercendo um papel ativo para a propriedade de plasticidade (BARBA et al, 1997).

A plasticidade em mecânica dos solos costuma ser avaliada pelos limites de Atterberg divididas em: limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade. Sendo o limite de liquidez determinado pela capacidade do solo ser facilmente moldado, uma vez que à água se evapora e a massa endurece para determinado teor de umidade (h), diminuindo a capacidade de fluir, porém, ao ser moldado têm-se a conservação da sua forma no estado plástico, ou seja, no limite de liquidez ($h = LL$). Com a perda contínua de umidade (h), a característica do solo plástico desaparece até o limite de plasticidade ($h=LP$), o solo se desmancha ao ser trabalhado, estando no estado semi-sólido. Ainda no processo de secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido. O limite entre os dois estados é um teor de umidade, chamado de limite de contração ($h=LC$). A Figura 2.3 ilustra esquematicamente os estados físicos chamados estados de consistência e suas fronteiras, ou seja, limites de consistência de Atterberg (CAPUTO, 2003).



Figura 2.3 – Estados de consistência para solos em função do teor de umidade.

Determinou-se originalmente por Atterberg, o cálculo do teor de umidade (% h), quando o solo começa a fraturar-se, sendo assim, obtém-se a moldagem do solo com um cilindro sob uma placa fosca, denominado Limite de Plasticidade. Este ensaio foi padronizado pela ABNT sendo NBR-7180/84, Solo-determinação Limite de Plasticidade. A determinação do Limite de Liquidez (LL) foi padronizada pela ABNT como NBR-6459/84. Denomina-se o índice de plasticidade pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade:

$$IP = LL - LP \quad (2.1)$$

Com esse índice pode se definir o grau em que o solo encontra-se no estado plástico, máximo para argilas e mínimo para as areias, critério eleito com base em características granulométricas, argilominerais presentes, entre outras propriedades de caráter de certos solos argilosos. Portanto, quando um material não tem plasticidade, como exemplo a areia, apresenta-se nulo frente ao índice de plasticidade, logo, consideram-se não plástico ou desplastificante (IP=NP)

- **A Distribuição Granulométrica** orienta o uso das argilas, o qual influencia nos comportamentos de conformação, secagem e sinterização. Destaca-se que as propriedades devem ser também relacionadas com argilominerais presentes e as características de plasticidade da massa (BARBA et al, 1997). De acordo com as dimensões das partículas, são determinadas as frações constituintes dos solos que recebem designações próprias. Segundo a escala granulométrica Brasileira (ABNT), as frações são: Pedregulhos (o conjunto de partículas cujas dimensões estão compreendidas entre 76 e 4,8 mm), Areia (entre 4,8 e 0,05 mm, silte entre 0,05 e 0,005 mm;) e Argila (inferior a 0,005 mm). Entretanto, segundo a escala internacional AASHO, compreendem as argilas com diâmetro de grãos < 2 µm, silte variando de 2 µm < d < 60 µm e areia > 60 µm. A análise granulométrica determina as dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, representadas graficamente por um diagrama semi – logarítmico, onde na abscissa são marcados os logarítmicos das dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas, marcam-se as porcentagens peso de material (CAPUTO, 2003).

- **A Massa Específica Real dos Grãos** (g/cm³), é o peso específico das partículas do solo (γ_g), cuja massa da substância (P_s) é dividida pelo volume ocupado, (V_s), equação 2.2.

$$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s} \quad (2.2)$$

O método do picnômetro foi utilizado para esse ensaio na mecânica dos solos, reconhecido pela ABNT – MB – 28. Os valores médios são diretamente dependentes dos constituintes mineralógicos, dadas pelas densidades dos minerais orgânicos e inorgânicos presentes, diminuindo sua massa para solos com elevado teor de matéria orgânica e crescendo para solos com elevado teor de óxidos de ferro. Os limites para argila de cerâmica vermelha é geralmente na faixa de 2,5 a 2,8 g/cm³ (SANTOS, 1989).

2.3 CERÂMICA VERMELHA E VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO

Defini-se cerâmica como uma rocha artificial obtida pela moldagem, secagem e sinterização de argilas ou de misturas contendo argilas. Do grego – *keramos* significa coisa queimada, logo a cerâmica é o produto feito de argila submetida ao tratamento térmico em elevadas temperaturas.

De acordo com Van Vlack (1973), para a engenharia, os materiais cerâmicos abrangem uma grande variedade de substâncias e aplicações, tais como: tijolos, cimento, vidros, louças de mesa, refratários, abrasivos, isolantes dielétricos, artísticos, etc. As propriedades dos materiais cerâmicos variam muito em função das propriedades fundamentais das partículas individuais, ou seja, das quais interferem distintamente sobre o sistema produtivo em inúmeros processos de fabricação. Em geral, os materiais cerâmicos são duros e frágeis, bons isolantes elétricos e térmicos, e possuem geralmente temperaturas de fusão relativamente altas e grande estabilidade química em muitos ambientes hostis, devido à estabilidade das suas fortes ligações químicas (SMITH, 1998).

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em dois grupos: as cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas. Normalmente, as cerâmicas tradicionais são obtidas a partir de três componentes básicos: argila, sílica, e feldspato. Os tijolos e telhas utilizados na indústria de construção, e a porcelana elétrica usada na indústria elétrica, são exemplos de cerâmicas tradicionais, por outro lado, as cerâmicas técnicas ou avançadas são fabricadas habitualmente a partir de compostos puros ou quase puros, tais como óxidos de alumínio (Al₂O₃), o carbetto de silício (SiC) e o nitreto de silício (Si₃N₄), entre muitos outros. Como exemplos de cerâmicos em tecnologia de ponta, citam-se o carbetto de silício, utilizados em motor de turbina a gás em automóveis que permanecidos em zonas de altas temperaturas por períodos constantes (SMITH, 1998).

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos, formados por elementos metálicos e não metálicos que, quando submetidos a tratamento em altas temperaturas, formam reações quimicamente complexas, originando mais de um tipo de ligação, podendo ser iônicas, covalentes e de Van der Waals (VAN VLACK, 1973)

A unidade primária estrutural dos silicatos é o tetraédro de silicato (SiO_4), no qual um átomo de silício é coordenado intersticialmente entre quatro átomos de oxigênio. As forças que os unem neste tetraédro são intermediárias entre ligações covalentes e iônicas, conseqüentemente, esses átomos permanecem fortemente ligados. (SMITH, 1998). A fórmula química da unidade dessa estrutura é Si_2O_5 . Essas camadas de silicatos podem se ligar a outros tipos de camadas estruturais, pois, em cada tetraedro de silicato existe um oxigênio não ligado. Por exemplo: a camada de silicato carregada negativamente pode ligar-se com uma camada de $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$ carregada positivamente para formar uma camada dupla de caulinita (KINGERY, 1976). Esse mineral em sua forma pura consiste em lâminas muito pequenas em formato mais ou menos hexagonal, cujas dimensões médias são aproximadamente 0,7 e 0,05 μm de espessura (SMITH, 1998).

Os efeitos da presença de sílica como elemento majoritário nas argilas utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos são: aumento da brancura do produto, redução da plasticidade pela baixa interação química quando em contato com a água, redução do tempo de secagem e aumento da temperatura de sinterização (BARBA et al, 1997).

2.3.1 Processamento de Materiais Cerâmicos

Todos os produtos cerâmicos tradicionais e técnicos devem passar por estágios durante a fabricação, incluindo a preparação de massas, conformação, secagem e sinterização com diferentes instrumentos e tecnologias. Para este trabalho, duas principais linhas tecnológicas foram consideradas para simular em escala laboratorial a fabricação de cerâmica vermelha, especificamente de pisos cerâmicos, tijolos e telhas conforme apresentado na Tabela 2.3.

- Para **preparação das matérias-primas**, cada material cerâmicos a ser fabricado, o conhecimento do processamento específico e do comportamento das matérias-primas é de vital importância para o desenvolvimento de novos produtos e processos cerâmicos. O processo de fabricação de materiais cerâmicos é voltado inicialmente para extração das matérias-primas em suas jazidas, que na maioria dos casos é onde as empresas cerâmicas estão instaladas.

Tabela 2.3 – Linhas de produção e processamento de materiais cerâmicos

Estágios de produção	Tijolos e Telhas	Pisos Cerâmicos
% de argila	80-100	Vermelha 60 - 80
Preparação das massas	Misturador, laminador, Moagem a seco	Moagem a seco
Conformação	Extrusão (15 a 25% de água)	Prensagem (4 a 8% de água)
Secagem	Lenta (12 - 36 horas, ou mais)	Rápida (<1 hora)
Esmaltação	Não esmaltada	Normalmente esmaltado
Queima	Tijolo: 850 – 1100 °C com 12 - 60 horas	Forno Corpo poroso ~1100 °C /30 - 45` Corpo denso ~1200 °C /45 - 90`

Fonte: Adaptado de Dondi, 2006.

Após a extração, há várias possibilidades de preparação e beneficiamento. Geralmente as argilas são depositadas em locais abertos, na forma de lotes que passam por processos de maturação (envelhecimento), onde adquirem propriedades provenientes do clima e da radiação solar. Esses fatores corrigem os efeitos das pressões sobre as argilas, influenciando-as na fermentação das partículas orgânicas quando em contato com o oxigênio do ar. Essa fase é também conhecida como apodrecimento ou sazonalidade que é de fundamental importância tecnológica, vista que, quanto mais envelhecida for a argila, menor é a quantidade de areia e vegetais presentes, isto é, estará melhor homogeneizada para o processamento de materiais cerâmicos (KINGERY, 1976).

Na fabricação de produtos a base de cerâmica vermelha em pequenas empresas o destorroamento é geralmente realizado por processos rudimentares, as quais utilizam pás, enxadas, picaretas, etc. Por outro lado, em processos mais modernos empresas de grande porte empregam britadores, moinhos desintegradores e pulverizadores, que desaglomeram as partículas com maior eficiência.

No processamento industrial, a moagem das matérias-primas para cerâmica vermelha, têm como principal tarefa reduzir o tamanho das partículas para promover uma melhor homogeneidade entre as matérias-prima que constituem a massa. A distribuição do tamanho de partículas junto a outras características como, forma e estado de agregação, influenciam diretamente nas propriedades do produto final. A moagem mais intensa aumenta a porcentagem de partículas finas, levando a um maior empacotamento dos grãos na conformação da peça, e conseqüentemente numa menor porosidade à verde. Entretanto, se a massa processar por muito tempo e as partículas ficarem com tamanho reduzido, aumentará o número de contatos superficiais, que aceleram o processo de coalescência em fase líquida no processo de vitrificação. Portanto, quanto menor for o tamanho das partículas, melhor será o

empacotamento dos grãos que proporcionaram menor porosidade, retração linear e maior resistência mecânica (BARBA et al. 1997). A fase posterior é o amassamento, que objetiva tornar a matéria-prima mais plástica e homogênea possível com a adição de água, determinada pelos índices de Atterberg.

• **Conformação e fabricação:** densificação, compactação e moldagem das matérias primas, podem ser desenvolvidas por vários métodos. As matérias-primas para os produtos cerâmicos variam com as propriedades exigidas para a peça cerâmica final. As partículas e os ingredientes tais como: ligantes e lubrificantes podem ser misturados úmidos ou secos dependendo do objetivo do material cerâmico (SMITH, 1998). A peça conformada deve apresentar uma resistência mecânica suficiente para permanecer intacta durante as operações de transporte, secagem e sinterização (SMITH, 1998).

Para cada produto cerâmico, há processos específicos de preparação para dar forma ao artefato. Os principais equipamentos básicos e processos utilizados na fabricação de materiais cerâmicos estão listados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Equipamentos básicos de laboratório para simulação industrial do processo cerâmico, principais parâmetros de operação e propriedades tecnológicas

Linhas de produção	Estágios de Produção	Equipamentos básicos	Principais parâmetros a serem controlados	Propriedades tecnológicas a serem medidas
Tijolos e Telhas	Preparação da massa	Laminador, moinho de martelo	Quantidade de água, peneiramento, mistura de trabalho	Distribuição de tamanho de partículas mistura de trabalho
	Conformação	Extrusora	Taxa de extrusão, taxa de compressão	Plasticidade
	Secagem	Secador	Temperatura e umidade relativa	Contração na secagem, sensibilidade na secagem, resistência a flexão
	Queima	Forno com gradiente	Ciclo, tempo, temperatura e posição no forno	Contração de queima, absorção de água, densidade relativa e resistência a flexão
Pisos Cerâmicos	Preparação da massa	Moinho planetário	Carga no corpo, meio moedor, classificação do moinho de martelo	Distribuição do tamanho de partículas viscosidade, quantidade de água na mistura
	Conformação	Prensa hidráulica	Umidade de pós, sequência de prensagem, pressão, temperatura, umidade relativa	Expansão na prensagem, resistência a flexão do corpo verde, densidade relativa, compressibilidade do pó
	Secagem	Secador	Temperatura, umidade relativa	Contração na secagem, resistência a flexão do corpo seco
	Queima	Forno com gradiente	Ciclo, tempo, temperatura	Contração, absorção de água, densidade relativa, resistência a flexão

Fonte: Adaptado de Dondi, 2006

A seguir está descrito alguns dos principais processos para produção de materiais de cerâmica vermelha.

• **Moldagem:** é a operação que da forma desejada à pasta de cerâmica. Há quatro processos de moldagem:

- | | | |
|---|---|---|
| ✓ | | A |
| | seco ou semi-seco (com 4 a 8% de umidade); | |
| ✓ | | D |
| | a pasta plástica consistente (com 20 a 35% de umidade); | |
| ✓ | | C |
| | om pasta plástica mole (com 25 a 40% de umidade); e | |
| ✓ | | C |
| | om pasta fluida (com 30 a 50% de umidade); | |

O uso de um ou outro processo depende do tipo e característica da matéria-prima, do formato e constituição do produto acabado e do tipo de forno a ser empregado.

O processo de **Moldagem com Massa Fluida** é utilizado pela suspensão da massa vertida em moldes porosos de gesso que absorvem a água, onde argila fica aderida nas paredes. Quando seca, a peça se retrai e se descola. São processos usados para confecção de porcelanas, louças sanitárias, peças para instalação elétrica, entre outras.

• **Moldagem com Massa Plástica** é um processo bastante antigo e artesanal. A massa cerâmica é conformada em moldes de madeira ou no torno de oleiros. Atualmente há processos mais modernos que os manuais. São utilizados para fabricação de vasos, tijolos brutos, pratos, xícaras, etc.

• **Moldagem com Massa Plástica Consistente, Extrusão** é uma técnica de produção associada a uma elevada produtividade, principalmente de produtos de seção transversal constante (tijolos) e muito importante em termos de homogeneização e retirada de ar da massa. O método de extrusão consiste em forçar a massa a passar, sob pressão, por um bocal apropriado. Para tanto, é necessário que as argilas possuam elevada plasticidade para melhorar o produto final extrudado, ou seja, deve-se trabalhar com limite de liquidez máximo da massa para que haja o deslizamento das partículas sobre as paredes do equipamento. Logo, a umidade é um importante fator que influencia na plasticidade, pois, ao passar pela hélice da extrusora, a massa tende a fluir pelo centro da fieira com maior velocidade. Depois de formada, corta-se a coluna da massa no comprimento desejado, por uma guilhotina formada de arames presos a um esquadro de madeira ou metal. Como o processo incorpora muito ar, que irá se dilatar na sinterização, causando fendilhamento, ou até a desagregação da peça, na

extrusora acopla-se uma câmara de vácuo, que fará a retirada desse ar, aumentando a superfície de contato entre as partículas, diminuindo assim a porosidade. Esse processo é usual para fabricação de telhas, tijolos, tubos cerâmicos e refratários. Podendo ser fabricadas peças ocas, fazendo passar as massas no estado plástico, através de uma matriz de extrusão, como exemplo, têm-se tijolos refratários, coletores de esgoto, telhas de canudo, cerâmicas técnicas e isoladores elétricos (RIBEIRO et al, 2003).

- **A Prensagem a Pó** é um método bastante utilizado, e que garante um tratamento rápido para fabricação de produtos com composições de argilas, tanto de alta como de baixa plasticidade, incluindo cerâmicas convencionais e magnéticas. Em essência é uma massa pulverizada, contendo geralmente uma pequena quantidade de água ou de outro elemento aglutinante, compactando-se na forma desejada sob pressão. O grau de compactação é maximizado e a fração de espaço vazio é minimizada pelo uso de partículas maiores e mais finas misturadas em proporções apropriadas (SMITH, 1998).

As matérias-primas cerâmicas sobre a forma de partículas podem ser prensadas no estado seco, plástico e úmido, no interior da matriz que confere a forma dos produtos.

Na fabricação de cerâmica vermelha, existem variações das características em relação às estações do ano, as condições climáticas que influenciam em algumas fases do processo, como no caso da secagem e da sinterização. Portanto, deve-se haver controle com alto rigor e cuidados para obter produtos com características finais de qualidade dentro dos limites desejáveis.

- **A Moldagem a Seco** tem por finalidade a obtenção de materiais com alta resistência mecânica a verde e baixa contração linear. Recomenda-se manter o controle da granulometria, para que na prensagem haja íntimo contato entre as partículas, trabalhando com pressões elevadas, na ordem de 5 a 70 kgf/cm², de tal forma que o material cerâmico a verde fique o mais compactado possível, com valores de massa específica em torno de 1,95 e 2,0 g/cm³. É importante que a massa cerâmica contenha porcentagem de umidade no processo de preparação, visando à obtenção da melhor homogeneidade e ao aumento do contato entre as partículas no momento de compactação da peça cerâmica. Esse processo é realizado para fabricação de azulejos, pisos, refratários, isoladores elétricos, tijolos e telhas de superior qualidade (VERÇOSA, 1994).

2.3.2 Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos em temperaturas elevadas constituem importante fator na fabricação dos produtos cerâmicos, pois alteram as propriedades de peso e volume, e promovem a movimentação dos átomos que aceleram a velocidade de difusão, reduzindo assim, a porosidade e a área específica do material. Os tratamentos utilizados são basicamente: secagem e sinterização

- **Secagem** é a etapa principal do processo, pois, o tempo de perda de umidade para o ambiente não pode ser tão rápido a ponto de danificar o produto com trincas e empenamentos, decorrentes da variação de volume. Portanto, nos estágios iniciais do processo de secagem, as partículas de argilas estão virtualmente envolvidas e separadas umas das outras por uma fina película de água. Com o progresso da secagem e a remoção da água, a separação inter-partículas diminuirá, manifestando-se na forma de contração de volume. A secagem nas regiões internas de um corpo de prova é realizada através da difusão das moléculas de água para a superfície por evaporação. Se a taxa de evaporação for maior que a taxa de difusão, a superfície irá secar mais rapidamente do que no interior, com uma grande probabilidade de haver defeitos formados, logo, deve-se diminuir a taxa de evaporação para que ocorra a difusão da água. A taxa de evaporação da água pode ser controlada pela temperatura, umidade e taxa de escoamento do ar (CALLISTER, 1999).

A secagem é tão importante quanto à sinterização, porque após a moldagem, ainda permanece 5 a 35% de água. O tijolo comum conserva-se em até um quilo de água após a moldagem. Se a cerâmica for colocada para sinterizar com umidade em seu interior, ocorrerá o aparecimento de trincas e deformações. Por isso, faz-se necessário secar o material previamente, que pode levar de 3 a 6 semanas quando secas em condições naturais. Entretanto, existem processos de secagem forçada para reduzir o tempo. A secagem resultará na retração da peça cerâmica, e conseqüentemente levará a deformação da peça, se não for bem conduzida. A água retida dos poros não causa deformação, porém, dá lugar a bolhas de ar que pode interferir nas propriedades de resistência mecânica e porosidade (SMITH, 1998).

- A finalidade da etapa de **Sinterização** é aglomerar as partículas, de forma a densificar o material e melhorar a resistência mecânica. As operações de sinterização trazem alterações bastante significativas ao produto cerâmico: (1) redução da área específica total; (2) redução do volume aparente e; (3) aumento da resistência mecânica (VAN VLACK, 1973).

Durante o processo de sinterização, as partículas se unem em contato mais íntimo, o que reduz a porosidade. Os átomos dos grãos pequenos são transferidos para os maiores, e os poros são preenchidos por materiais sólidos. Segundo Van Vlack (1973), essa transferência de massa pode ocorrer por quatro mecanismos distintos, mas algumas vezes simultâneos:

- ✓ A sinterização pode provir de um escoamento viscoso ou plástico;
- ✓ Pode ocorrer a difusão, não somente ao longo dos contornos dos grãos ou entre as partículas, mas também no interior dos grãos;
- ✓ Materiais altamente voláteis evaporam nas superfícies convexas e se condensam nas superfícies côncavas, devido aos diferenciais de pressão-vapor; e
- ✓ Da mesma forma, a energia superficial do sólido no líquido é maior nas superfícies convexas do que nas côncavas.

No processo de sinterização, ocorre a formação da fase líquida, influenciando na coalescência entre as partículas dos argilominerais, preenchendo parte do volume dos poros. O grau de vitrificação depende da temperatura e do tempo de sinterização, bem como, da composição mineralógica da massa que compõe a peça. A fase fluida escoar ao redor das partículas não fundidas que permanecem no meio e preenchem os poros, como resultado de força de tensão superficial. Nesse processo, a coalescência das partículas influencia na redução de volume da peça cerâmica. Com o resfriamento, a fase fundida forma uma matriz vítrea que resulta em um corpo denso e resistente (CALLISTER, 1999).

2.4 TÉCNICAS ESPECTROMÉTRICAS

2.4.1 Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF)

A análise multielementar instrumental por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseada nas medidas das intensidades (números de raios X por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada. (NASCIMENTO FILHO, 1999).

O espectrômetro por dispersão de energia por comprimento de onda, ou seja, a fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) emprega um mono-cristal difrator de espaçamento inter-planar, utilizado para dispersar o feixe policromático colimado de comprimentos de onda que provem da amostra, de modo que cada um destes comprimentos de onda seja difratado num ângulo específico, de acordo com a lei de Bragg (JENKINS, et al, 1981).

Para incitar a emissão de raios X característicos dos elementos que constituem a amostra, a excitação pode ser feita de várias maneiras: excitação por partículas aceleradas

como elétrons, prótons ou íons; excitação por raios X, partículas alfa, partículas beta negativas ou raios gama emitidos por radionuclídeos, além do processo mais utilizado até recentemente, que é a geração em tubos. Entretanto, tem-se utilizado também fontes radioativas de baixa energia emissoras de raios X e/ou gama de baixa energia (^{55}Fe , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{238}Pu , ^{241}Am) substituindo os tubos de raios X na excitação, tornando a análise ainda mais simples, barata e de maior facilidade de operação, mas com a desvantagem de perda de sensibilidade analítica (NASCIMENTO FILHO, 1999).

Quando um elemento de uma amostra é excitado, este tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, de energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X.

Para haver produção de raios X característicos há necessidade de se retirar elétrons localizados nas camadas mais internas dos átomos, por exemplo da camada K, e para isto a energia mínima deve ser superior a energia de ligação do elétron nessa camada, denominada energia de ligação eletrônica ou também de corte de absorção .

A técnica ED-XRF vem sendo utilizada principalmente para amostras sólidas, permitindo a determinação simultânea ou seqüencial da concentração de vários elementos, sem a necessidade de destruição da amostra, ou seja, de modo instrumental, sem nenhum pré-tratamento químico.

2.4.2 Difração de Raios X (XRD)

A técnica difração de raios X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X (CULLITY, 1978).

Nos materiais cristalinos os átomos estão arranjados em um reticulado que se repete tridimensionalmente. Assim, cada estrutura cristalina é baseada num dos possíveis reticulados espaciais. Um reticulado espacial é um arranjo infinito de pontos que tem a mesma

vizinhança. O espaçamento entre os pontos equivalentes no cristal é similar ao comprimento de onda dos raios X, e a estrutura pode, portanto, difratar os raios. No processo se um feixe de raios X, com uma dada frequência, incidir sobre um átomo isolado, elétrons desse átomo serão excitados e vibraram com frequência do feixe incidente, estes elétrons vibrando emitirão raios X com a mesma frequência do feixe incidente, ou seja, o átomo isolado espalha o feixe incidente de raios X em todas as direções. A soma resultante de toda a radiação espalhada fornece umas poucas reflexões mais intensas em direções específicas pela sobreposição estrutural regular. Por outro lado, quando os átomos estão regularmente espaçados em um reticulado cristalino e a radiação incidente tem comprimento de onda deste espaçamento, ocorrerá interferência construtiva em certas direções e interferências destrutivas em outras (CULLITY, 1978).

Nessa estrutura, os átomos funcionam como obstáculos, ou centros de espalhamento dos raios X. Os cristais são formados quando bilhões e bilhões de estruturas idênticas são colocadas lado a lado. Desse modo, formam-se famílias de planos atômicos, separadas por distâncias inferiores a 1 nm. O conceito de reflexão é uma forma matemática de interpretar o processo de difração. A reflexão ocorre se existem planos espaçados regularmente através da estrutura com separação d , e posições definidas pelo arranjo de unidades de repetição estrutural. A reflexão é possível, no entanto, apenas quando o feixe de raios X forma o ângulo θ , com o plano definido pela lei de Bragg. Os feixes refletidos por dois planos subsequentes apresentarão o fenômeno da difração. Isto é se a diferença entre seus caminhos óticos for um número inteiro de comprimentos de onda, haverá superposição construtiva (um feixe de raios X será observado); caso contrário, haverá superposição destrutiva, e não se observará qualquer sinal de raios X.

A expressão $n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$ é conhecida como a lei de Bragg e desempenha papel fundamental no uso da difração de raios X para estudos cristalográficos

2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste basicamente de uma coluna ótico-eletrônica (canhão de elétrons e sistema de redução do diâmetro do feixe eletrônico), da unidade de varredura, da câmara para amostra, do sistema de detectores e do sistema de visualização de imagens. O canhão de elétrons é usado para produção do feixe de elétrons

com energia e quantidade suficiente para ser captado por detectores. Esse feixe eletrônico é então demagnificado por várias lentes eletromagnéticas, cuja finalidade é produzir um feixe de elétrons focado com um pequeno diâmetro numa determinada região da amostra. O objetivo do sistema de lentes é o de demagnificar a imagem do ponto de partida para a colimação e focagem do feixe eletrônico sobre a amostra, para um tamanho de 1 nm – 1 µm, representando uma densificação da ordem de 10.000 vezes (MALISKA, 2003).

As imagens do MEV são construídas ponto a ponto, de modo similar à formação de uma imagem de televisão. A grande vantagem é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm (20 a 50Å). Os elétrons do feixe ao atingirem a superfície de uma determinada região da amostra irão interagir com os átomos. Um feixe de elétrons de alta energia é focado numa região da amostra, o que causa a emissão de elétrons com grande espalhamento de energia, que são coletados e amplificados para fornecer um sinal elétrico. Este sinal é utilizado para modular a intensidade de um feixe de elétrons num tubo de raios catódicos (TRC). Para construir uma imagem completa, o feixe de elétrons é varrido sobre uma área da superfície da amostra enquanto que um feixe de TRC é varrido sobre um rastro geométrico similar. (MALISKA, 2003).

A microanálise é uma dos mais importantes instrumentos para análise química de materiais. Através da identificação dos raios X emitidos pela amostra, quando da interação com o feixe eletrônico, é possível determinar a composição das regiões com até 1 µm de diâmetro.

O equipamento utilizado para efetuar essa análise está acoplado ao microscópio eletrônico de varredura. A técnica consiste na medida de raios X característicos emitidos de uma região microscopia da amostra em consequência do bombardeio do feixe de elétrons do microscópio. A energia dos raios X emitidos está intimamente relacionada com o número atômico dos átomos que consistem a região da amostra que está sendo analisada. Assim, é possível identificar os elementos químicos que compõe a amostra (MALISKA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias empregadas para a realização do presente trabalho. Compõem-se o escopo metodológico, planos e métodos de coletas das matérias-primas e técnicas específicas para realização dos experimentos de caracterização das quatro argilas e do lodo. Descreveram-se os procedimentos desenvolvidos para realização das misturas entre as argilas e adição de porcentagens peso de lodo às massas cerâmicas, cuja finalidade é avaliar as misturas com melhores interações de ordem física e química, por meio de ensaios físico-mecânicos. Com base nestes estudos foram determinadas as misturas propícias a serem estudadas nos processos de fabricação de tijolos. Portanto, neste tópico apresentam-se os procedimentos e técnicas utilizadas para alcançar os objetivos propostos.

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LODO NA ETA – TAMANDUÁ

A Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – SANEPAR, Unidade Regional de Foz do Iguaçu/PR (URFI) possui duas ETA's no município, sendo a mais antiga instalada no rio Tamanduá, e a unidade mais recente localizada no bairro Vila “C”, a qual faz captação da água no lago de Itaipu. A ETA de interesse neste trabalho é a unidade Tamanduá, maior geradora de resíduos, localizada na Rodovia BR 69 conforme apresentado na Figura 3.1.

A ETA unidade Tamanduá, faz captação de 250 litros de água por segundo para tratamento e abastecimento de aproximadamente 140 mil habitantes, cerca de 45% da população do município de Foz do Iguaçu/PR. O sistema de tratamento de água é do tipo convencional, conforme ilustrado pelo fluxograma dos processos de tratamento de água e de geração de resíduos – Lodo, Figura 3.2.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.2, a água captada do rio Tamanduá é direcionada para o dispositivo *Calha Parshall*, onde adiciona-se o coagulante, fazendo com que as partículas se aglomerem e formem flocos para induzir a precipitação nas duas séries de três decantadores em atividade. No histórico de funcionamento desta ETA, o coagulante sulfato de alumínio sempre foi usado no processo de tratamento, no entanto, a partir do mês junho de 2007, passou-se a utilizar o Policloreto de Alumínio (PAC) que detém propriedades mais eficientes na aglomeração de partículas quando comparado com outros coagulantes (CARDOSO, 2006).



Figura 3.1 – Mapa de localização da Estação de Tratamento de Água Tamanduá, inserida no município de Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil

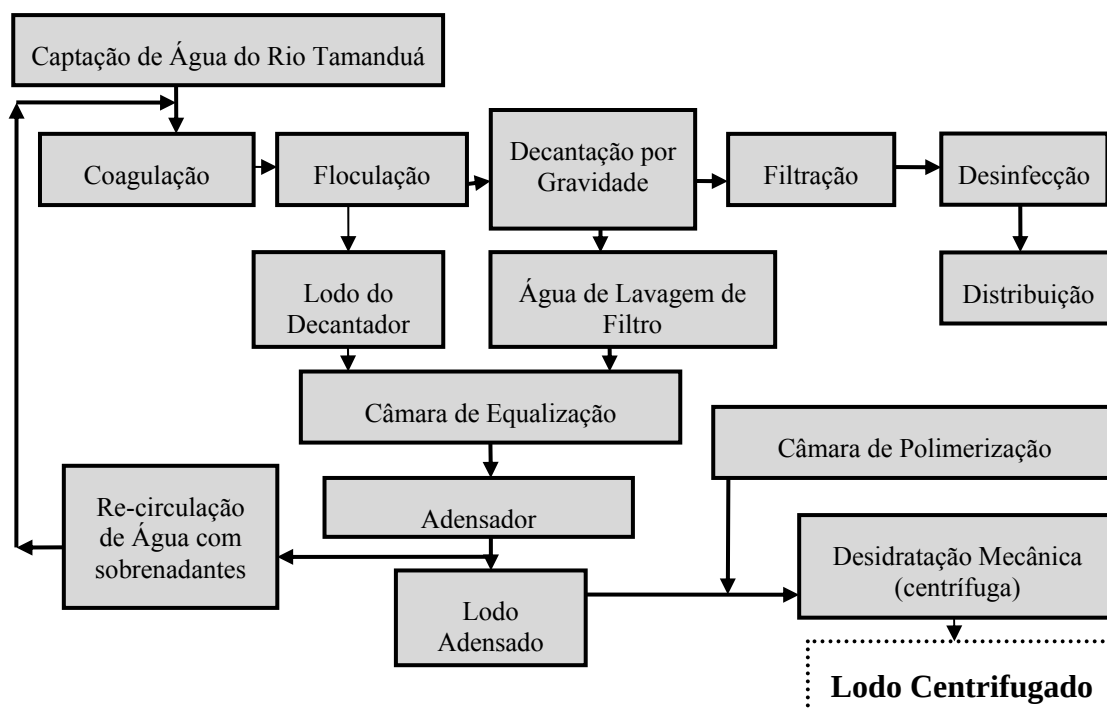


Figura 3.2 – Processo convencional de tratamento de água da ETA Tamanduá

A ETA Tamanduá possui atualmente quatro floculadores em atividade que induz a aglomeração dos sólidos presentes na água, formando flocos que seguem seu fluxo em direção aos decantadores de alta taxa, e por ação da gravidade depositam-se no fundo. Na etapa de filtração, existem 12 filtros, com finalidade de retirar as impurezas ainda presentes, originando uma manta de lodo e água clarificada, que é direcionada as fases de desinfecção e correção do pH para serem posteriormente aduzida ao reservatório de distribuição.

As etapas de decantação e filtração são responsáveis pela geração do lodo bruto, que é encaminhada pela descarga a uma câmara de equalização e posteriormente bombeada ao adensador que têm por finalidade separar a fase líquida da fase sólida. Os líquidos e sobrenadantes presentes na superfície do adensador são retornados para a fase inicial do processo. No lodo adensado, é adicionada uma determinada concentração de polímero comercial para posteriormente ser submetido à centrifugação mecânica que, faz-se a retirada da água livre do material sólido. A Figura 3.3 ilustra o fim do processo, onde no contêiner é depositado o lodo centrifugado e que permanece em tempo de espera para ser transportado e disposto no aterro sanitário municipal de Foz do Iguaçu/PR, de acordo com os procedimentos atuais da empresa.



Figura 3.3 – (a) Lodo sendo descarregado pelo decantador, (b) Maquinário de centrifugação com acondicionamento em contêineres.

3.2 SELEÇÃO, COLETA E AMOSTRAGEM DAS MATÉRIAS-PRIMAS

3.2.1 Amostragem da coleta do lodo da ETA – Tamanduá

As variações dos fatores físicos climáticos contribuem diretamente para o processo transiente de geração de resíduo em função das propriedades físico-químicas da água captada do manancial. A cidade de Foz do Iguaçu-PR possui características de intensas chuvas no verão e secas severas no período de inverno, com temperaturas elevadas na maior parte do ano. Para pesquisar as possíveis variações das características do lodo gerado na ETA – Tamanduá em ciclo parcial temporal, realizaram-se coletas em dois períodos estacionários (Primavera-Verão e Outono-Inverno).

Estabeleceram-se nos procedimentos de operação da ETA, que em todos os eventos de retirada do lodo do adensador após centrifugação (FIGURA 3.4), fossem coletados aproximadamente 8 kg do resíduo e acondicionados em um contêiner de polietileno com volume suporte de 50 litros, armazenado nas mesmas condições físico-climáticas da caçamba de acondicionamento, por um período de quatro meses. As coletas de lodo foram realizadas nas seguintes datas/épocas do ano:

- 30/9/2007 (lodo referente aos meses característicos de seca – julho, agosto, setembro e outubro);

- 29/2/2008 (lodo referente aos meses característicos de grandes chuvas – novembro, dezembro, janeiro e fevereiro);

Para caracterização do lodo, homogeneizou-se a amostra de cada evento de coleta contendo aproximadamente 50 kg, e submeteu-se aos ensaios pré-determinados.



Figura 3.4 – Lodo centrifugado, armazenado no contêiner em tempo de espera.

3.2.2 Seleção das Argilas

Para destinação final do lodo, selecionaram-se dois distintos setores que consomem argila da região oeste do Paraná para fabricação de produtos e artefatos cerâmicos, como também, por serem passíveis de futuramente adicionar lodo em seus processos produtivos.

Utilizou-se duas argilas indicadas pela empresa Cerâmica Santa Rita localizada na cidade de Foz do Iguaçu/PR, em virtude da excelente qualidade do produto final fornecido para o município e região, como também, pela matéria-prima utilizada ser de origem geológica da própria região Oeste do Paraná.

A Cooperativa de Artesãos de Foz do Iguaçu/PR – COOAFOZ, foi selecionada pelo fato da mesma também utilizar argilas da região Oeste do Paraná e por participar do programa de desenvolvimento do artesanato – Ñandeva².

Os dois setores de produção possibilitaram fundamentar a utilização do lodo de ETA como matéria-prima integrante para o processo, e no auxílio para o desenvolvimento da

² Ñandeva é um programa de desenvolvimento do artesanato que busca o fortalecimento de uma identidade tri nacional (na região de fronteira entre Argentina, Brasil e Paraguai). Home page - www.nandeva.pti.org.br.

pesquisa com argilas de distintas jazidas. Salienta-se que as argilas “brutas”³ coletadas para os experimentos estavam armazenadas nos canteiros de descanso.

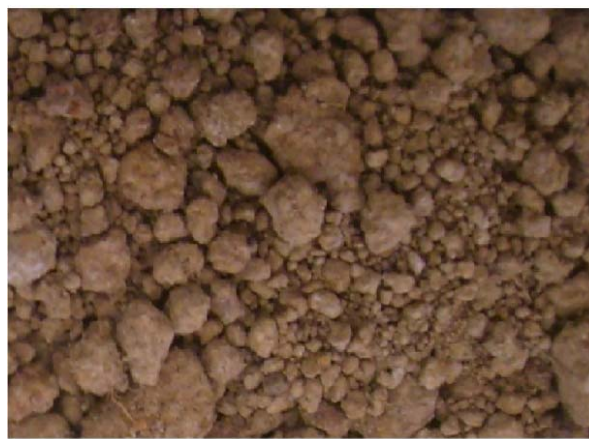
3.2.2.1 Argilas da Cerâmica Santa Rita

A empresa Cerâmica Santa Rita indicou duas das principais argilas encontradas com frequência na região e que são utilizadas no processo de fabricação de telhas e tijolos, especificadas por Plástica (OP) e Areia (OA) conforme apresentado na Figura 3.5.

O plano de amostragem para coleta da argila em local de armazenamento, procedeu-se através da retirada de cinco amostras de cada lote definido, totalizando 50 kg de cada argila, armazenado-as em sacos de polietileno para posterior homogeneização, seguido da caracterização e beneficiamento. A coleta das argilas foram realizadas nas mesmas épocas estabelecidas para coleta do lodo.



Argila, Olaria Plástica (OP)



Argila, Olaria Areia (OA)

Figura 3.5 – Argilas utilizadas pela Empresa Cerâmica Santa Rita para fabricação de cerâmicas vermelha.

3.2.2.2 Argila da Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu /PR - COOAFOZ

Na Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu – PR, os trabalhos foram realizados com o acompanhamento do artesão responsável, que indicou duas argilas especificadas por

³ Segundo Santos (1989), entende-se por argila “bruta” a argila que já foi extraída da jazida ou que tenha sofrido um processo simples de beneficiamento.

Plásticas (AP) e Areia (AA) apresentadas na Figura 3.6, que são utilizadas como misturas para produção de diversos materiais artesanais, confeccionados e comercializados na própria cidade e também em parceria com o programa Ñandeva. O plano de amostragem procedeu-se de forma idêntica a descrita no item 3.2.2.1.



Argila, Artesão Plástica (AP)



Argila, Artesão Areia (AA)

Figura 3.6 – Argilas utilizadas pela COOAFOZ para fabricação de cerâmica artística.

3.3 PROCESSOS METODOLÓGICOS

Utilizaram-se quatro argilas oriundas da região Oeste do Paraná mais o lodo gerado na ETA Tamanduá como componentes fundamentais para realizar primeiramente os trabalhos de caracterização, e posteriormente desenvolver as misturas binárias.

As argilas extraídas da região oeste do Paraná são utilizadas como matéria-prima para produção de materiais artísticos pela Cooperativa de Artesões de Foz do Iguaçu – PR (COOAFOZ) e de construção civil pela Empresa Cerâmica Santa Rita LTDA.

Para obter novos materiais, procedeu-se com estudos prévios de caracterização das matérias-primas de acordo com recomendações do Embrapa (1997).

Com objetivo de incorporar porcentagem de lodo de ETA as massas cerâmicas, primeiramente realizou-se o plano de misturas entre as argilas, cujos corpos de prova foram confeccionados por prensagem uniaxial em quintuplicata. Os corpos de prova foram avaliados pelos seguintes ensaios físico-mecânicos em nível de bancada: massa específica aparente (g/cm^3), perda ao fogo (%), absorção de água (%), contração linear (%) e tensão de ruptura a flexão (kgf/cm^2) para temperaturas de sinterização de 950 e 1050 °C, conforme

recomendações técnicas para cerâmica vermelha. Com base nos resultados obtidos, definiram-se formulações acordo com melhores propriedades para materiais cerâmicos, na qual se adicionou 4, 8, 12 e 16% em porcentagens peso de lodo seco nas formulações das massas argilosas, avaliado por ensaios físico-mecânicos as propriedades estruturais.

Todas as informações detectadas nesta etapa foram utilizadas para o contínuo processo investigativo de incorporação do lodo da ETA Tamanduá, às massas para fabricação de cerâmica vermelha. As misturas binárias com melhores propriedades, e com maior porcentagem peso de lodo, foram admitidas para confecção de tijolos pelo método de extrusão, e avaliadas por todos os ensaios físico-mecânicos, alterando somente o ensaio de resistência à compressão em vez de resistência à flexão, de acordo com recomendações normativas da NBR 7171/95.

No fluxograma apresentado na Figura 3.7, está descrita todas as fases empregadas no processo metodológico da pesquisa aplicada à reutilização de lodo da ETA - Tamanduá em cerâmica vermelha. Iniciaram-se os trabalhos pelas etapas discriminadas em cor verde escuro, referindo-se a **Seleção, Coleta e Amostragem das Matérias-Primas** para beneficiamento, preparação e caracterização tecnológica. Na etapa posterior, realizaram-se os **Planos de Mistura** (cor azul) entre as argilas da COOAFOZ denominada **Mistura “A”** e entre as argilas da Cerâmica Santa Rita denominada **Mistura “B”**. As misturas denominadas por “A” e “B” passaram pelo processo de fabricação (**Conformação, Secagem e Sinterização**) e avaliação nas três etapas do processo (**após Conformação, após Secagem e após Sinterização**) discriminadas pela coloração cinza escuro, a que indicaram as misturas com melhores propriedades, de **A** e de **B**. As composições definidas passaram pelo processo de incorporação de quantidades pré-determinadas de lodo (4, 8, 12 e 16%) discriminadas em coloração verde claro por **AL, AL`, BL e BL`**. Tais misturas passaram pelo processo de fabricação (**Conformação, Secagem e Sinterização**) e avaliação nas três etapas do processo (**após Conformação, após Secagem e após Sinterização**) discriminadas pela coloração cinza escuro, indicando as composições com peso de lodo contendo as melhores propriedades. As composições definidas segundo a avaliação realizada, foram denominadas **T1** e **A1** (cor laranja) que passaram para a fase de fabricação de tijolos pelo método de **Extrusão e Testes Artesanais**, bem como, avaliado nas três fases do processo.

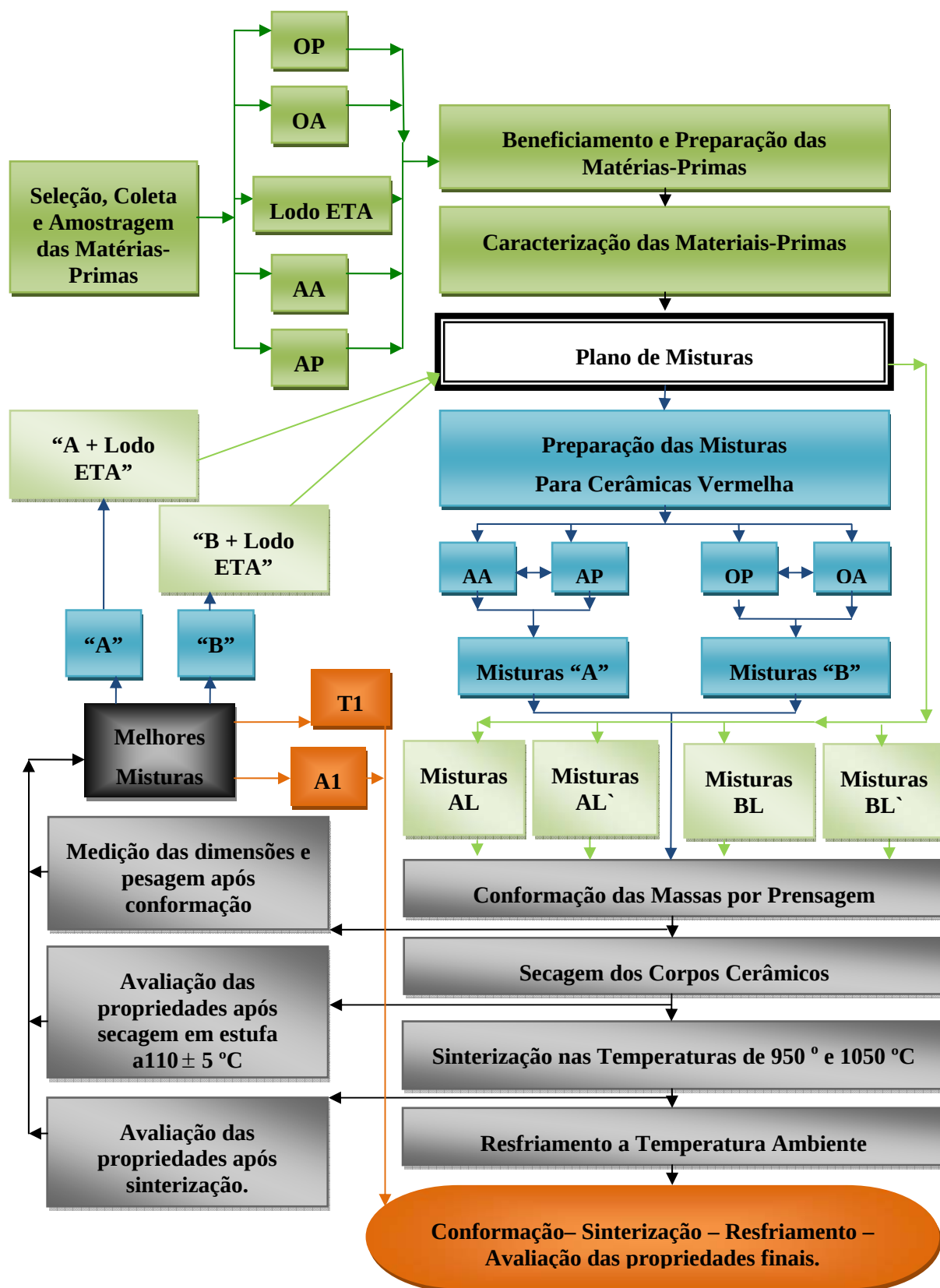


Figura 3.7 – Fluxograma da metodologia empregada para caracterização das matérias-primas e misturas para preparação das massas cerâmicas.

3.4 BENEFICIAMENTO E PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

As cinco diferentes matérias-primas: argilas provenientes da Cerâmica Santa Rita (OP, OA) da COOAFOZ (AA, AP) e o lodo de ETA, foram submetidas separadamente à secagem em estufa a 110 ± 5 °C por 24 horas, seguido do destorroamento, homogeneização e peneiramento conforme o procedimento de preparação de amostras de solo, norma DNER - ME 041/94. Posteriormente realizaram-se os distintos ensaios de caracterização físico-química e mineralógica.

3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Para o desenvolvimento desta fase, considerou-se o estudo de caracterização do resíduo gerado na ETA Tamanduá, realizado recentemente em 2006 pela Companhia de Saneamento do Paraná SANEPAR – Unidade Regional de Foz do Iguaçu/PR, perante NBR 10004/2004, a qual obteve a seguinte classificação: não corrosivo, não patogênico, e seu extrato lixiviado apresentaram valores abaixo dos limites estabelecidos pelo Anexo F da NBR 10.004/2004, portanto, classificou-se como sendo um Resíduo de Classe II A – não perigoso e não inerte.

A investigação das características das matérias-primas, foi realizada pelos seguintes ensaios: **Determinação da Umidade (%)**, **Matéria Orgânica (%)**, **Perda ao Fogo (%)**, **Limites de Consistência de Solos (índice de Atterberg)**, **Resíduos (%)**, **Granulometria (% de massa acumulada, μ m)**, **Composição Química e Mineralógica**.

Para determinação do **Teor de Umidade (%h)**, realizaram-se ensaios conforme procedimento prescrito pela norma rodoviária: DNER – ME 213/94, com secagem das amostras em estufa em quintuplicata.

Para determinar a porcentagem de **Matéria Orgânica (%M.O.)** presente nas amostras, foram realizados ensaios em triplicata segundo os métodos para análise de solos – Embrapa (1997), onde, pesou-se 100 g de cada matéria-prima (P_i), levou-se ao forno (marca Jung, modelo 0912), à temperatura de 600 °C por 4 horas, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, após resfriamento, pesou-se a amostra (P_f) e segundo a equação 3.1, calculou-se a porcentagem de MO.

$$MO = \frac{(P_i - P_f)}{P_f} \times 100 \quad (3.1)$$

A porcentagem de **Perda ao Fogo (%P.F.)** das matérias-primas foi determinada através da massa final (m_q) obtida pela sinterização à 1000 °C, em forno a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, da massa inicial (m_i) seca em estufa à 110 ± 5 °C.

$$PF = \frac{(m_i - m_q)}{m_i} \times 100 \quad (3.2)$$

Os **Limites de Consistência de Solos de Aterro** foram avaliados pelos procedimentos prescritos nas normas da ABNT MB-30/1984, registradas no SINMETRO, como NBR-6459, designada Solo-determinação do **Limite de Liquidez**, e ABNT MB-31/1984, como NBR-7180, designada Solo-determinação **Limite de Plasticidade**.

Para caracterização **granulométrica**, inicialmente as amostras foram secas em estufa a 110 ± 5 °C, destorroadas e submetidas ao peneiramento em malha de peneira 80 (GRANUTEST). Utilizou-se o equipamento granulômetro a laser, modelo Cilas 920, cujo princípio de funcionamento para análise do tamanho das partículas de solo, está baseado na teoria de espalhamento de luz laser, com feixe de luz monocromática no espectro do visível ($\lambda=820$ nm), atingindo as partículas no meio dispersante, fazendo com que parte desta luz seja espalhada, parte absorvida e parte transmitida, ressaltando que no espalhamento a luz espalhada pode ser difratada, refratada e refletida.

Para cada amostra utilizou-se 20 gramas que foram adicionadas separadamente no recipiente de 1000 cm³ do equipamento, com dispersante água, acoplado ao sistema de ultrassom, em funcionamento por tempo limite de 60 segundos, com a finalidade de diminuir a tensão superficial entre as partículas e otimizar o processo de desagregação para que a amostra seja enviada a unidade óptica, para incidir a luz laser.

Pela difração das partículas, os receptores formados por conjunto de lentes, detectores foto-elétrico e um microprocessador, captaram a intensidade da energia espalhada e transformaram em distribuição volumétrica das partículas assumindo-se que as partículas têm formato esférico (ORTS et al, 1993). Essas informações foram repassadas para o computador que é operado pelo software (The Particle Expert), dando saída somente via impressão. As vantagens desta análise é a grande amplitude de varredura do equipamento (0,3 a 400µm), rapidez, reprodutibilidade (integração de várias médias individuais) não havendo necessidade de calibração (Florêncio et al, 2006).

Para a análise da porcentagem de **Resíduos (%RES)**, as amostras foram destorroadas, peneiradas na malha de peneira 60 (GRANUTEST) e seca em estufa a 110 ± 5 °C. A

quantidade inicial (P_i) de cada amostra, 100 g de foi misturada a 400 ml de água, acrescida de 5% de solução de amônia e aquecida sem deixar o processo de ebulição iniciar. Posteriormente, peneirou-se a amostra em malha 325 (GRANUTEST) e sobre a peneira injetou-se água corrente. Submeteu-se à secagem e pesou-se o resíduo final (P_f), calculando-se a porcentagem retida de Resíduos pela seguinte equação:

$$RES(\%) = \frac{(P_i - P_f)}{P_f} \times 100 \quad (3.3)$$

Para **caracterização química** das matérias-primas, foram realizados experimentos pela técnica de Fluorescência de raios X por Energia Dispersiva (ED-XRF) pelo método do pó. Para isso, utilizou-se o equipamento de Fluorescência de raios X do Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos – LIMAC/UEPG, de marca Shimadzu Energy Fluorescence X-ray Spectrometer, Rayny modelo 700.

Para realização da análise, as amostras (AA, AP, Lodo, OA e OP) foram homogeneizadas, secas em estufa, destorroadas e passadas por malha de peneira 325(GRANUTEST).

O equipamento é constituído por um tubo de raios X, com radiação do ródio (Rh), um gerador de tensão Shimadzu operando sob arranjo de corrente e tensão que variaram de 10 a 100 μ A e 15 a 50 keV, respectivamente.

Para detecção dos raios X característicos, foi utilizado um detector semiconductor de Si(Li) (cristal de silício dopado com lítio) de 10 mm² de área ativa. O tempo de radiação para cada amostra foi de 100 segundos.

Para **caracterização mineralógica** foram realizados experimentos de difração de raios X (XRD), utilizando o difratômetro automático (ânodo rotatório) SHIMADZU XRD do Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos – LIMAC/UEPG modelo 700, composto por um tubo de raios X, ânodo com radiação do cobre (Cu), com uma tensão do tubo de 40 kV e corrente de 30 μ A. O ângulo de varredura utilizado foi de 5 a 70 ° (2 θ), com tamanho do passo 0,02 ° e velocidade de varredura: 2 °/min.

As fases cristalinas foram identificadas com base nas informações sobre diversos minerais disponíveis na biblioteca (JCPDS) do Software XRD-6000 V. 4.1, bem como, os seguintes bancos de dados como referenciais para análise dos minerais: a) Mineralogy Database; b) www-Mincryst-Crystallographic and Crystallochemical Database for Mineral and their Structural Analogues.

3.6 PREPARAÇÃO DAS MASSAS CERÂMICAS

Neste tópico, apresentam-se os métodos para fabricação de cerâmica vermelha, por prensagem uniaxial e por extrusão, utilizados na análise da possibilidade de incorporação do lodo às misturas das argilas como método para disposição final.

3.6.1 Conformação das Massas por Prensagem Uniaxial

As matérias-primas passaram pelo processo de moagem com auxílio do moinho martelo. Posteriormente, para confeccionar os corpos de prova por prensagem uniaxial variou-se a composição das argilas e fez-se misturas em porcentagem peso conforme o plano de mistura com combinações binárias entre as argilas da Cerâmica Santa Rita (OA e OP) e entre as argilas da COOAFOZ (AA e AP), apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Formulações das composições binárias em porcentagem peso

Misturas “A”	OP (%)	OA (%)	Misturas “B”	AP (%)	AA (%)
A1	100	0	B1	100	0
A2	70	30	B2	70	30
A3	60	40	B3	60	40
A4	50	50	B4	50	50
A5	40	60	B5	40	60
A6	30	70	B6	30	70
A7	0	100	B7	0	100

Adicionaram-se às formulações 10% de água como agente ligante entre as partículas dos argilominerais, conforme apresentado na Figura 3.8. As composições ficaram em tempo de repouso por 24 horas em potes lacrados, com a finalidade de distribuir melhor a umidade por toda a massa.

Posteriormente, fez-se a conformação dos 24 corpos de prova para cada composição por prensagem uniaxial, totalizando 336 corpos de prova. Utilizou-se um molde de dimensões (comprimento 8,0 cm x largura 3,5 cm x espessura 0,7 cm) e com auxílio de uma prensa hidráulica (NANETTI modelo MIGNON SS/EA), sob pressão de 250 kgf/cm². A massa média de cada composição utilizada para confecção dos corpos de prova foi de 30 g.

Entre as fases de prensagem, secagem e sinterização, foram pesados os corpos de prova e medidos em todas as suas dimensões (largura, comprimento, espessura, e peso),

objetivando comparar as variações da retração linear, perda de massa e resistência. Avaliaram-se os corpos de prova pelos ensaios descritos no Tópico 3.7.

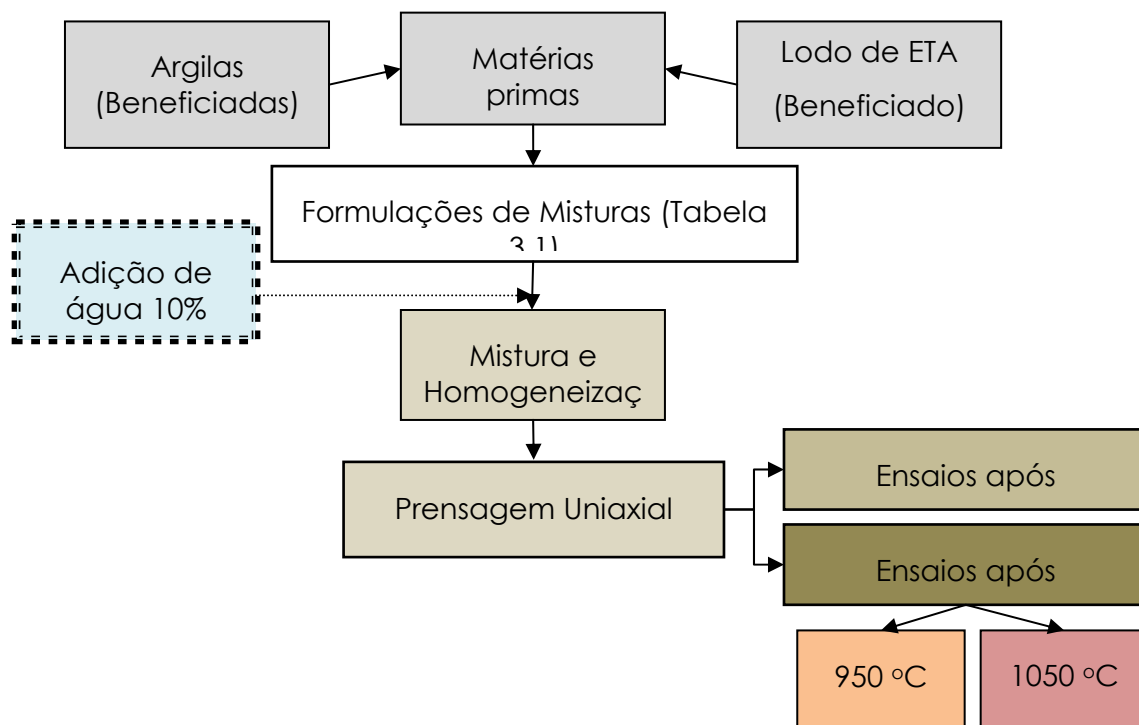


Figura 3.8 – Fluxograma de preparação das massas cerâmicas.

3.6.2 Conformação das Massas por Extrusão

Após a avaliação das misturas entre as argilas e determinação da porcentagem de lodo adicionado as massas de argilas pelo método de prensagem uniaxial, avaliado sob dois regimes de temperatura conforme descrito no Tópico 3.6.1, conduziu-se a aplicação em blocos estruturais por extrusão com adição admissível de lodo, conforme os resultados obtidos nos trabalhos de caracterização e confecção de corpos prismáticos avaliados perante requisitos técnicos.

Para avaliação e comparação dos blocos estruturais com resíduos e sem resíduos confeccionados pelo método de extrusão, utilizou-se o equipamento Extrusora Faenza apresentado na Figura 3.9 nas seguintes dimensões de (32 cm de altura x 70 cm de comprimento x 36 cm de largura) especificadas pelo molde do equipamento para confeccionar

os corpos de prova em formato de bloco de 6 furos na horizontal. Tudo em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 3.7.

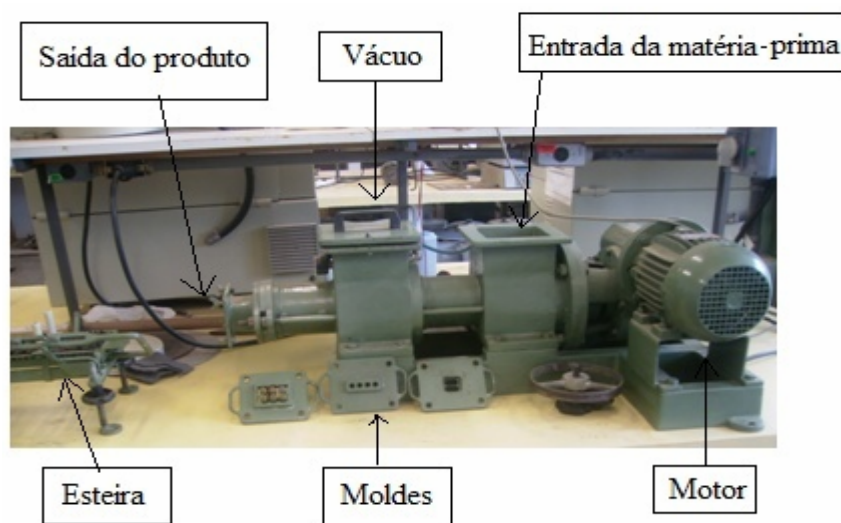


Figura 3.9 – Extrusora Faenza, utilizada na confecção dos blocos cerâmicos conforme a NBR 7171/95.

3.6.3 Sinterização

Os corpos de prova foram sinterizados na temperatura de 950 e 1050 °C, em um forno de marca Jung com resistências elétricas de SiC, com programação de taxa de aquecimento de 10 °C/minuto, e tempo de patamar de 2 horas na temperatura de sinterização. O resfriamento ocorreu à temperatura ambiente do forno fechado. Utilizaram-se duas temperaturas como referencial de condições máximas usuais da indústria para fabricação de cerâmica vermelha, cujo objetivo foi avaliar a variação das propriedades em dois diferentes regimes de sinterização e suas influências nas propriedades físico-mecânicas. Para os blocos cerâmicos de 6 furos e cerâmica artística foram as condições de sinterização estão descritas no tópicos 4.2.2. O autor definiu-se como melhor forma de apresentação da informação

3.7 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COPOS CERÂMICOS

Neste tópico, apresentam-se os ensaios realizados para avaliação das propriedades dos corpos de prova. Realizaram-se avaliações em três etapas do processo, dos quais os ensaios

repetiram – se para identificar variações em função da perda de água, da perda de massa e da modificação na estrutura dos corpos de prova cerâmico. Na etapa inicial, após a secagem dos corpos de prova em estufa, os ensaios realizados foram: contração linear de secagem e tensão de ruptura a flexão a seco. Após a sinterização avaliaram-se os seguintes parâmetros: contração linear total, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, perda de massa ao fogo, resistência a flexão; e, para os blocos cerâmicos com 6 furos horizontais, avaliaram-se todos os parâmetros descritos acima trocando somente o ensaio de resistência a flexão por compressão. Todos os métodos estão descritos a seguir:

A Contração Linear de Secagem (% CLS), de Queima (% CLQ) e Total (% CLT) foi realizada de acordo com a norma MB-305 (ABNT, 1984e). A porcentagem de contração foi calculada pelas equações abaixo:

$$CLS (\%) = \frac{(Lu - Ls)}{Ls} \times 100 \quad (3.4)$$

$$CLQ (\%) = \frac{(Ls - Lq)}{Lq} \times 100 \quad (3.5)$$

$$CLT (\%) = \frac{(Lu - Lq)}{Lq} \times 100 \quad (3.6)$$

Em que: Lu - Comprimento inicial do corpo de prova antes da secagem; Ls - Comprimento final do corpo de prova após a secagem em estufa 110 ± 5 °C; Lq - comprimento das amostras após a sinterização.

- **Absorção de Água (% AÁ):** após sinterização e resfriamento lento dos corpos de prova dentro do forno, colocou-se em estufa com circulação de ar por 24 horas. Pelo método de Arquimedes, segundo a NBR 8947/2005, determinou-se a porcentagem de água absorvida pelo corpo cerâmico e a massa específica aparente. Após medições e pesagens, acondicionaram-se os corpos de prova em um recipiente com água na temperatura ambiente por 48 horas. Após está etapa, retiraram-se as amostras, secou-se as superficialmente e realizou-se a pesagem. Calculou-se a porcentagem de absorção de água (AÁ) pela seguinte relação:

$$AÁ(\%) = \frac{(Pu - Ps)}{Ps} \times 100 \quad (3.8)$$

- **Massa Específica Aparente (MEA g/cm³):** a massa específica aparente dos corpos cerâmicos foi determinada de acordo com a norma C 373-88 (ASTM, 1984). Os corpos cerâmicos após imersão em água destilada por um período de 24 horas foram pesados úmidos e posteriormente pesados imersos em água (dentro de recipiente com água, com peso conhecido) pelo método da balança hidrostática de Arquimedes. A MEA foi obtida pela seguinte expressão:

$$MEA = \frac{P_s}{(P_u - P_i)} \quad (g / cm^3) \quad (3.9)$$

- **Porosidade Aparente (% PA)** - os experimentos de porosidade aparente foram realizados de acordo com a norma C 373 -88 (ASTM, 1984), cuja expressão é dada por:

$$PA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{(P_u - P_i)} \times 100 \quad (3.10)$$

Em que: P_i - a massa do corpo cerâmico (g) imerso em água, medido pelo método da balança hidrostática, P_s - Peso do corpo de prova seco após sinterização, P_u - Peso do corpo de prova úmido (saturado com água pelos interstícios);

- **Variação da Massa após Queima, Perda ao Fogo (% PF)** – a porcentagem de perda ao fogo das matérias primas determinou-se com o auxílio de um forno mufla. Após o aquecimento da amostra até 1000 °C constitui-se a perda ao fogo da massa seca a 110 ± 5 °C pela seguinte expressão:

$$PF(\%) = \frac{(P_i - P_q)}{P_i} \times 100 \quad (3.11)$$

Em que: P_i - massa inicial da amostra (g) seca a 110 ± 5 °C; e P_q – massa da amostra sinterizada.

- **Resistência a Flexão (MTRF - kgf/cm²)** - é a resistência mecânica máxima que causa o rompimento ou comprometimento das propriedades do corpo de prova. Para este ensaio utilizou-se o flexímetro de marca NANNETI. O ensaio consiste em colocar os corpos de prova sobre dois apoios, com distâncias fixas, aplicando carga até a ruptura dos membros do corpo cerâmico conforme apresentado na Figura 4.11. A resistência à flexão em

temperatura ambiente (MTRF) expressa em kgf/cm^2 foi calculada segundo a MB-72/1990 pela seguinte expressão.

$$MTRF = \frac{3PL}{2a^2b} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (3.12)$$

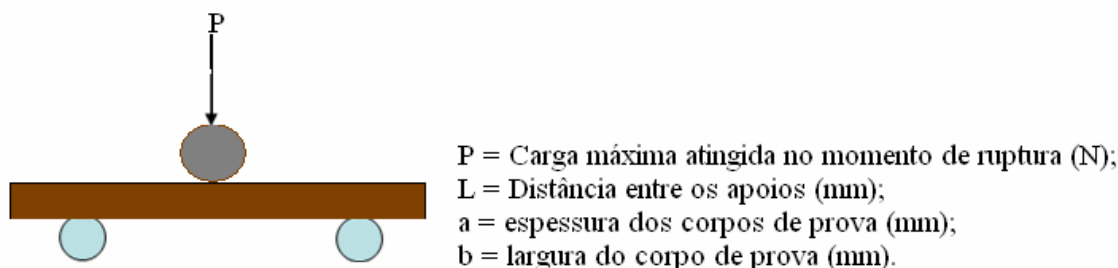


Figura 3.10 – Ensaio de tensão de ruptura a flexão tracionando em três pontos.

• **Resistência a Compressão** – o ensaio consiste em colocar os corpos de prova com suas faces planas entre a prensa, de forma que, a tensão seja aplicada (kgf) sob o bloco cerâmico com a posição dos furos no sentido horizontal. Segundo recomendações da NBR 6461, para que o corpo cerâmico tenha requisitos de qualidade é necessário suportar uma carga a 15 kgf/cm^2 , e no sentido vertical carga superior a 30 kgf/cm^2 . Para este ensaio, utilizou-se a prensa hidráulica Shimadzu modelo AG-I com carga máxima de 300 kN.

3.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise por Energia Dispersiva

Para análise microestrutural dos corpos cerâmicos produzidos de acordo com os parâmetros físico-mecânicos avaliados, utilizaram-se da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para entender as correlações na microestrutura e defeitos. Para identificar os compostos químicos formadores da estrutura, utilizou-se da técnica de microanálise por energia dispersiva por fluorescência de raios X. Para estes ensaios usou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura SHIMADZU SSV-550, acoplado com sistema de microanálise por energia dispersiva de detecção dos raios X, emitidos pela amostra (EDS).

Para este ensaio, as amostras sólidas foram selecionadas após serem avaliadas pelos ensaios físico-mecânicos. As amostras foram lixadas em ordem de graduação das lixas: 80, 120, 320, 600, e posteriormente polidas, utilizando uma politriz com adição de resina de alumina líquida de $0,3 \mu\text{m}$.

Para a realização da microanálise, as amostras cerâmicas foram metalizadas com ouro (recobrimento superficial), cuja finalidade foi torná-las condutoras de energia, possibilitando a interação dos elétrons com toda a estrutura do material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Observa-se na Tabela 4.1, a presença de $76,4 \pm 3\%$ de umidade no lodo da ETA Tamanduá após o processo de adensamento e centrifugação, sendo o restante sólidos totais, com concentração satisfatória para desidratação mecânica de lodos, conforme especificações técnicas que indicam a faixa ideal entre 16 a 35% (PENALVA REALI, 1999; RICHTER, 2001; PAIXÃO, 2005). O lodo retirado diretamente do decantador em fase de limpeza apresentou sólidos diluídos em meio viscoso e denso, com umidade na ordem de 200% superior ao lodo que passou pelo processo de tratamento prévio, o que confirma a eficiência e eficácia da desidratação mecânica. Em termos de transporte, a porcentagem de água presente no lodo (76,4%) poderá atribuir custos operacionais.

As porcentagens de umidade das argilas OA, OP, AA e AP, são referentes às condições ambientais locais de acondicionamento e armazenamento. Verificou-se que a umidade média das argilas da COOAFOZ é menor que a média das argilas da Cerâmica Santa Rita. Este parâmetro é um indicativo prévio para a adição e o controle de água a ser incorporado à argila, que são definidos pelos índices de Atterberg apresentados a seguir.

Tabela 4.1 – Resultados de caracterização das matérias-primas

	(%) Umidade	(%) Matéria orgânica após secagem em estufa $110 \pm 5^\circ \text{C}$	(%) Resíduos (retida na # 325 Granutest)
LODO	$76,41 \pm 2,7$	$35,94 \pm 0,3$	$34,24 \pm 0,8$
AA	$21,29 \pm 0,7$	$8,77 \pm 1,3$	$44,28 \pm 0,5$
AP	$15,80 \pm 0,8$	$12,40 \pm 1,2$	$62,27 \pm 0,9$
OA	$23,50 \pm 0,4$	$30,34 \pm 2,3$	$46,01 \pm 0,5$
OP	$32,28 \pm 0,3$	$16,52 \pm 0,1$	$66,33 \pm 0,4$

A matéria orgânica contida nas argilas forneceu um parâmetro de caráter plástico desejável, devido ao fato dos ácidos úmicos agirem como colóides protetores hidrofílicos das partículas dos argilominerais. Destaca-se a presença de concentrações elevadas de matéria orgânica no lodo (35,94%) e na argila AO (30,34%) em relação às argilas OP (16,52%), AP (12,40%) e AA (8,77%). Os resultados obtidos pelo ensaio de determinação de resíduos, confrontados com os de matéria orgânica, indicaram a predominância de material de origem inorgânica, conforme apresentada na Tabela 4.1. Verificou-se que o lodo possuiu semelhança com relação aos resíduos inorgânicos e a matéria orgânica em porcentagem peso. Estes dois

fatores estão diretamente conjugados em possíveis interações de ordem física (forças de Wan der Walls), química entre argilominerais e materiais orgânicos, com maior influência na troca de cátions (SANTOS, 1989).

Para a análise química semi-quantitativa das matérias-primas, utilizou-se o software EDX-700 para analisar os espectros gerados, e a identificação dos elementos químicos com base na biblioteca de energias das linhas espectrais e suas respectivas intensidades relativas. Para isso utilizou-se os padrões internos do equipamento, as curvas de calibração e de sensibilidade nas condições específicas fornecidas pelo fabricante como procedimento padrão para realização da análise pelo método do pó para materiais sólidos. As concentrações dos elementos químicos presentes nas amostras passaram por um processo de cálculo estequiométrico teórico, realizado pelo próprio software, o qual adiciona o O_2 na base molecular proporcional à composição do composto, a fim de apresentar as concentrações na forma de óxidos dos elementos químicos.

Observou-se na Tabela 4.2 que a composição química das matérias-primas são constituídas majoritariamente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , e TiO_2 , e em menores concentrações por SO_3 , K_2O , CaO , ZrO_2 . As concentrações químicas diferem para cada argila o que caracteriza terem diferentes propriedades elementares de interação. Na argila denominada AA, predominam os óxidos de SiO_2 e em menores concentrações de TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Já no lodo, são elevadas as porcentagem de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 . A argila OA possui maiores porcentagens de Fe_2O_3 e SiO_2 . Em relação ao alcalino (K_2O) e alcalino terroso (CaO), agentes eficientes na formação de fase líquida durante a sinterização em baixas temperaturas de fusão, apresentaram-se em menores concentrações em todas as amostras em relação aos elementos majoritários detectados. Notou-se a presença de SO_2 em todas as matérias-primas, na ordem de 1,5 a 2,8%, composto este que apresenta característica de se volatilizar quando em contato com elevadas temperaturas e deve ser destacado sua influencia para retração da peça cerâmica e no o aparecimento de falhas na estrutura.

Do ponto de vista químico, os óxidos majoritários SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 correspondem a aproximadamente 74% da composição do lodo. Na Tabela 4.2, observou-se que o lodo apresentou elevada perda ao fogo (PF), da ordem de 20,4%. Supõe-se que este parâmetro está associado à presença de águas intersticiais de coordenação zeolítica, ou de hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes, como também, por componentes de matéria orgânica que volatilizou com aumento da temperatura de análise. Já as argilas OP, OA, AP e AA apresentaram valores significativos de perda ao fogo, porém, menores quando comparados com a do lodo, na ordem de 12,8 - 6,8 - 9,5 e 6,2%, respectivamente.

Tabela 4.2 – Óxidos dos elementos químicos detectados por ED-XRF.

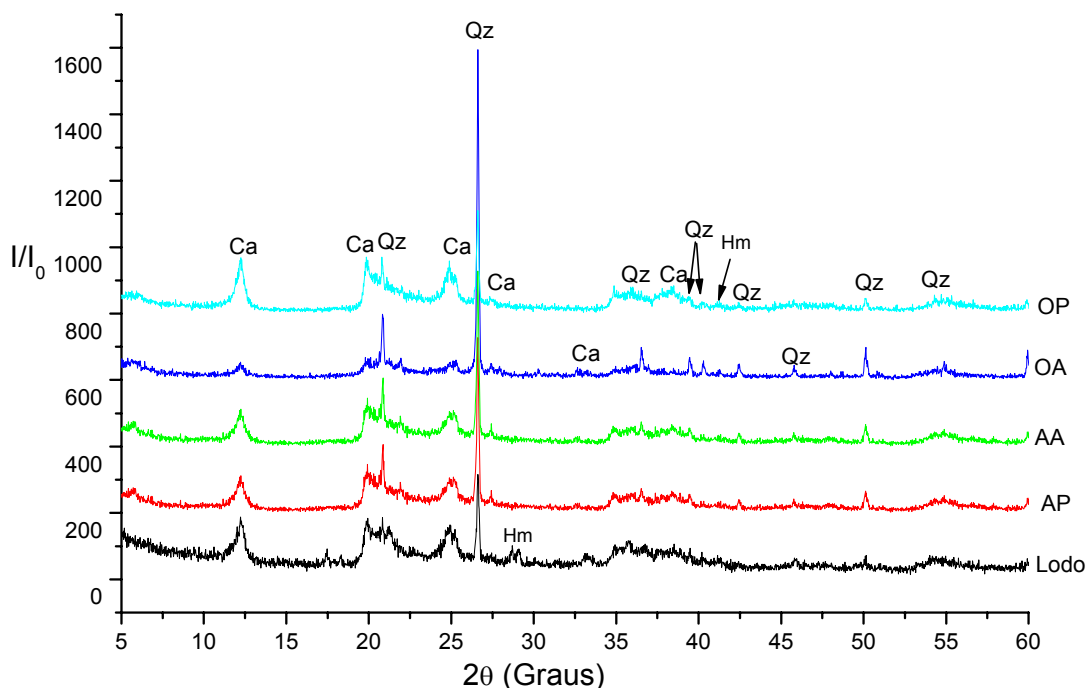
Óxidos dos Elemento Químico	Lodo ETA (%)	OP (%)	OA (%)	AP (%)	AA (%)
Al_2O_3	31,6	26,5	10,7	19	7,2
SiO_2	24,1	40,2	36,1	42,8	63,6
Fe_2O_3	18,6	9,3	29,6	10,7	7,3
SO_3	2,8	2,3	1,5	2,1	2,2
TiO_2	2,2	8,4	13,9	14,1	12,1
K_2O	0,3	-	0,4	0,8	0,7
CaO	-	0,5	0,6	1	0,5
ZrO_2	-	-	0,4	-	0,2
Perda ao Fogo	20,4	12,8	6,8	9,5	6,2

Nota: Identificaram-se nas amostras traços dos seguintes óxidos: CuO , Cr_2O_3 , V_2O_5 , MnO .

Da análise da Tabela 4.2, observou-se nas quatro argilas a predominância do composto SiO_2 , principal indicador do mineral quartzo. No lodo, o óxido de Al_2O_3 é o composto majoritário presente, que pode ter relações com a composição do coagulante Policloreto de Alumínio (PAC) utilizado no processo de tratamento de água, e também relações diretas com as características naturais dos particulados provenientes da água do rio Tamanduá.

Pela análise dos difratogramas das amostras que estão apresentadas na Figuras 4.1 identificou-se a presença de três principais argilominerais, a caulinita mineral de silicato de alumínio hidratado ($\text{Al}_4\text{SiO}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), o quartzo mineral de óxido de silício (SiO_2) e a Hematita mineral de óxido de ferro (Fe_2O_3). Os difratogramas das 5 matérias-primas, não foram avaliados os picos acima de $2\theta = 60^\circ$, devido a sobreposições de fases dos argilominerais.

Observou-se ruído na amostra, indicador da possível existência de material de origem orgânica, não identificado pela faixa de sensibilidade do equipamento. No difratograma está indicado a presença da caulinita, que é um mineral de silicato de alumínio hidratado ($\text{Al}_4\text{SiO}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), considerado um dos principais minerais presentes em argilas. Salienta-se que o mineral haloisita possui a mesma estrutura molecular da caulinita, juntamente com o mineral nacrita, que formam a família do caulim. Portanto, existe possibilidade de picos identificados por caulinita ser da haloisita em função das fases também serem muito próximas.



Fi

gura 4.1 – Difratomogramas de raios X das matérias-primas: Lodo; argilas AP; AA; AO; e OP. (Ca = Caulintina; Qz = Quartzo; Hm = Hematita).

De acordo com as porcentagens significativas de TiO_2 detectadas pela análise química, não observou-se picos característicos dos minerais pertencentes a família do óxido de titânio, ou seja, o anastácio, o rutilio e a ilmenita. Porém, não se descarta a hipótese da existência destes minerais, uma vez que, há possibilidade de estarem superpostos. Uma observação deve ser feita em relação aos picos de difração próximo a $2\theta = 6^\circ$, não sendo possível sua atribuição a qualquer tipo de mineral.

O comportamento das argilas sofre influencias pela distribuição dos tamanhos de partículas, principalmente quando submetidas a misturas, as quais exercem potencial sinérgico de conglomeramento e empacotamento dos grãos quando conformado corpos cerâmicos. Fundamentado em estudos tecnológicos de caracterização de argilas para produção de materiais cerâmicos, as cinco matérias-primas utilizadas neste trabalho foram interpretadas conjuntamente com os resultados obtidos pelos outros ensaios e teorias complementares.

Analisaram-se as características específicas de cada matéria-prima por três gráficos que representam a distribuição esférica dos tamanhos de partículas de forma comparativa entre o lodo e as argilas AP e AA (FIGURA 4.4), entre o lodo e as argilas OA e OP (FIGURA 4.5) e entre as cinco matérias-primas de forma conjunta (FIGURA 4.2).

As curvas granulométricas apresentaram uma larga distribuição de tamanho de grão na faixa de 0,3 a 400 μm , com diâmetro médio de partículas de 64,6 μm . Caracterizou-se o lodo como sendo uma matéria-prima que contém siltes inorgânicos, com elevada porcentagem de SiO_2 , na ordem de 24%, e matéria orgânica na faixa de 34%, subsídio que pode explicar o baixo índice de plasticidade encontrado ($\text{IP} = 7,4$). A distribuição granulométrica apresentou-se heterogênea, evidenciando três faixas bem características: argila (5,8%), silte (21,4%), e areia (73%), conforme a escalas de classificação internacional (SANTOS, 1989). As frações de areia e silte possuem 90 a 95% do mineral quartzo, devido à resistência destas frações mais grosseiras ao intemperismo (CURI, 1993). Observou-se que a presença desse mineral influenciou diretamente a diminuição da plasticidade do lodo, devido à baixa interação com outros argilominerais, caracterizando-o como sendo uma matéria-prima arenosa e siltosa, não plástica ou desplastificante.

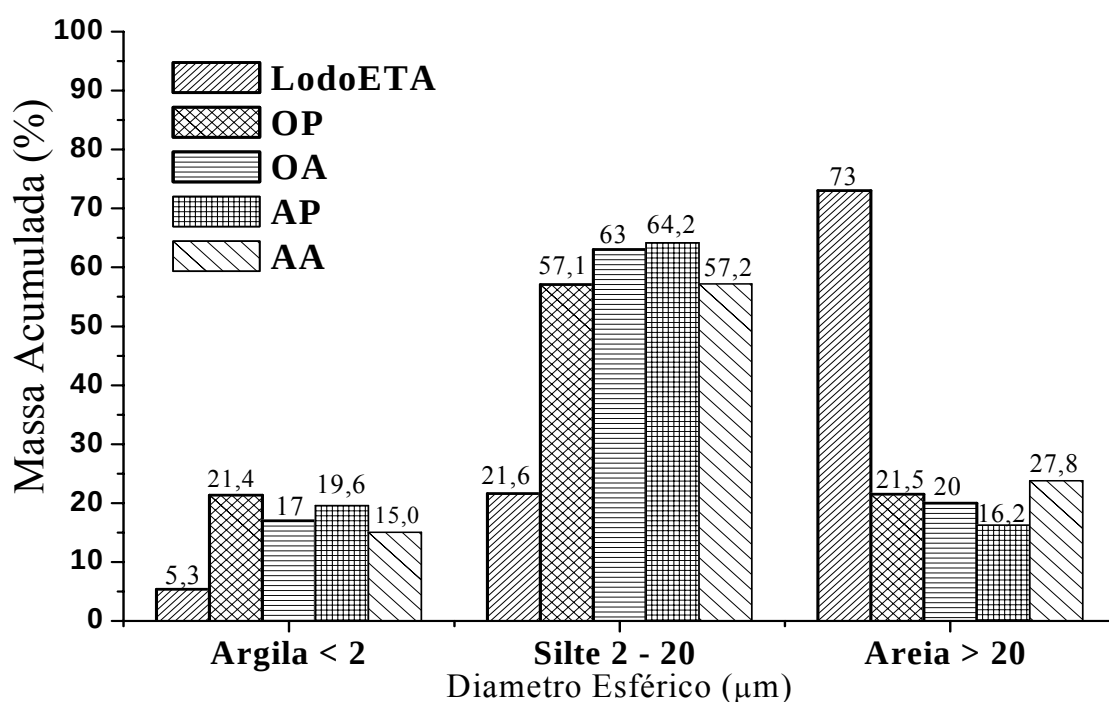


Figura. 4.2 – Distribuição granulométrica das cinco matérias-primas

Pela determinação dos limites de liquidez, verificou-se que em baixas concentrações de umidade o lodo já entra em processo de saturação, interagindo pouco com a umidade adicionada, e quando submetido aos ensaios de plasticidade com baixa quantidade de umidade ocorre à desagregação das suas partículas tendendo a fratura. Portanto, o resíduo não possui uma característica de argila plástica, devido à baixa interação entre os argilominerais quando

em contato com lubrificante, a água. Observou-se também que o lodo não atende aos princípios do método estabelecido por Atterberg, o qual considera o tamanho das partículas acima de $58\% < 60\ \mu\text{m}$ para ser uma argila ativa, com elevada interação entre os argilominerais.

Segundo Pracidelli et al (1997), para aumentar os canais internos existentes, visando reduzir o tempo de secagem do corpo cerâmico, atenuando as fortes retrações lineares e deformações, é necessário incorporar desplastificantes em misturas de argilas altamente plásticas, para evitar alto grau de compactação com $40\text{ a }50\% < 2\ \mu\text{m}$. A adição de não plásticos às argilas podem causar pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas, influenciando diretamente no aumento da porosidade e diminuição da resistência mecânica. Salienta-se que essa premissa é fundamental no processamento da massa, porém, não avaliou-se neste estudo o potencial de secagem em função da incorporação de argila não plástica em argila plástica. Analisaram-se outros parâmetros que são fundamentais em tecnologia de argila para produção de cerâmica vermelha, como: contração linear, absorção de água, porosidade aparente, tensão de ruptura a flexão a seco e após sinterização.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios obtidos pelos ensaios de consistência de solos de Atterberg.

Tabela 4.3 – Limites de consistência de solos de Atterberg

Parâmetros	LODO ETA	AA	AP	OA	OP
Limite de Liquidez (%)	62,5	34	84	52	71
Limite de Plasticidade (%)	55,1	26	30	27	24
Índice de Plasticidade (%)	7,4	7,7	54	25	47
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm^3)	2,4	2,3	2,4	2,6	2,4

Da análise da Tabela 4.3 verificou-se que o valor do limite de plasticidade mostrou-se elevado para o lodo, e isso provavelmente pode estar relacionado com a alta fração de matéria orgânica presente. Massas que contém valores de LP acima do recomendado para uso em cerâmica vermelha ($\text{LP} = 18\text{ a }30\%$) são consideradas impróprias, pelo fato destas poderem apresentar dificuldades de secagem, resultando em defeitos de deformação na peça cerâmica (OLIVEIRA, et al, 2004). Logo, recomenda-se incorporar argilas de menor plasticidade, com tamanhos de grãos na faixa do silte, de modo a equilibrar a interação entre os argilominerais.

O gráfico de plasticidade de Casagrande apresentado na Figura 4.3, permite caracterizar solos finos a partir do Índice de Plasticidade e do Limite de Liquidez. Os solos com LL maior que 50% são muito compressíveis e abaixo de 40% têm baixa ou nenhuma (LL

< 20%) compressibilidade. Acima da linha “A” situam-se as argilas inorgânicas (plásticas) e abaixo, argilas orgânicas e siltes.

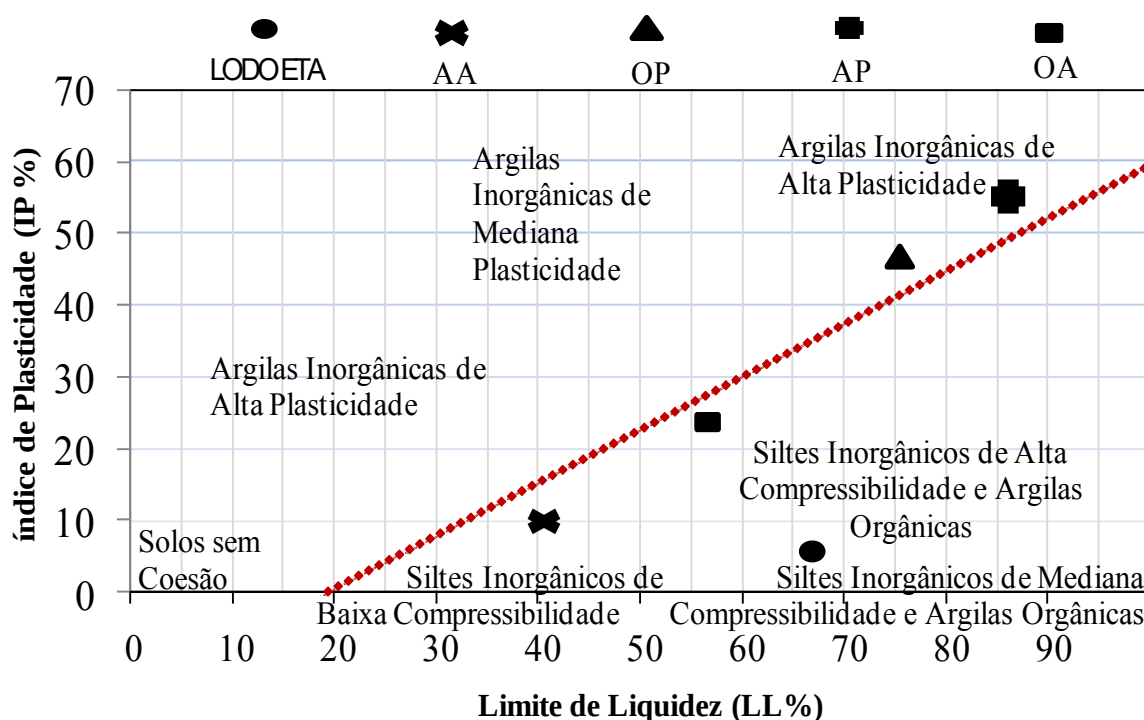


Figura 4.3 – Apresentação das características das matérias-primas de acordo com gráfico de classificação e identificação de propriedades de argilas, adaptado de Atterberg.

Na Figura 4.4 observou-se que a argila OP possui 21,4% dos grãos < 2 μm , classificando-se como inorgânica de alta plasticidade. Essa característica deve-se a presença de matéria orgânica (16,5%), ao tamanho dos grãos consideráveis e argilominerais hidrofílicos, que contribuem para interação das partículas. As argilas AP e OP possuem especificidades elementares semelhantes com propriedades orgânicas de alta plasticidade. Os diâmetros médios são da ordem de 8,9 e 12,4 μm , respectivamente. Esta propriedade do ponto de vista da plasticidade tem relação direta com área superficial das partículas, na qual, as ligações são mais ativas quando em contato com a água pela atuação de forças atrativas, considerando que a cinética de adsorção tende a ser mais rápida para a superfície e mais lenta por difusão para dentro dos poros, fortalecendo assim, as ligações entre os argilominerais, diminuindo a tensão de deformação da massa ao perder umidade. A argila OP possui propriedades elementares de argila “gorda”, inorgânica, de alta plasticidade ($IP = 46,9$). Sua baixa quantidade de matéria orgânica e perda ao fogo, confirmaram sua elevada concentração de materiais inorgânicos, sendo majoritários os óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 .

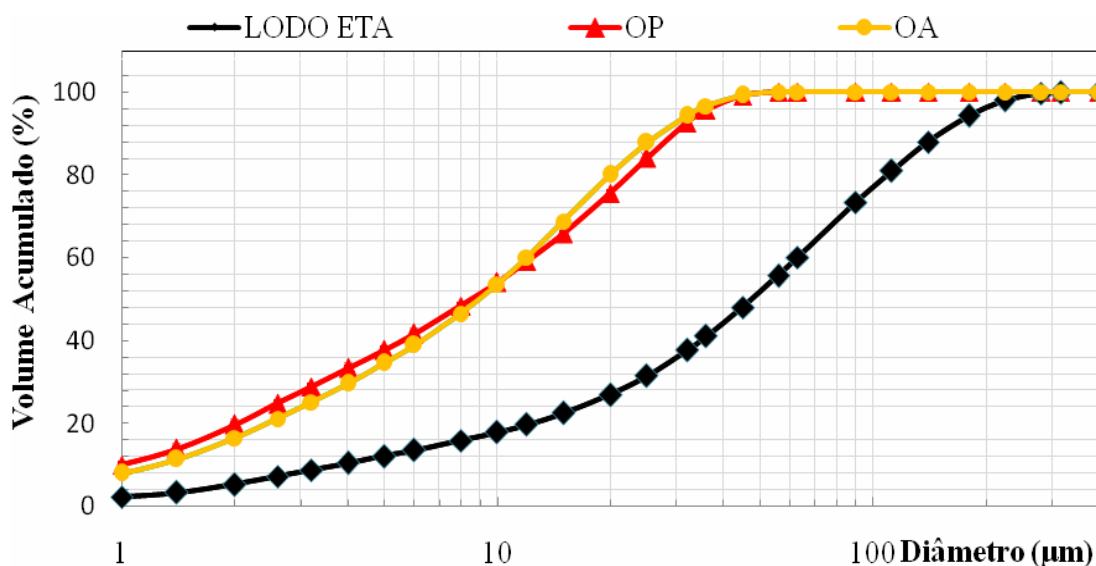


Figura 4.4 – Análise Granulométrica do lodo ETA e das Argilas OA e OP.

A argila OA possui baixo índice de plasticidade, entretanto, classificou-se como sendo uma argila constituída de siltes inorgânicos de alta compressibilidade. Esta argila é considerada “argila magra” com grãos finos, da ordem de $17\% < 2 \mu\text{m}$, fator que facilita a interação entre as partículas (PRACIDELLI, 1997). A quantidade de resíduos encontrada é da ordem de 46%, e os óxidos dos elementos químicos majoritários presentes são SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 como pode visualizar-se na Tabela 4.2. Os grãos dessa argila apresentam-se finos e com diâmetro médio $11,8 \mu\text{m}$, o que caracteriza ser propícia para interação em misturas de argilas para compor massas a serem utilizadas no processamento de cerâmica vermelha.

A argila AA apresentou 63,6% de SiO_2 , principal componente formador do mineral quartzo, identificado no difratograma apresentado na Figura 4.1. De acordo com os ensaios realizados comparados com os índices de Atterberg, classificou-se esta argila como siltes inorgânicos, com baixa concentração de material orgânico, em 8,7%. Verificou-se que a interação entre as partículas tende a ser reduzida em função da presença do quartzo, o qual não passa para o estado líquido em temperaturas próximas a 1000°C , mesmo contendo partículas de granulometria fina, de diâmetro médio $13,76 \mu\text{m}$, comparada com a argila OP altamente plástica. A argila AA apresentou 44% de resíduo com SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dos elementos majoritários e fases do quartzo, logo, essa argila por não apresentar boa plasticidade poderá ser incorporada em menores quantidades para equilibrar a concentração de elementos químicos vista formar a estrutura cristalina, e tornar a massa ativa quando umedecida com água, que é de grande interesse para determinados fins, como o artesanato.

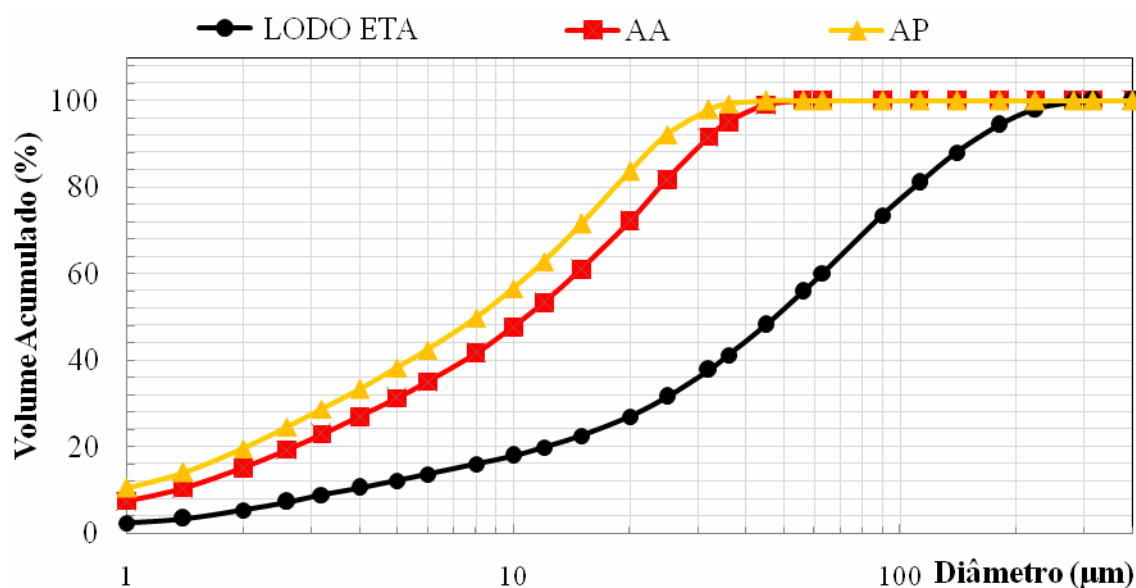


Figura 4.5 – Análise Granulométrica lodo ETA e das Argilas AA e AP.

Nos estudos de conformação de massa plástica, a argila que se mostrou com melhores propriedade de plasticidade foi a argila AP, seguida da OP, conforme apresentado na Tabela 4.3. A argila OA, apresentou plasticidade intermediária, indicando sua utilização no controle das propriedades de retração em composições baseadas majoritariamente nas argilas AP e OP. Tanto o lodo da ETA Tamanduá, como a argila AA, devido à baixa plasticidade apresentada, não podem ser utilizadas como componentes principais nas formulações das massas cerâmicas, contudo, podem ser empregadas em pequenas quantidades com o objetivo de incorporá-las como aditivos. Em Relação à Massa Específica Real (MER), as matérias-primas apresentaram valores que estão dentro da faixa para produtos argilosos 2,5 a 2,8 g/cm³ (SANTOS, 1989). Todas as informações adquiridas por ensaios laboratoriais contribuíram para prever possíveis falhas nos materiais produzidos pelas misturas entre as argilas, logo no processo de incorporação de lodo às misturas.

As Figuras 4.6 - 4.8 apresentaram características morfológicas típicas dos grãos do lodo de ETA. A micrografia da Figura 4.6 (a) apresentou o geral da amostra do lodo de ETA ampliado em 100 X. Notou-se que sobre as faces das partículas há um material aparentemente aderido à superfície, com característica de matéria orgânica. Na Figura 4.6 (b) ampliada em 1.500 X, observou-se conglomerados de partículas lamelares nas microrregiões com tamanhos distintos de grânulos, sem dimensão e formato padronizado.

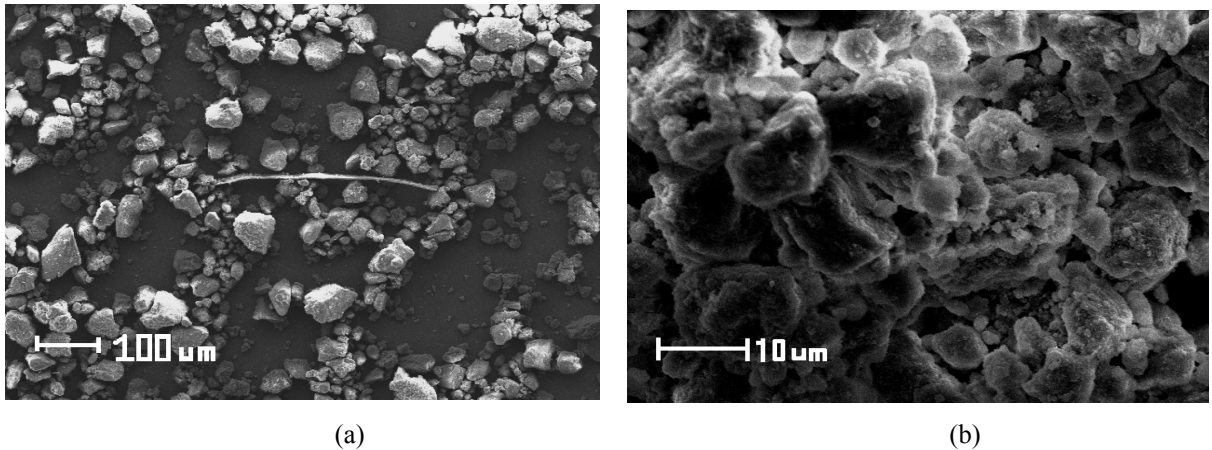


Figura 4.6 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Geral da amostra identificando matéria orgânica, ampliada em 100 X. (b) Partículas lamelares conglomeradas, ampliadas em 1.500 X.

A Figura 4.7 (b), ampliada em 3.000 X, apresentou os detalhes da superfície dos grânulos ligados pela aderência entre os elementos com aparência de forças atrativamente fracas. Observaram-se na micrografia, o favorecimento de retenção de água para dentro dos poros por difusão decorrente as grandes distâncias entre os grãos. Essa propriedade pode relacionar ao aumento do tempo de secagem e redução do volume em termos de partículas sólidas. Evidenciou-se pelo baixo índice de plasticidade e pela presença do quartzo, a fraca interação entre partículas na micrografia representando conglomerados de grãos unidos. A Figura 4.7 (a), ampliada em 500 X, mostrou que as partículas não possuem estrutura definida.

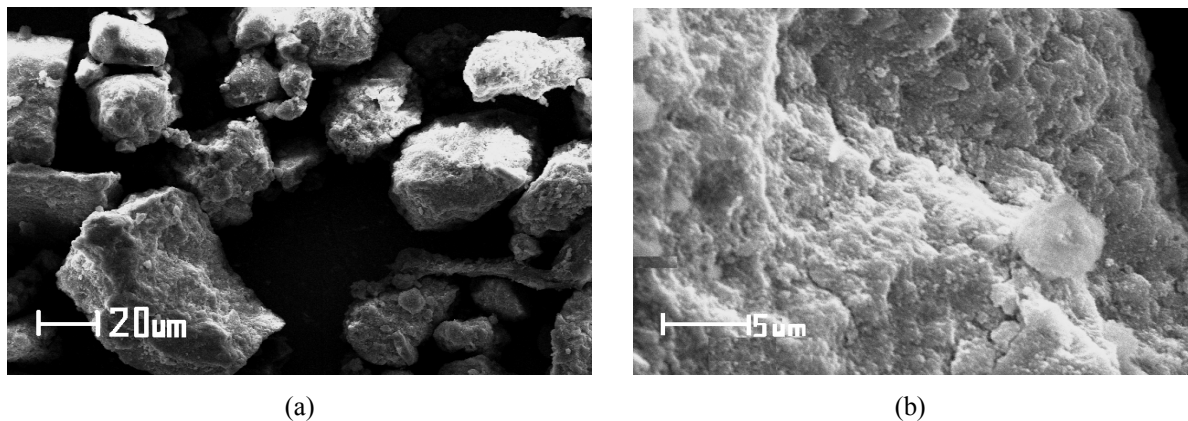


Figura 4.7 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Grânulos de lodo, ampliada em 500 X. (b) superfície do Grânulo, ampliado em 3.000 X.

Na Figura 4.8 (a) e (b) pode-se observar que sua estrutura é formada por aglomeração de partículas de distintos tamanhos, originando partículas maiores, com aparência porosa e

com forças de ligações fracas. Sua estrutura apresentou morfologia lamelar e irregular, ou seja, não possuiu forma definida.

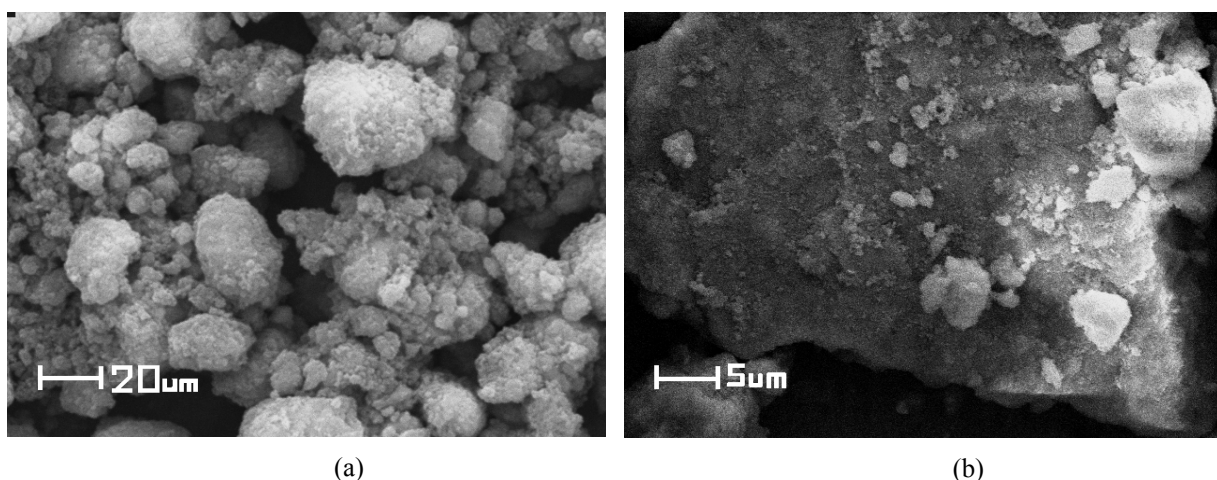


Figura 4.8 – Micrografias obtidas por MEV. (a) Grânulos aglomerados ampliado em 500 X. (b) Grânulo ampliado em 2.000 X

4.1.1 Discussão da Caracterização das Matérias-Primas

Conforme procedimento metodológico de caracterização das matérias-primas, observou-se que o lodo e a argila AA apresentaram elevado percentual de matéria orgânica, sendo desejável para interação entre os argilominerais, indicando o grau de retração que a peça cerâmica poderá atingir quando submetida a elevadas temperaturas de sinterização. Observou-se que, de acordo com as características físicas de saída da estação de tratamento, destaca-se a impossibilidade de utilização do lodo como componente majoritário em massas de cerâmica vermelha, devido à elevada porcentagem de umidade e de matéria orgânica, caracterizado como silte formado por quartzo, havendo pouca interação com outros compostos em condições ambiente, necessitando de elevadas temperaturas para entrar em estado de fusão, o que inviabiliza o processo de produção de cerâmicas vermelhas. Além disso, a porosidade do grânulo favorece a retenção de água nos micro-poros, influenciando consideravelmente na retração e deformação da peça cerâmica.

Os principais minerais detectados nas argilas foram o quartzo, a caulinita e a hematita. Observou-se que as argilas AA, AP, OA e OP possuem grãos bem definidos com significativas porcentagens de partículas finas de argila, entretanto, o lodo possui 21,61% de silte. Em relação aos limites de plasticidade e liquidez, observou-se que as argilas AP e OP

foram superiores em termos de interação entre os argilominerais. As argilas AP e OP apresentaram melhores propriedades conjunturais específicas para fabricação de cerâmica vermelha. Perante as propriedades avaliadas, considerou-se que o lodo possuiu características de um desplastificante, decorrente da baixa interação química entre as partículas. Ensaio preliminares foram realizados para verificar sua capacidade de formar corpo cerâmico somente com lodo puro. Observou-se sua inviabilidade perante o resultado apresentado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Corpos cerâmicos confeccionados com lodo puro sinterizado na temperatura de 950 °C.

4.2 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

Os ensaios tecnológicos foram realizados conforme descrição metodológica, avaliados nas fases de conformação, secagem e sinterização. Para cada ensaio, utilizou-se um conjunto de no mínimo cinco corpos de prova em forma de barras prismáticas confeccionados por prensagem e de blocos estruturais de 6 furos na horizontal confeccionados por extrusão, para melhor confiabilidade estatística. Os resultados foram apresentados em forma gráfica, numérica e por figuras. Os resultados numéricos referentes aos ensaios estão apresentados no Anexo A, pelas Tabelas I, II, III, IV, V, e VI.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.7, o plano foi realizado para preparação das misturas “A” e “B”, cada qual, composta por 7 composições, denominadas A1-A7 e B1-B7. No seguimento do processo, avaliaram-se os materiais produzidos pelos seguintes ensaios nas respectivas fases operacionais.

Após secagem:

- Módulo de Tensão de Ruptura à Flexão à Seco (MTRFS kgf/cm^2), para os corpos de prova confeccionados por prensagem uniaxial;
- Contração Linear após Secagem (% CLS); e
- Resistência à Compressão à Seco (MTRCS kgf/cm^2), para os corpos de prova confeccionados por extrusão;

Após sinterização:

- Contração Linear após Queima (Sinterização) (% CLQ);
- Contração Linear Total (% CLT);
- Absorção de Água (% AA);
- Porosidade Aparente (% PA);
- Perda ao Fogo (% PF);
- Massa Específica Aparente (MEA g/cm^3);
- Módulo de Tensão de Ruptura à Flexão (MTRF kgf/cm^2), para os corpos de prova confeccionados por prensagem uniaxial; e
- Resistência à Compressão (MTRF kgf/cm^2), para os corpos de prova confeccionados por extrusão;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microanálise (EDS) para os corpos de prova referente às misturas que apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas.

4.2.1 Plano de Misturas “A” e “B”

Na Figura 4.10, ilustrou-se o comportamento de retração linear das composições em função do tratamento térmico utilizado, que é indicativo de alteração interna no material na fase de processamento.

Verificou-se que não foram significativas as contrações lineares no processo de secagem das misturas “A” e “B”. Após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C, as composições não apresentaram contrações superiores a 5%, destacando maior perda de massa para as composições A6, A7, B6 e B7, as quais sofreram contrações superiores em relação às outras misturas.

Observaram-se pelas curvas ajustadas aos resultados experimentais obtidos, tendências de contração para as composições em função do aumento da temperatura de 950 para 1050 °C, e maior porcentagem da argila AA e OA adicionada às misturas “A” e “B”, respectivamente.

Esses fatores podem estar diretamente relacionados ao percentual de compostos químicos voláteis presentes, tanto de origem orgânica, quanto inorgânica, que, quando em contato com o calor (processo de sinterização a 1000 °C), são favorecidas as eliminações dos compostos voláteis presentes, formando a fase líquida dos argilominerais e proporcionando a interação para reorganização e constituição de novas estruturas químicas dos corpos cerâmicos. Quando resfriadas em condições específicas apresentaram características físicas de empacotamento e organização dos átomos no corpo cerâmico, aumentando consideravelmente a retração linear e a perda de massa. A somatória da contração linear de secagem mais a de sinterização, de acordo com recomendações técnicas de fabricação de cerâmica vermelha, não deve ultrapassar mais do que 15%, sendo a faixa ideal de 2 a 8%, indicativo satisfatório para os resultados obtidos com as argilas encontradas na região Oeste do Paraná (SANTOS, 1989).

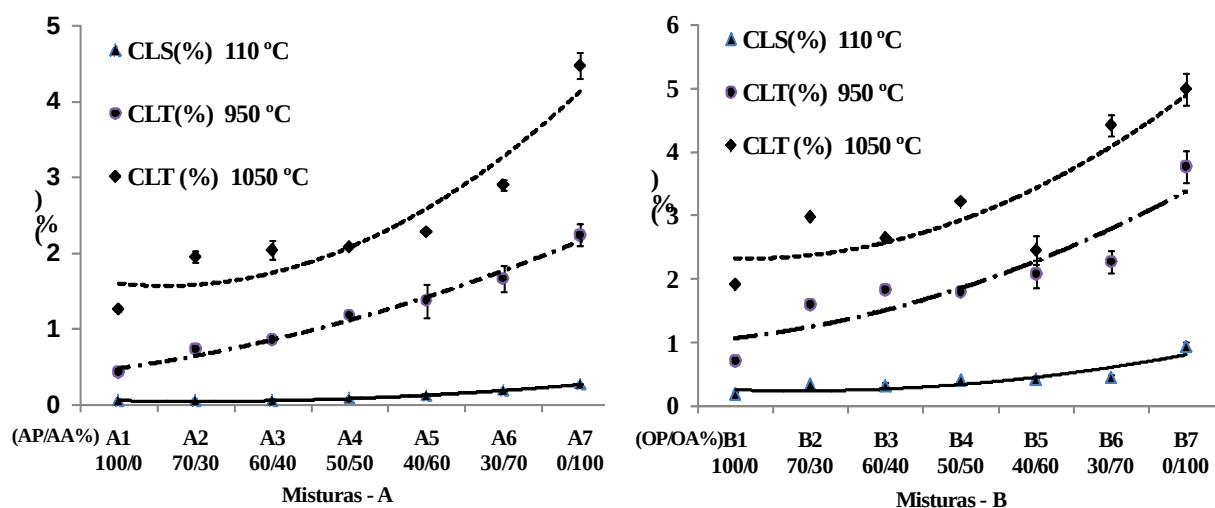


Figura 4.10 – Contração linear de secagem 110 ± 5 °C, contração linear total após sinterização a 950 e 1050 °C para as composições das Mistura – “A” e “B”.

A massa específica aparente, assim como, a contração linear após a sinterização, reflete o grau de adensamento alcançado pelo material durante as fases de processamento. Na sinterização, o ponto de fusão dos argilominerais ocorre próximo a temperatura em 1000 °C, onde acontece a formação da fase líquida e a organização das partículas dentro do arranjo estrutural da cerâmica. Nesta fase, a interação e organização entre as partículas é função da temperatura, que modificam as propriedades de fusão do maior percentual de argilominerais, influenciando no aumento de contatos e no preenchimento dos interstícios entre as partículas.

Passando do estado de sinterização para o de resfriamento nas condições ambiente do forno, os grãos tenderam ao crescimento e ao empacotamento, diminuindo os espaços vazios

(porosidade), inibindo a absorção de água, aumentando a densificação do corpo cerâmico (massa específica aparente) e, melhorando as propriedades com relação à resistência mecânica. Esses fenômenos de interação podem ser observados na Figura 4.11, nas quais as curvas ajustadas pelos resultados experimentais destacaram a diminuição do percentual de absorção de água quando tratada em temperatura mais elevada, 1050 °C, e quando adicionada menores porcentagens das argilas OA e AA, nas misturas “A” e “B”, caracterizadas como síltes inorgânicos e com baixos índices de plasticidade. Pressupõe-se que a baixa interação na fase de fusão deve-se a presença majoritária de SiO₂, que necessita de temperaturas superiores às utilizadas para manifestar condições necessárias a que os argilominerais entrem em estado líquido, passíveis de interação e reorganização na fase de resfriamento.

A absorção de água é um importante fator que interfere na durabilidade do material cerâmico, pois, está diretamente relacionada com a resistência mecânica e aos ataques químicos e físicos do meio, no qual estará sendo utilizado. Os valores limites de absorção de água, segundo recomendações técnicas, não devem ultrapassar padrões exigidos de no máximo de 25% (SANTOS 1989). Observa-se na Figura 4.11 que na temperatura de 1050 °C para a mistura “A”, somente as composições A7 e B7 apresentaram valores que não se enquadram nos requisitos técnicos, enquanto que, para as outras composições, os valores com seus respectivos desvios padrões enquadraram-se nos padrões de qualidade, utilizados com frequência pela indústria dessa modalidade de material cerâmico, que é na temperatura de 950 °C. Todas as combinações apresentaram satisfatoriedade, exceto para a composição A7 que não atendeu as especificações técnicas.

A porosidade aparente é um método preponderante para avaliação dos materiais cerâmicos após sinterização e deve ser confrontado diretamente com os resultados da massa específica aparente e absorção de água, de forma a avaliar a influência térmica com o grau de sinterização da peça, em função das propriedades físico-mecânicas. Destacou-se que existem relações diretas entre AA, PA e MEA, podendo ser observado pelos resultados obtidos que, quanto maior a temperatura de sinterização, menor é a porosidade, menor a absorção de água e maior é a densificação do material.

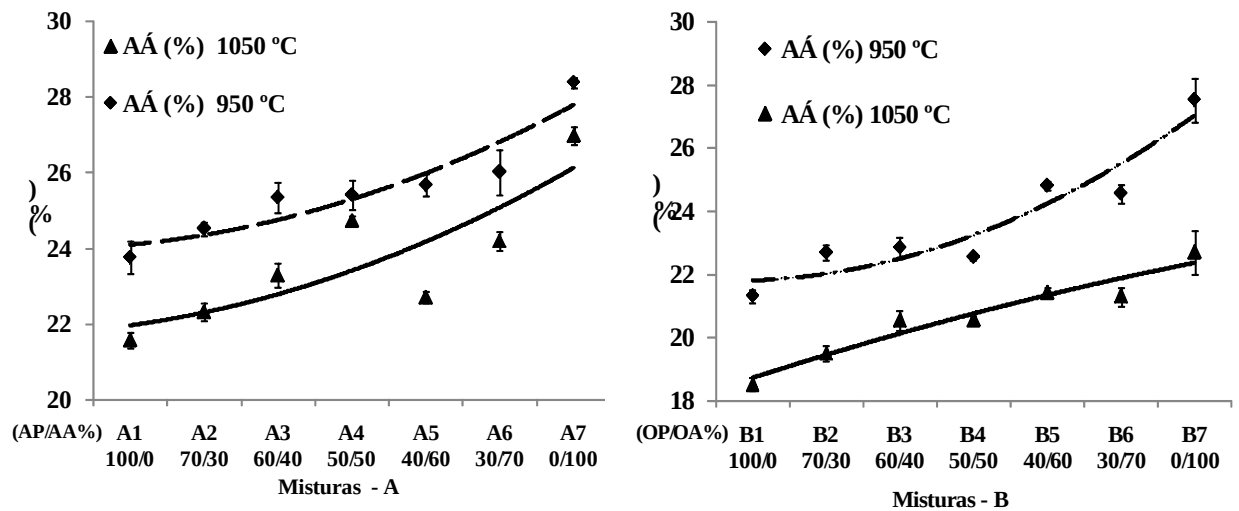


Figura 4.11 – Absorção de água para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.

Observou-se na Figura 4.12, que o grau de densificação do corpo cerâmico foi favorecido com o aumento da temperatura de sinterização, indicando que na temperatura de 1050 °C, o material manifestou possuir um arranjo com melhor empacotamento entre os grãos. Fator que expressa autenticidade na afirmação de que a redução na absorção de água foi favorecida pelo aumento da temperatura.

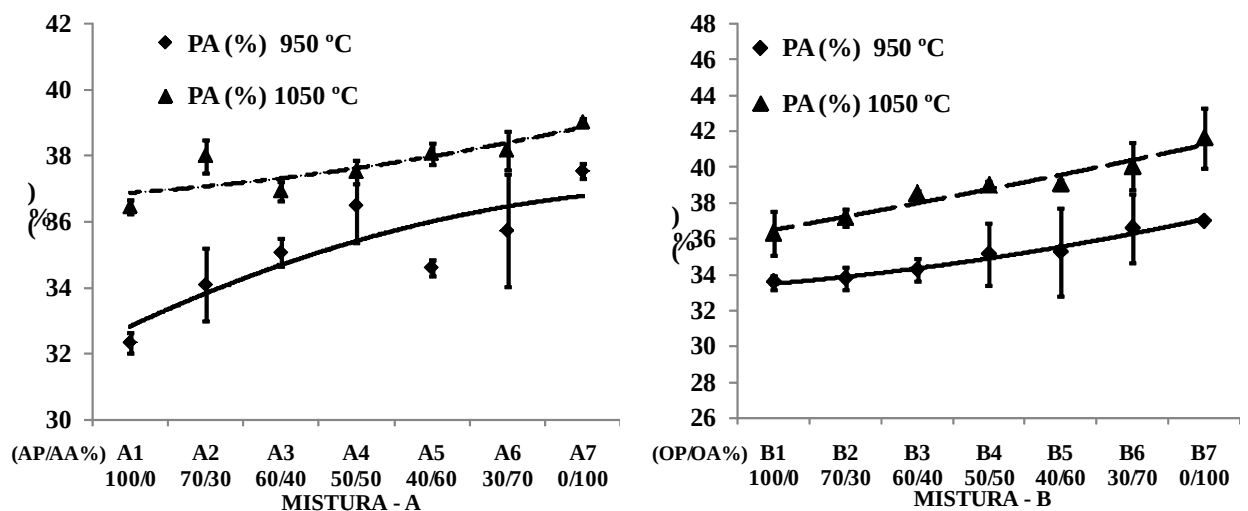


Figura 4.12 – Porosidade aparente para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.

Denotaram-se na Figura 4.13 que a massa específica aparente das composições da mistura “B” apresentou densidades superiores as composições das misturas “A”, e observaram-se pequenas variações em função da mudança da temperatura.

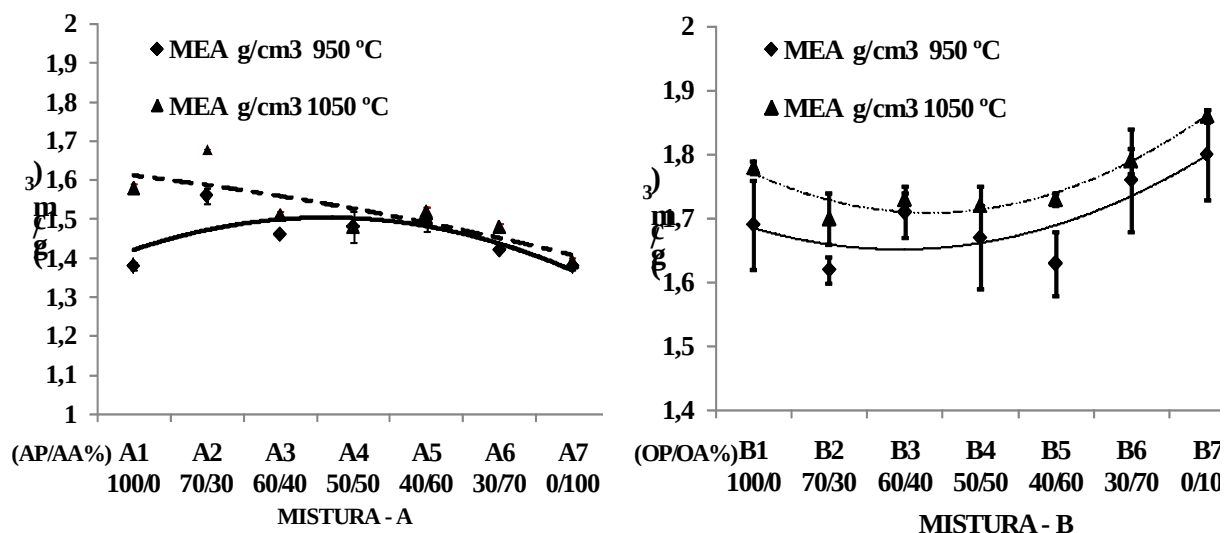


Figura 4.13 – Massa específica aparente para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.

A perda ao fogo é atribuída à matéria orgânica contida na composição e também a outros elementos que se volatilizaram durante o processo de sinterização. Observou-se na Figura 4.14 que na temperatura de 950 °C a porcentagem perdida ao fogo foi próxima quando sinterizada na temperatura de 1050 °C. Para um bloco cerâmico a perda ao fogo não pode ser superior a 15% (SANTOS, 1989).

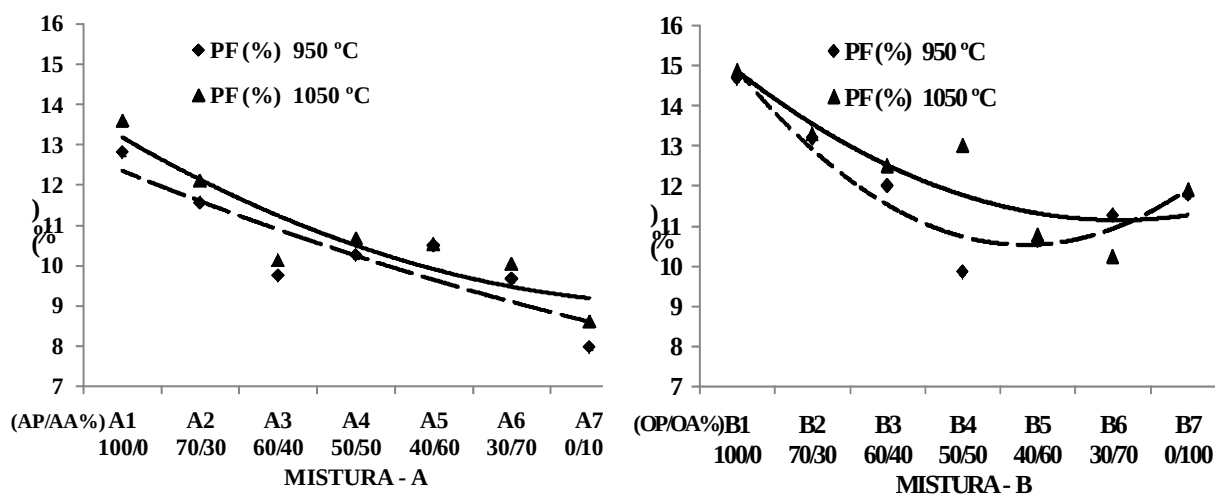


Figura 4.14 – Perda ao Fogo para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C.

A Figura 4.15 apresentou as variações dos valores médios de resistência à flexão para as misturas “A” e “B” a seco e após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C. Para corpos de prova em forma de barras prismáticas verdes, segundo requisitos técnicos, os

valores desejáveis são de 5 a 70 kgf/cm². Verificou-se que, com exceção da combinação A7, todas as outras composições apresentaram resultados positivos. Após sinterização, identificou-se que houve melhoria nas propriedades estruturais dos corpos de prova.

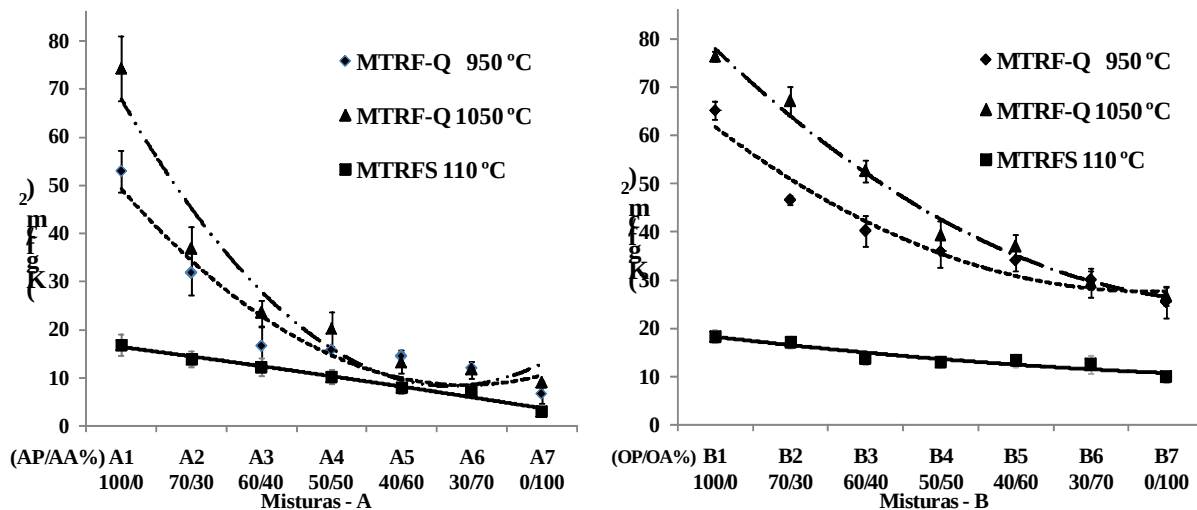


Figura 4.15 – Resistência a Flexão para as misturas “A” e “B”, após sinterização nas temperaturas de 950 e 1050 °C

As curvas ajustadas para os dados experimentais das misturas “A” e “B” mostraram tendências de decaimento da resistência à flexão, conforme aumento da porcentagem da argila AA para mistura “A” e da argila OA para a mistura “B”. Observou-se na Figura 4.16, mistura – “A”, que as composições A4 – A7 apresentaram resistências à flexão após sinterização, muito próximas da resistência a seco indicando que a combinação A2 é passível de ser utilizada, bem como, a combinação A1, que é a argila pura AP, com características de alta plasticidade (54,3%), referenciando-se com a argila pura OP, com alto índice de plasticidade (46,9%). Esses resultados concluíram a existência de uma forte relação entre índice de plasticidade e densificação do material após sinterização com resistência mecânica, ou seja, quanto maior for o índice de plasticidade melhor serão as propriedades dos corpos cerâmicos.

Conforme apresentado na Figuras 4.15, na Tabela 4.4 estão destacados os principais resultados significativos de resistência à flexão. Da mistura “A”, identificou-se que as composições A1 e A2 apresentaram-se mais resistentes com relação às outras cinco composições, com influência do aumento da temperatura, a qual contribuiu para o fortalecimento da resistência, em função da melhoria das propriedades físicas de fusão dos minerais presentes nas argilas e ordenamento dos grãos no corpo cerâmico. As composições

que apresentaram melhores tensões de ruptura estão resumidamente apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados das combinações com significativas resistências a flexão (Kgf/cm²)

Misturas	Temperatura de Sinterização (°C)	
	950	1050
A1 (100%AP)	52,9±7	74,3±4
A2 (70%AP/30%AA)	31,8±4	36,7±5
B1 (100%OP)	65,2±1	76,4±2
B2 (70%OP/30%OA)	46,6±0	67,1±1
B3 (60%OP/40%OA)	40,4±3	52,6±1

As particularidades físicas e químicas das argilas influenciaram diretamente nas variações das propriedades dos materiais cerâmicos processados, em função das distintas interações entre as argilas com diferentes características de plasticidade, matéria orgânica, minerais, tamanho de grãos, sendo avaliado sob dois regimes de temperatura, 950 e 1050 °C sucessivamente.

Nesta etapa, todas as informações coletadas indicaram que as composições A1, A2, B1 e B2 com porcentagem acentuada das argilas OP e AP, apresentaram características de plasticidade superior as outras matérias-primas, e que foram mais satisfatórias para produção de cerâmica vermelha.

Com base nestas conclusões, as referentes composições A1, A2, B1 e B2 foram utilizadas como base para estudar a adição de lodo de ETA em porcentagens peso definidas, cuja finalidade é determinar o máximo possível de lodo que pode ser incorporado às massas de argilas sem causar deformações ou trincas às peças cerâmicas.

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.7 (Materiais e Métodos), definiram-se nesta etapa as melhores composições, em função principalmente, dos seguintes parâmetros: resistência a flexão e absorção de água, os quais indicaram propriedades de interação físico-química e mecânica relevantes para dar continuidade a incorporação do lodo em porcentagem peso às misturas.

Em seguida, definiram-se as misturas AL, AL', BL e BL' conforme apresentado na Tabela 4.5, destacando-se as combinações utilizadas para incorporação de porcentagem peso do lodo, e suas respectivas temperaturas de sinterização.

Tabela 4.5 – Composição das massas com adição de porcentagem peso de lodo.

Sinterização	Mistura AL - Componentes da Mistura A2 + Lodo		Mistura BL - Componentes de Mistura B2 + Lodo		Mistura AL` - Componente Puro, Argila AP + Lodo		Mistura BL` - Componente Puro, Argila OP + Lodo	
Temperatura (°C)	A2 (%)	Lodo (%)	B2 (%)	Lodo (%)	A1(%)	Lodo (%)	B1 (%)	Lodo (%)
α - 950	96	4	96	4	96	4	96	4
	92	8	92	8	92	8	92	8
	88	12	88	12	88	12	88	12
	84	16	84	16	84	16	84	16
β - 1050	96	4	96	4	96	4	96	4
	92	8	92	8	92	8	92	8
	88	12	88	12	88	12	88	12
	84	16	84	16	84	16	84	16

4.2.2 Adição de Lodo às Massas Cerâmicas

Nas Figuras 4.16 e 4.17 observaram-se os resultados ilustrativos da adição de porcentagens de lodo as misturas AL e BL de acordo com a Tabela 4.5. Notou-se que a mistura AL não apresentou deformações nem fissuras, porém, demonstrou maior quantidade de grânulos na superfície do corpo cerâmico conforme o aumento da concentração adicionada de lodo à massa. Para a mistura BL, observou-se que, a mudança de temperatura de sinterização, de 950 para 1050 °C, influenciou no aparecimento de fissuras na superfície do corpo cerâmico com incorporação de 8% de lodo, o que descaracteriza uma boa propriedade para cerâmica vermelha.

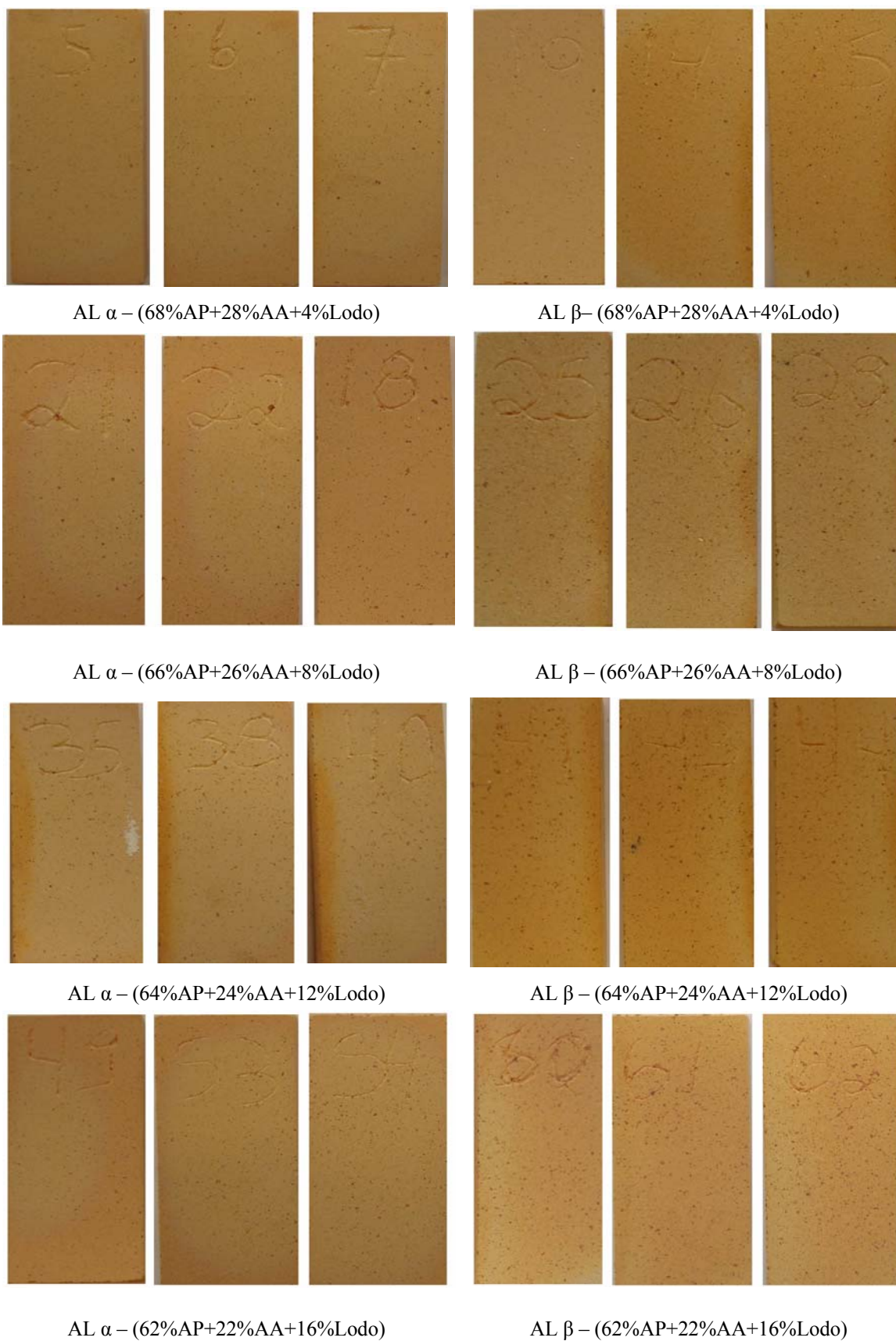


Figura 4.16 – Ilustração dos corpos de prova referentes as composições AL, sinterizadas em dois regimes de temperaturas.



BL α – (68%OP+28%OA+4%Lodo)

BL β – (68%OP+28%OA+4%Lodo)



BL α – (66%OP+26%OA+8%Lodo)

BL β – (66%OP+26%OA+8%Lodo)



BL α – (64% OP + 24% OA + 12% Lodo)

BL β – (64% OP + 24% OA + 12% Lodo)



BL α – (62%OP+22%OA+16%Lodo)

BL β – (62%OP+22%OA+16%Lodo)

Figura 4.17 – Ilustração dos corpos de prova referentes as composições BL, sinterizadas em dois regimes de temperaturas.

Observou-se na Figura 4.18 que a composição AL e BL na temperatura de 1050 °C apresentaram contrações mais elevadas em relação à temperatura de 950 °C. Entretanto, todas as composições em ambas as temperaturas de sinterização apresentaram resultados que se enquadram dentro dos padrões técnicos, de no máximo 15%. Verificou-se que ao adicionar porcentagens peso de lodo nas composições definidas (Tabela 4.2.2), a contração linear aumentou, principalmente para os corpos de prova AL sinterizados na temperatura de 1050 °C, mostrando-se percentualmente superior com relação as outras composições. A mistura BL sinterizada na temperatura de 950 °C apresentou a menor retração linear em relação a composição BL` sinterizada na temperatura de 1050 °C. Estes resultados descritos são aplicáveis para fabricação de produtos cerâmicos.

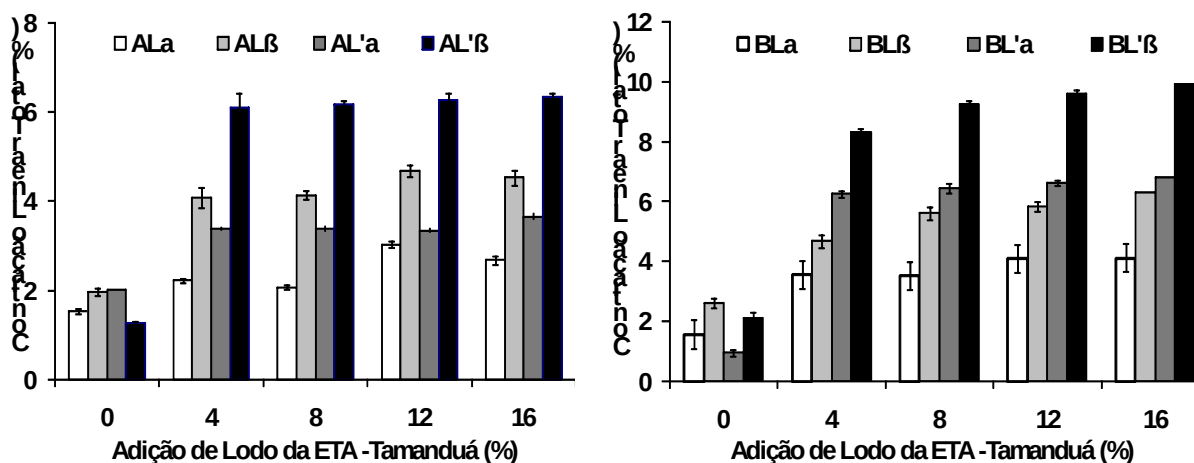


Figura 4.18 – Contração linear das Misturas AL e AL`, BL e BL` com % peso de lodo.

A Figura 4.19 apresenta os resultados de absorção de água das composições com adição de lodo. Verificou-se que a composição AL e AL`, ambas sinterizadas na temperatura de 950 °C, ao se adicionar 12 e 16% de lodo, apresentaram valores superiores ao recomendado que é de 25%. Com relação às composições sinterizadas na temperatura de 1050 °C, os resultados são mais elevados com adição em até 16% de lodo. Observou-se que somente a composição BL` sinterizada na temperatura de 1050 °C revelou valores superiores às especificações técnicas. Entretanto, ao adicionar lodo à massa cerâmica não houve acréscimo significativo.

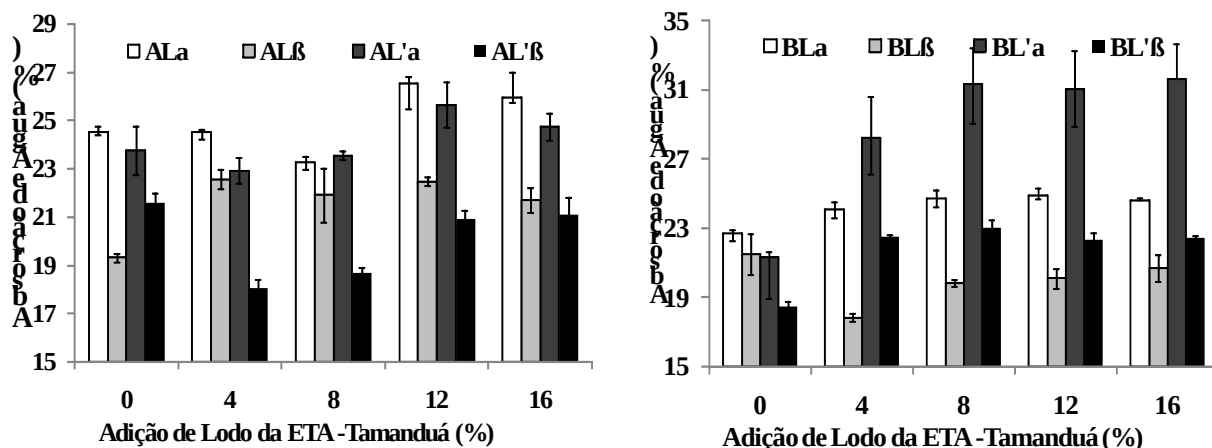


Figura 4.19 – Absorção de Água das Misturas AL e AL', BL e BL' com % peso de lodo.

Na Figura 4.20 destacam-se significativos aumentos na porosidade da peça cerâmica com a adição de lodo. As composições AL e AL' apresentaram valores satisfatórios quando sinterizadas na temperatura de 1050 °C, com destaque para a composição BL sinterizada a 950 °C.

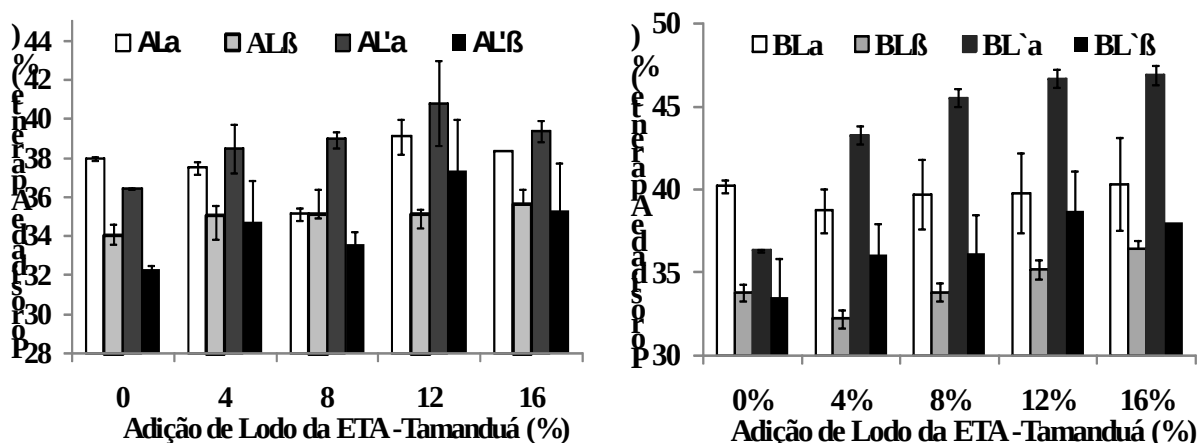


Figura 4.20 – Porosidade Aparente das Misturas AL e AL', BL e BL' com % peso de lodo.

Verificou-se que a massa específica aparente é um importante parâmetro que está diretamente relacionado ao grau de sinterização da peça cerâmica, tendo aumento significativo com a porcentagem de lodo adicionado à massa e também com o aumento da temperatura de 950 para 1050 °C.

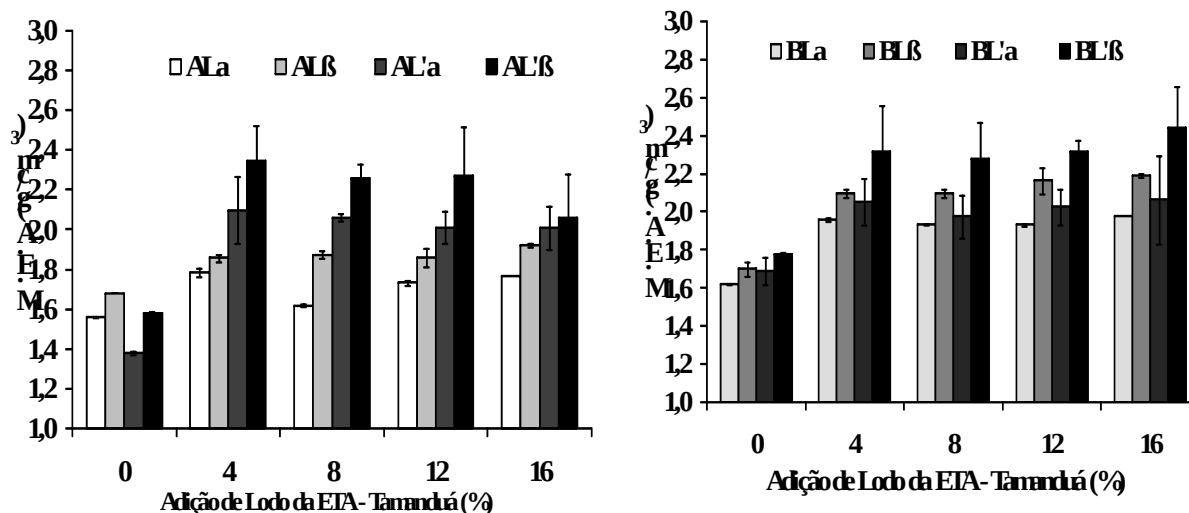


Figura 4.21 – Massa Específica Aparente da Mistura AL, AL', BL e BL com % peso de lodo.

Na Figura 4.22, notou-se que houve variação significativa de perda ao fogo com a adição de lodo às composições, com destaque para as composições AL' e BL' que apresentaram maior perda de massa, ambas sinterizadas na temperatura de 950 °C. Esse fato está diretamente relacionado à presença de carbonatos e/ou sulfatos existentes no lodo que se volatilizam pela influência da temperatura de sinterização, contribuindo especificamente para retração da peça, como também, no aparecimento de corpo negro e diminuição da resistência mecânica.

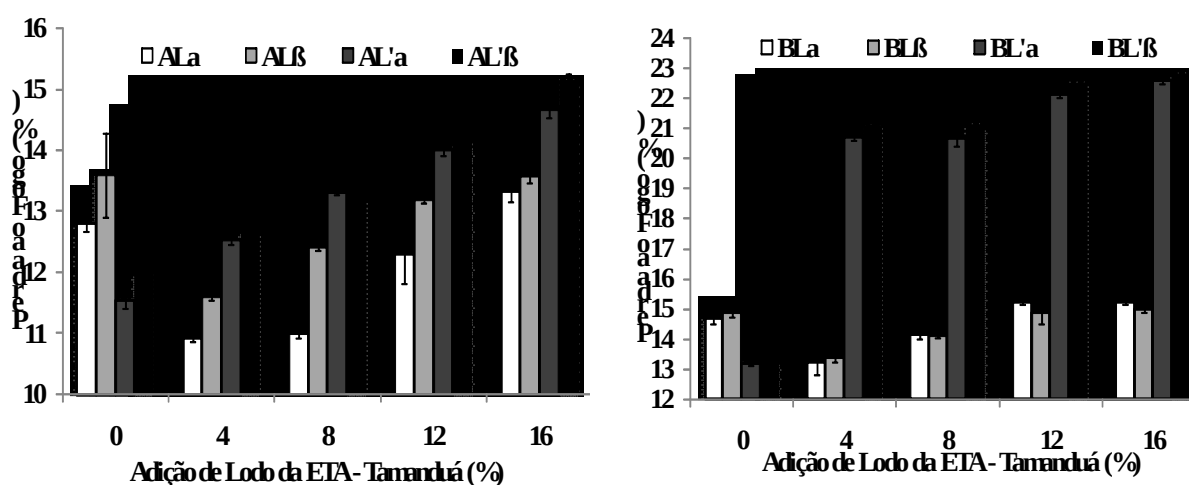


Figura 4.22 – Perda ao Fogo da Mistura AL, AL', BL e BL com % peso de lodo.

A Figura 4.23 mostrou que ao adicionar lodo de ETA às composições, ocorreu diminuição à resistência mecânica significativamente para todas as composições. A mistura

de 12% apresentou trincas e deformações lineares, fator que inviabiliza a produção de materiais cerâmicos.

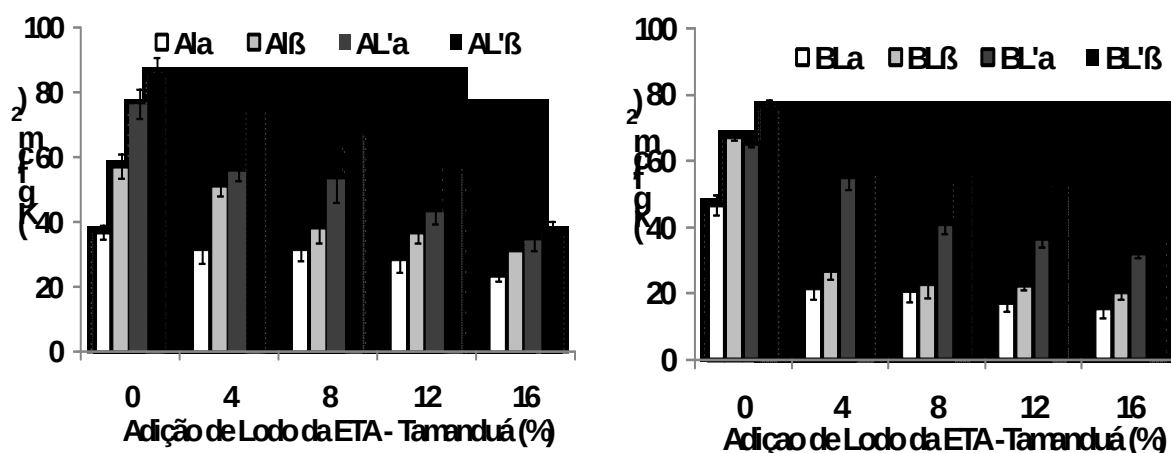


Figura 4.23 – Tensão de Ruptura a Flexão das composições AL, AL', BL e BL' com % peso de lodo.

Notou-se na Figura 4.24 que a composição BL', foi a que apresentou maior resistência à flexão, entretanto, decaiu em função da adição de lodo. Observaram-se tendências de diminuição da resistência conforme se adiciona porcentagens de lodo à massa, o que vem confirmar ser uma matéria-prima com característica não plástica. Com base no estudo realizado, verificou-se que a porcentagem máxima de lodo tolerada em massa cerâmica sem causar trincas e deformações é de 8%. Observou-se que, o lodo pode substituir parcialmente as argilas AA e OA nas misturas, uma vez que apresentaram características semelhantes.

Todas as composições (AL, AL', BL e BL') com 8% de lodo apresentaram resultados significativos. Para tanto, investigou-se a estrutura do material por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise (EDS), selecionando-se quatro corpos de prova, um de cada composição com 8% de lodo, os quais apresentaram características positivas para uso na indústria de cerâmica vermelha.

Pode-se observar na micrografia referente à amostra AL + 8% de lodo, apresentada na Figura 4.24, a existência de vários minerais que cristalizaram isoladamente na superfície, como no caso do óxido de ferro em destaque na micrografia (b) e no espectro de raios X (c). Observaram-se descontinuidades e falhas na estrutura, bem como, grãos de distintos tamanhos que não formaram ligação entre si. Salienta-se que a região em cinza clara, foi detectada a presença majoritária de óxido de ferro, de alumínio, de silício e de titânio.

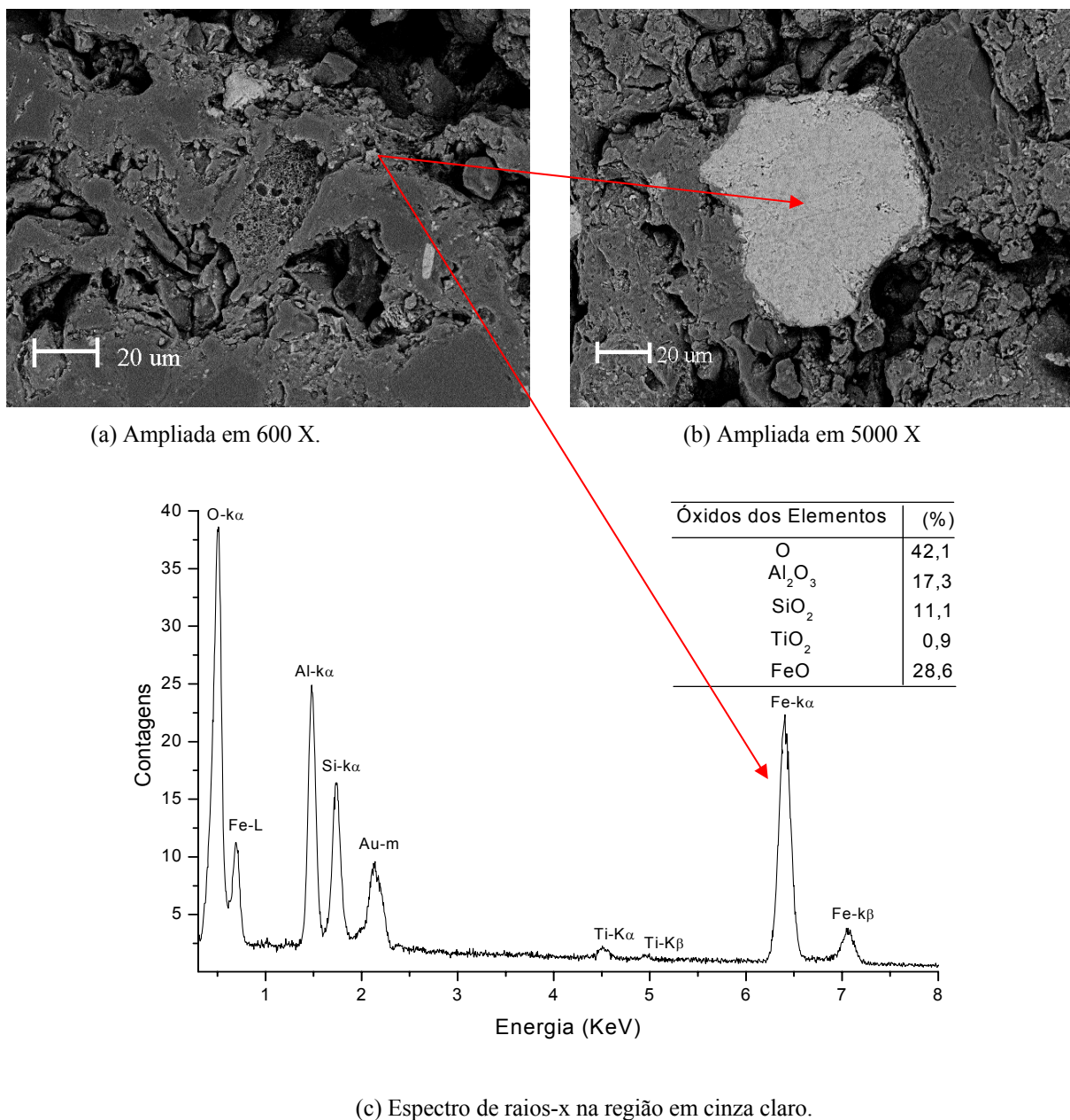
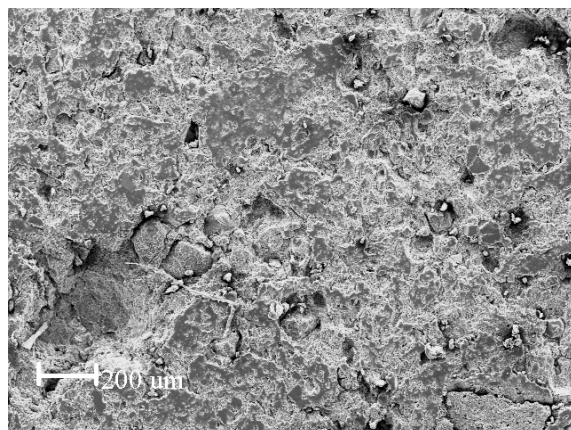
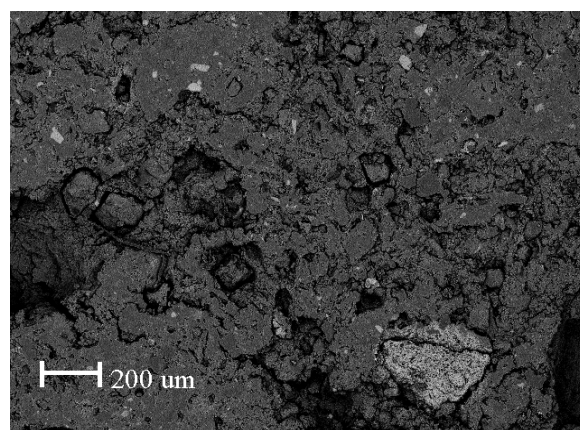


Figura 4.24 – Microanálise da amostra AL com 8% de lodo por μ EDX-RF, apresentando o pico do ferro.

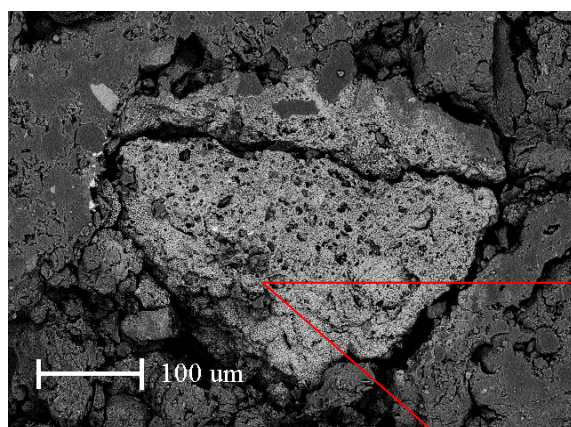
As micrografias apresentadas na Figura 4.25, são referentes a estrutura e composição da mistura AL' com 8% de lodo. Observaram-se grãos de diferentes granulometrias e minerais cristalizados separadamente. Identificou-se a presença do óxido de titânio sinterizado na superfície da amostra, com falha em todo o contorno de ligação à estrutura da cerâmica. Esta característica é uma indicação da baixa interação do titânio com os argilominerais presentes, influenciando no aumento da porosidade da peça cerâmica e na resistência mecânica da peça. Destacou-se na região em cor cinza clara nas micrografias, as micrografias que a estrutura é formada majoritariamente pelos óxidos de titânio, silício, alumínio e ferro.



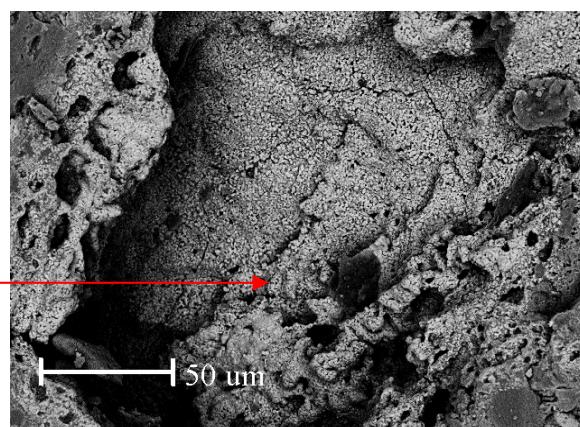
(a) Ampliada em 50X.



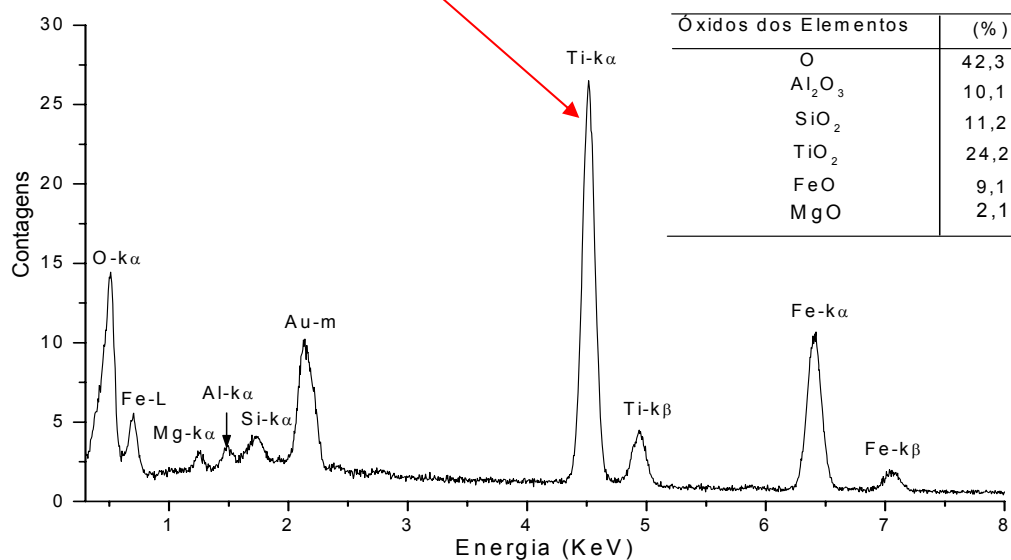
(b) Ampliada em 50X.



(c) Ampliada em 100X.



(d) Ampliada em 450 x



(e) Espectro de raios-x.

Figura 4.25 – Microanálise da amostra AL' com 8% por μ EDX-RF, apresentando o pico do titânio.

Na mesma composição (AL' com 8% de lodo), há grande percentual de alumina-silicato que formaram a estrutura da cerâmica. Observou-se que a granulometria é

heterogênea, com empacotamento dos grãos densos. Destacou-se que algumas partículas estavam presas pela sinterização da estrutura do entorno, a qual contribuiu na densificação do material influenciando positivamente na melhoria das propriedades da cerâmica. A Figura 4.26 apresentou tais características citadas e destacou a presença do óxido de alumínio detectado na superfície da amostra, com grânulos dos minerais que se solidificaram isoladamente com distintas formas. Na micrografia (a) identificou-se um bom empacotamento das partículas, com muitos grãos de mesma aparência granulométrica, seguros pela solidificação entre os argilominerais. Fator esse que, contribuiu favoravelmente para redução da absorção de água. Na micrografia (b), analisou-se que a estrutura do material é homogênea com diferentes tamanhos de grânulos que, após a sinterização, uniram-se no processamento, ocupando-se melhor no espaço da peça. Nesta região da amostra, detectou-se a presença majoritária de óxidos de alumínio e de silício.

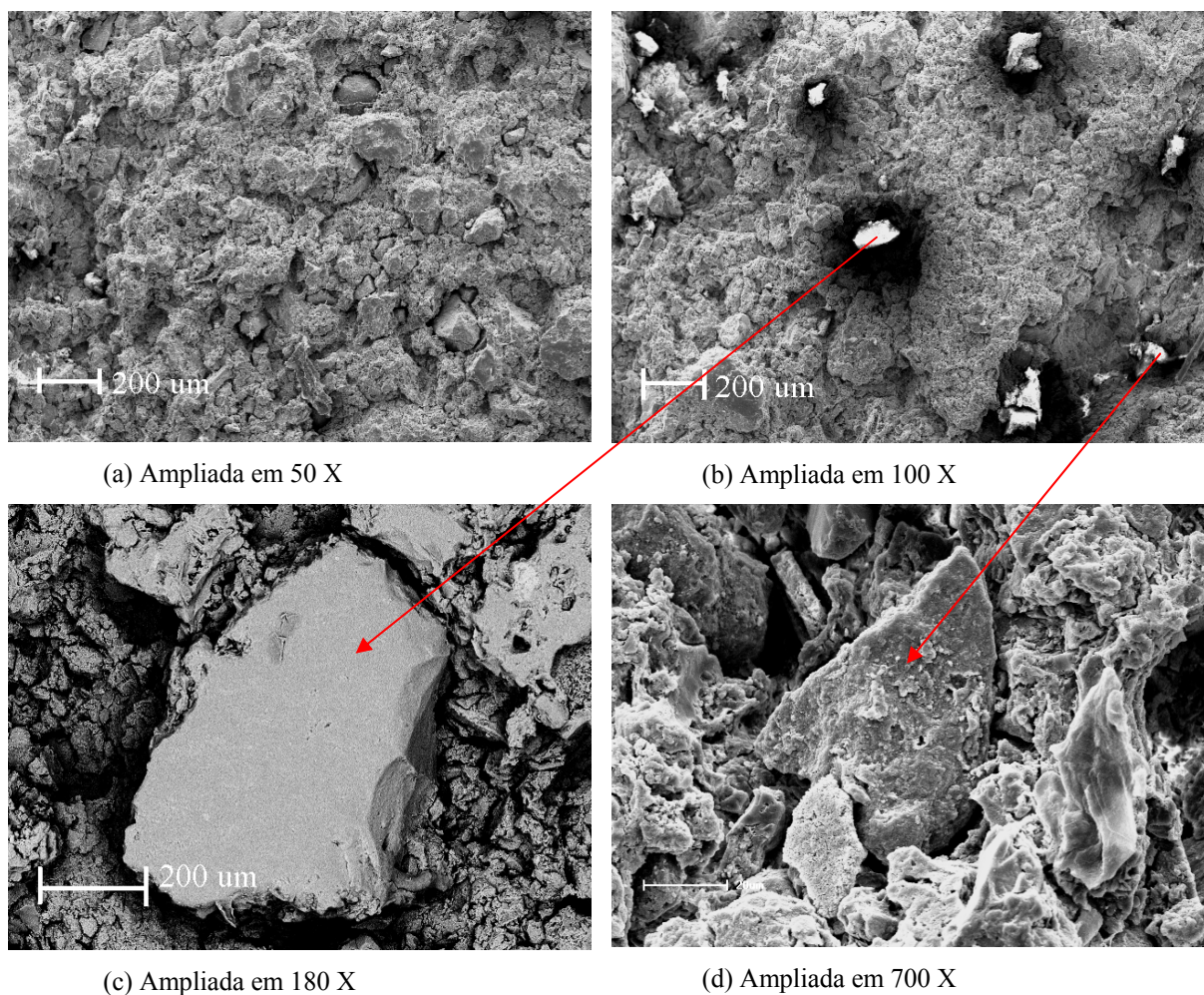
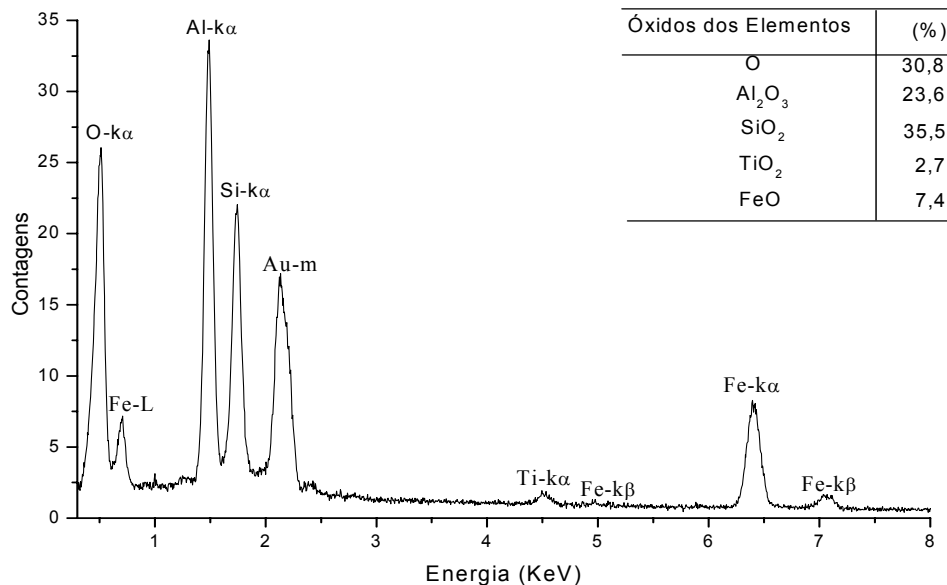


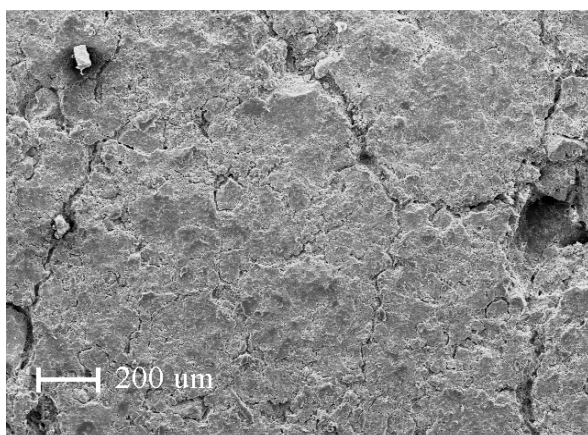
Figura 4.26 – Microanálise da amostra AL' com 8% de lodo por μ EDX-RF, apresentando pico do alumínio.



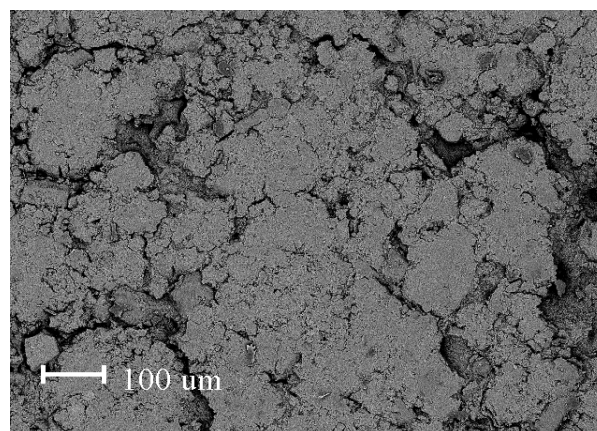
(e) Espectro de raios X.

Continuação da **Figura 4.26** – Microanálise da amostra AL' com 8% de lodo por μ EDX-RF, apresentando pico do alumínio.

A Figura 4.27 apresentou a estrutura da composição BL + 8% de lodo, e visualizaram-se na estrutura fissuras na superfície, que aparentemente não formaram caminhos para dentro do interior da peça cerâmica. Observou-se que a estrutura está bem arranjada, com junção lisa entre as camadas, indicando que houve boa sinterização da peça, influente a composição presente de alumino-silicatos. Identificou-se que a cristalização de partículas na superfície não interagiu com a matéria e influenciou no aparecimento de fissuras. Os elementos majoritários detectados foram óxidos de alumínio, de silício, de ferro e de titânio.

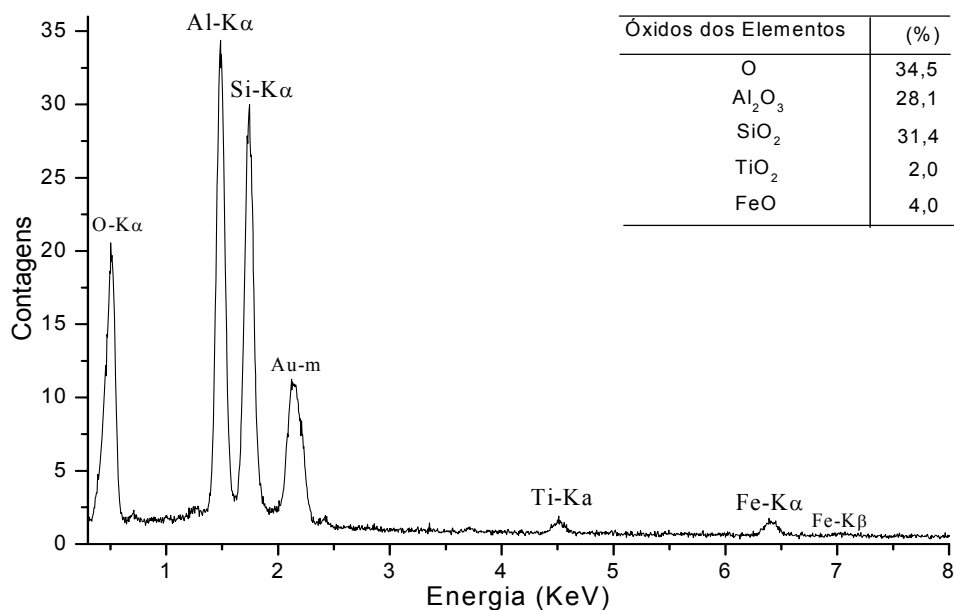


(a) Ampliada em 50 X



(b) Ampliada em 100 X

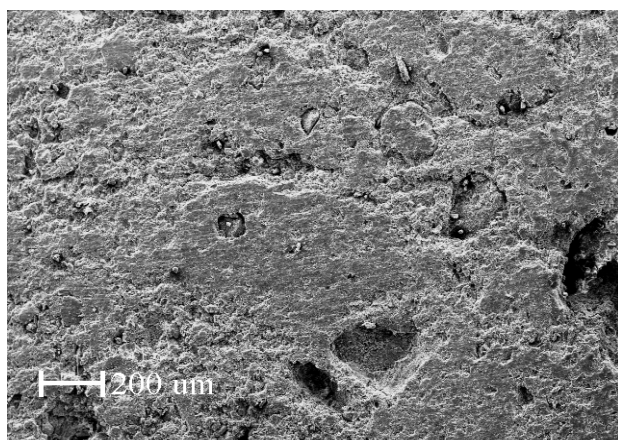
Figura 4.27 – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do alumínio.



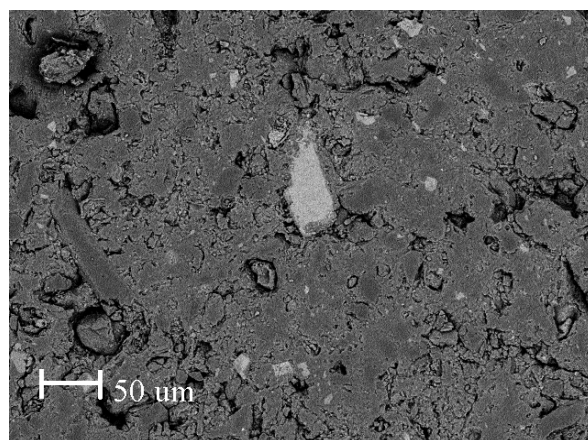
(d) Espectro de raios X

Continuação da **Figura 4.27** – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do alumínio.

Na Figura 4.28, referente a composição BL' com lodo, observou-se que a estrutura da superfície estava bem compactada, formada por diferentes minerais identificados pelas distintas colorações apresentadas na micrografia (b). Encontrou-se argilominerais presentes na superfície da amostra, cuja predominância foram os óxidos de titânio e de ferro, como pode ser visualizado no espectro (d). A formação da estrutura apresentou-se densa e compacta, com grãos frágeis, descolando-se da estrutura, em função do baixo grau de ligação química entre as partículas que impossibilitou a agregação na rede estrutural.

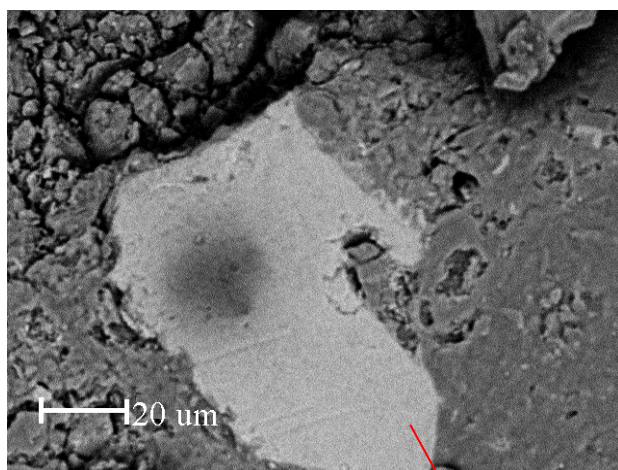


(a) Ampliada em 50x

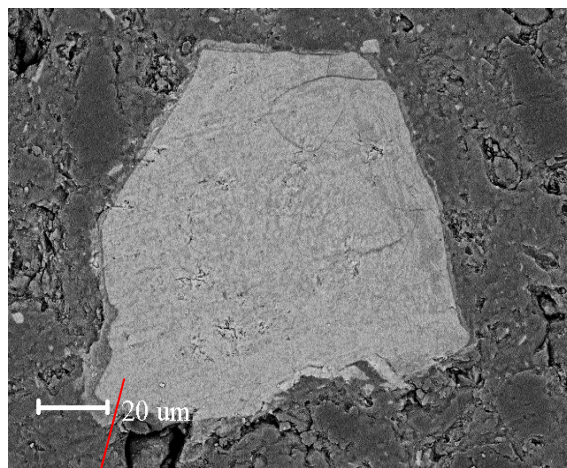


(b) Ampliada em 200x

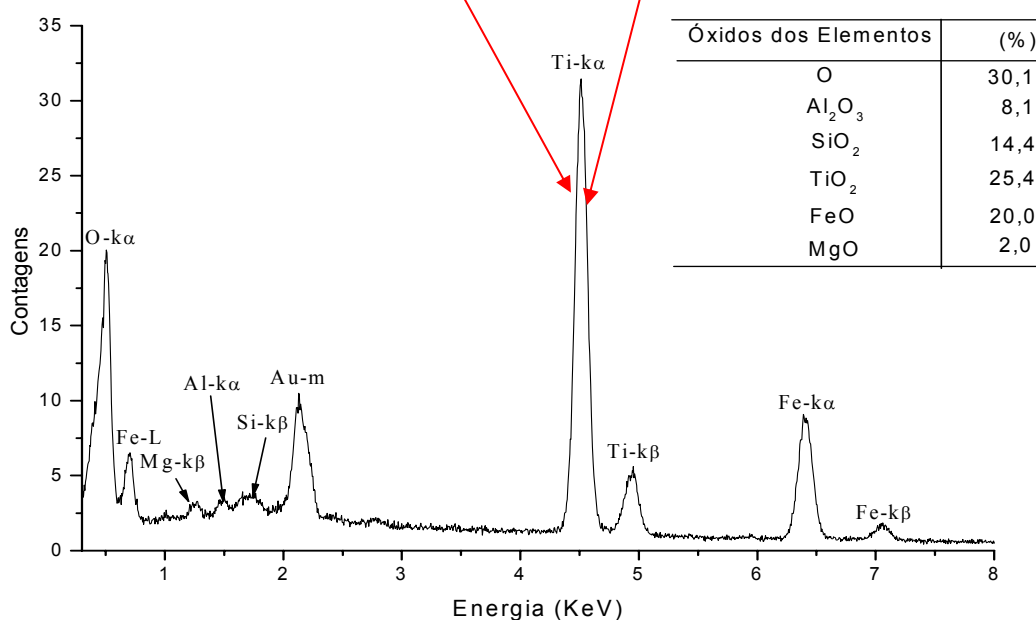
Figura 4.28 – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do titânio na amostra.



(c) Ampliada em 700x



(d) Ampliada em 600x



(e) Espectro de raios-X

Continuação da **Figura 4.28** – Microanálise da amostra por μ EDX-RF, apresentando o detalhe do titânio na amostra.

Com base na série de ensaios tecnológicos e análises realizadas, verificou-se que as argilas toleraram a incorporação de no máximo 8% de lodo. Acima desse valor, ocorreram falhas na estrutura da peça cerâmica, conforme analisadas perante os requisitos técnicos e científicos. Para fins de utilização em cerâmica artística, verificou-se que a mistura com 8% de lodo + 66% da argila AP + 26% da argila AA, apresentaram resultados significativos. Entretanto, verificou-se que a composição da argila pura AP em 92% + 8% do lodo, também apresentou-se de boa qualidade. Porém como a argila AP, é mais difícil de ser encontrada na

superfície terrestre, e por se tratar de matéria-prima de alta plasticidade, com insurgências principalmente em áreas hidromórficas, nascentes de rios, deve-se considerar a incorporação de outras argilas, como no caso da argila AA mais arenosa, que encontram-se mais abundante em locais distantes de áreas de insurgência da argila AP. Este motivo justifica o uso de misturas das argilas, devido a dificuldade de encontrar somente argilas de elevada plasticidade para extração, bem como, a busca por características química, mineralógica, granulométrica e com atividade de interação em sinergias positivas para obtenção de uma massa propícia para cerâmica vermelha. Todas as características analisadas contribuíram para definir as misturas com propriedades ideais para obtenção de uma massa consistente cujas propriedades atendam as demandas para fabricação de cerâmica vermelha para artesanato. Visando obter informações para possibilitar a utilização do resíduo por artesões, preparou-se a mistura conforme a metodologia descrita, composta pela mistura de 8% de lodo + 66% da argila AP + 26% da argila AA, sendo repassada para a artesã do Ñandeva que, com sua experiência, preparou um artefato cerâmico e sinterizou em forno industrial a 900 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. O artefato cerâmico está apresentado na Figura 4.29.



Figura 4.29 – Experimento realizado por artesã do Ñandeva, sinterizado a 900 °C.

As considerações da artesã perante o material artístico produzido com 8% de lodo foram às seguintes:

- A forma da peça não se alterou após sinterização, o que indica baixa retração;
- A peça cerâmica não apresentou fissuras e nem pontos de descontinuidade;
- A coloração ficou muito escura, característica não muito desejada para materiais de cerâmica artística;

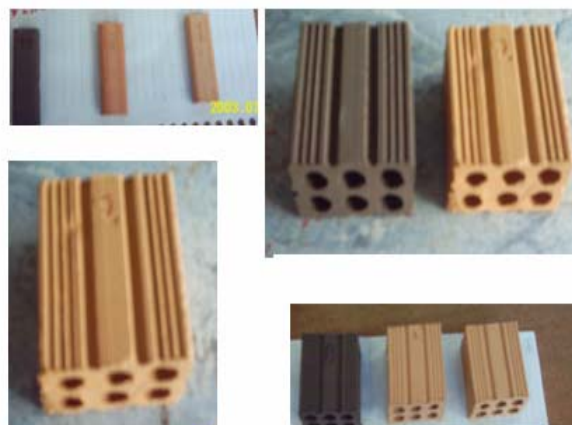
A princípio, verificou-se que a incorporação de lodo na cerâmica artística apresentou propriedades satisfatórias, porém, com características de cor após sinterização, não favorável para este ramo de trabalho.

Para cerâmica industrial, especificamente na fabricação de tijolos, verificou-se que a mistura ideal foi de 66% da argila OP + 26% da argila AO + 8% de lodo da ETA. A mistura com 92% da argila OP + 8% de lodo foi satisfatória, entretanto, a massa com boa plasticidade definida para produção de tijolos, foi a primeira com componentes de argila gorda (OP), argila magra (AO) e desplastificante (LODO), com grau de trabalhabilidade tolerável para massa a ser extrudada.

Conforme requisitos de avaliação das propriedades da mistura definida para produção de tijolos e tarugos, fez-se ensaios pelo método de extrusão, fabricando-se 20 corpos de prova, sendo 10 avaliados a seco e 10 sinterizados na temperatura de 900 °C com taxa de aquecimento de 3 – 5 °C/min, em patamar de sinterização de 3 horas, e resfriamento na temperatura ambiente do forno. Salienta-se que a secagem dos corpos de prova foi realizado em meio natural por um período de 7 dias, simulando o sistema industrial. Observou-se que na Figura 4.30, tanto os tijolos de 6 furos, bem como, os tarugos, apresentaram ótima aparência visual e após sinterização, com ausência de eflorescências e fissuras.



(a) Corpo de prova seco



(b) Corpos de prova secos e sinterizados

Figura 4.30 – Cerâmica vermelha industrial.

Visando a comparação e influência, fez-se uma massa sem lodo e outra com 8% de lodo. Os resultados obtidos do protótipo pela técnica de extrusão, bem como, suas considerações perante a mistura com lodo e sem lodo estarão descritas a seguir.

O método de preparo dessa massa seguiu os procedimentos de preparação dos corpos cerâmicos em forma de barras prismáticas com distinção da incorporado do lodo em condições reais de saída da fase de centrifugação visando reduzir o volume de água

adicionada a massa para que adquira plasticidade. Em relação às propriedades físicas e relativo ao aspecto visual, de resistência mecânica, com ausência de eflorescência na superfície, a dimensão e durabilidade, foram características importantes para avaliação dos tijolos desenvolvidos com aditivos de resíduos.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.6, conclui-se que a contração de secagem da mistura com lodo foi mais elevada em relação à massa sem lodo. A retração linear indicou o grau de água vicinal e hidratada existente na superfície das argilas, elevou-se devido a porcentagem de lodo adicionada reter água nos micro-poros e porcentagem de matéria orgânica se volatiliza e contribui conjuntamente para o aumento da absorção de água identificada após processo de secagem e de sinterização (RIBEIRO et al, 2003).

Em relação à Absorção de Água, verificou-se que os corpos cerâmicos encontraram-se dentro dos parâmetros estipulados pela NBR 8947. A porosidade aumentou com a adição de desplastificante à massa. Analisou-se que a tensão de ruptura diminuiu com a adição de 8% de lodo, em função do aumento da descontinuidade entre os grânulos pelo aumento dos grãos de areia que diminui a plasticidade da massa. No entanto, atenderam-se aos padrões exigidos bem como, o de resistência que é de no mínimo 15 kgf/cm².

Tabela 4.6 – Resultados da avaliação físico-mecânica dos tijolos de 6 furos.

Misturas	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	AA (%)	PA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ²)	TRC (Kgf/cm ²)	TRCs (Kgf/cm ²)
Com lodo	6,2±0,8	2,5±0,7	8,9±0,3	24,6±0,2	38,3±2,3	11,1±0,0	1,7±0,1	42,6±1,2	5,3±0,8
Sem lodo	1,2±0,3	1,8±0,3	2,5±0,6	21,4±0,4	34,0±0,8	9,4±0,1	1,7±0,1	66,1±0,1	7,4±1,2

Realizou-se o ensaio para aferição da mistura com 65% OP + 25% OA + 10% de lodo na massa, e verificou-se que no processo de secagem natural surgiram trincas e deformações na peça cerâmica. Logo, descartou-se a hipótese de aumentar a porcentagem de lodo a ser incorporada na massa cerâmica.

Contudo, todos os resultados mostraram que os lodos gerados em estações de tratamento de água podem ser destinados para empresas cerâmicas como matéria prima integrante no processo de produção de novos materiais, de forma a reduzir o valor do produto, os impactos ambientais de disposição final, bem como, na redução de extração de argila.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No setor de saneamento, várias pesquisas têm buscado soluções para destinação adequada dos lodos gerados em estações de tratamento de água. Por influência do crescimento urbano, há cada vez mais demanda de água potável, e por outro lado, a supressão dos recursos hídricos tem exigido o uso de processos avançados nas ETA's para retirada das impurezas presentes nas águas dos mananciais. A tendência de geração de lodo nas ETA's é crescente, e a destinação é uma preocupação paralela aos requisitos do sistema de gestão ambiental ISO 14000. Para isso, a pesquisa orienta o caminho para definição de soluções tecnicamente viáveis, em função da localização da Estação de Tratamento de Água, frente ao potencial de oportunidades regionais oferecidas para tal ação. Em foco, o setor ceramista é promissor para incorporação deste resíduo para produção de novos materiais, e com base nessa dissertação, conclui-se que:

- As características do lodo gerado na ETA Tamanduá não apresentaram variações significativas para os dois períodos estacionários amostrados, entretanto, classificou-se como sendo desplastificante, devido às seguintes evidências: elevado percentual de grãos de areias e siltes com presença majoritária do quartzo (SiO_2) e porcentagem significativa de matéria orgânica, com baixas condições de interação entre as partículas detectado pelo índice de Atterberg. A composição química majoritária do lodo foi Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , com traços de óxidos de Ti, Ca, Mn. Verificou-se que o maior percentual químico da composição foi o Al_2O_3 , podendo esse composto ser proveniente da fração terrosa dos sólidos dissolvidos água do rio, bem como, ser oriundo dos precipitados químicos, no caso, o coagulante Policlorato de Alumínio (PAC) adicionado na fase de coagulação da água.

- Verificou-se que as partículas do lodo formaram-se por aglomeração de grãos de formas irregulares com morfologia não definida, evidenciando frágil desagregação quando seco e com baixa interação química entre si.

- O teste de sinterização do lodo puro na temperatura de 900 °C apresentou coloração laranjada, aspecto positivo para cerâmica vermelha, indicando ser um bom aditivo em termos de cor em misturas para argilas que, após a sinterização apresentarem coloração clara. Essa propriedade de cor laranja-vermelho é uma característica específica dos elementos majoritários Al_2O_3 e Fe_2O_3 , sendo uma propriedade desejada pelos consumidores de produtos a base de cerâmica vermelha.

- As argilas OP e AP, além da predominância do quartzo apresentaram fases dos argilominerais caulinita/haloisita e hematita, importantes elementos para cerâmica vermelha, características da formação geológica por derrames basálticos, onde está depositado os principais argilominerais de alumino-silicatos e ferro.

- Estas argilas foram, caracterizadas como sendo inorgânicas de alta plasticidade com granulometria favorável para produção de cerâmica vermelha, e teor de matéria orgânica de interesse para interface de ligação com os elementos majoritários, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

- As argilas AA e OA foram classificadas como siltes inorgânicos de alta compressibilidade e argilas orgânicas, com percentual de areia de quartzo de mediana plasticidade. A baixa concentração de elementos fundentes nas argilas, e a presença de alumínio e ferro indicaram a necessidade da utilização de temperaturas de sinterização mais elevadas, cuja finalidade é promover a formação da fase líquida na sinterização, melhorando as propriedades dos materiais cerâmicos, diminuindo assim os fatores de porosidade (maior densificação do sistema), favorecendo o aumento das propriedades de resistência mecânica..

- As temperaturas de sinterização utilizadas foram suficientes para analisar as variações das propriedades para melhoria da peça cerâmica. Notou-se que as propriedades dos corpos de prova melhoraram suas resistências em função do aumento da massa específica aparente na temperatura de sinterização mais elevada (1050 °C), favorecendo a formação da fase líquida dos elementos químicos majoritários, induzidos a interação e formação da estrutura sólida.

- O melhor empacotamento dos grãos ocorreu nas misturas com porcentagens superiores a 70% das argilas AP e OP, contribuindo diretamente para os resultados de menor absorção de água e maior resistência mecânica. Observou-se que o fator plasticidade está diretamente relacionado com a resistência do material cerâmico, ou seja, quanto maior a porcentagem da argila AP e OP adicionada na mistura melhor as resistências mecânicas, devido a elevada intensidade de interações entre os argilominerais.

- Em todos os casos, as retrações lineares não ultrapassaram os requisitos normativos de 15%, entretanto, porcentagem significativa de matéria orgânica presente no lodo contribuiu para contração linear da peça cerâmica, deformações e defeitos na estrutura quando em elevadas concentrações de lodo acima de 8%, onde não apresentaram propriedades satisfatórias, devido aumento na perda de massa, menor resistência mecânica e o aparecimento de defeitos de trincas nas peças cerâmicas.

- Dos resultados dessa pesquisa, conclui-se que, a concentração de lodo a ser incorporada na massa de cerâmica vermelha sem causar trincas e deformações é de no máximo 8%. Entretanto, salienta-se que o lodo pode substituir parcialmente as argilas com características físico-químicas e mineralógicas similares.

- A produção de tijolos pelo processo de extrusão apresentou possibilidade integral de incorporar lodo com condições de umidade real de saída da centrífuga nas massas para fabricação de cerâmica vermelha. Esta prática tende a reduzir o consumo de água a ser adicionada a massa para que ocorra a interação entre os argilominerais de forma a tornar a massa plástica para uso industrial.

- Os resultados demonstraram que o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água da unidade Tamanduá em Foz do Iguaçu – PR, não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas. No entanto, este resíduo pode ser usado em pequenas quantidades em massas argilosas, onde as argilas usadas podem ser da mesma região como sugerido nessa pesquisa. Por fim, conclui-se que todos os objetivos deste trabalho foram alcançados.

5.1 SUGESTÕES

- Neste trabalho não foram realizadas as análises de caracterização das argilas e do lodo por DTA e ATG. Portanto, sugere-se que sejam realizadas tais análises, com objetivo de verificar as condições térmicas de mudança de fases dos minerais presentes em cada matéria prima, visando aperfeiçoar a temperatura de sinterização dos materiais cerâmicos;

- Fazer teste de durabilidade do tijolo ao longo do tempo com porcentagens de lodo de ETA de forma a comprovar sua eficácia do ponto de vista da qualidade do produto final.

- Realizar estudo de maturação de argila com porcentagens de lodo incorporado a úmido nas argilas por períodos de tempo pré – definidos, cuja finalidade seja de verificar o equilíbrio e melhoria da qualidade da massa cerâmica cuja interação entre os argilominerais seja favorável para produção de cerâmica vermelha.

- Desenvolver modelo matemático para quantificar a geração de lodo na Estação de Tratamento de água Tamanduá.

- Fazer um mapeamento da bacia do rio Tamanduá para identificar os impactos ambientais existentes, visando planejar intervenções para minimizar os impactos de poluição do manancial de captação e conseqüentemente reduzir a geração de lodo na ETA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 6459/84**, Solo-determinação do Limite de Liquidez: Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

ABNT, Brasileira de Normas Técnicas **MB – 28**, Determinação da massa específica dos grãos de solo. 1977. 12p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7171**, Bloco Cerâmico Para Alvenaria, Especificações. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7180**, Solo-determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 8947** – Telha cerâmica: determinação da massa e de absorção de água. Rio de Janeiro, 1985.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 6461**, Bloco cerâmico para alvenaria verificação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1983. 3p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 10.004**, Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 71p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR-8947** – Telha cerâmica: determinação da massa e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 1p.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Americam water works association**. Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual. New York, 1996. 294 p.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F. ; SALES, A. ; BARON, O. . **Caracterização físico-química do lodo da Estação de Tratamento de Água Passauna**. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE BÍOSSÓLIDOS, 2003

AWWA. **Coagulant Recovery: A Critical Assessment**. EUA: AWWA Research Foundation, 1991.

AWWA, ASCE, EPA. **Management of Water Treatment Plant Residuals**. EUA, 1996.

BARBA, A.; BELTRÁN V.; FEH, C.; GARCIA, J.; GOMES, F.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. 1. ed. Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón, 1997. 291 p.

BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de lodos de estações de tratamento de água à biota aquática através de estudos ecotoxicológicos**. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000. 200 p. (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D.M. **Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) – Desidratação em leitos de Secagem e Codisposição em Aterro Sanitário**. In: ANDREOLI, C.V. (Org). **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518**, de 25 de março de 2004.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 357** de 17 de março de 2005.

BRINK, N. C. P.; GARDENALLI, J. F.; FERREIRA FILHO, S. **Desaguamento mecânico de lodos de estação de tratamento de esgotos em conjunto com lodos de estação de tratamento de água**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005.

BOUMANS, P. e KLOCKENKÄMPER, R.. **Total reflection X-ray fluorescence spectrometry**. Proc. of the Second Workshop on TXRF, Dortmund, 26-27 May, 1988. Spectrochim. Acta, 44B: 433, 1989.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. V.1. 6º Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 234p.

CASTRO, A. A.; DIAS, A. M. V.; RENNÓ, C. R. A.; César, L.A.S; DAMATTOS, M; MONTERIO, T. A. S. **O problema da caracterização qualitativa e quantitativa dos efluentes gerados nas estações de tratamento de água – O caso da unidade de tratamento**

e recuperação de resíduos – UTR do sistema rio das velhas. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19. Anais Eletrônicos II – 059. Foz do Iguaçu. Brasil. 1997.

CALISTER, Willian D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 5^a Edição. Ed. LTC. 1999.

CONSIGLIERO, R. G. **Caracterização e Biodegradação de Lodo de ETA para descarte em Aterro Sanitário.** Rio Claro. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2005. 88p. (Mestrado em Ciências Biológicas).

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.** São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993. 343p. (Doutorado em Hidráulica e Saneamento).

CORDEIRO, João Sérgio. **Processamento de lodos de estação de tratamento de água (ETA's).** In ANDREOLI, C.V. (Coord.). Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. cap.5.

CORDEIRO, João Sérgio; CAMPOS, José Roberto. **O impacto ambiental provocado pela indústria da água.** Revista de Saneamento Ambiental. São Paulo, n°56, p. 52-57. Mar-abr.1999.

CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; GOULD, G. R.; VANDERMEYDEN, C. **Handbook of Practice – Water Treatment Plant Waste Management.** American Water Works Association, Denver, USA. 1987.

CULLITY, B. D. **Elements of X-Ray Diffraction.** Second Editon, Addison-Wosley Publishing Company, INC, 1978. 555 p.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. **Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute.** J. Water Environment Research, vol. 73. Water Environment Federation. 2001.

COSTA, A. C. M.; ANJOS, M. J.; MOREIRA, S.; LOPES, R. T.; JESUS, E. F. O. **Analysis of mineral water from Brazil using total reflection X-ray.** Fluorescence by synchrotron radiation. Spectrochimica Acta. v. 58B. p. 2199-2204, 2003.

CURI, N., Coord. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1993.

DUTRA, R. P. S., SILVA, J. B. VARELA, M. L., NASCIMENTO, R. M, GOMES, U. U., PASKOCIMAS, C A. **Avaliação da potencialidade de argilas do Rio Grande do Norte, Brasil. Parte-II: Propriedades Tecnológicas**. Cerâmica Industrial, 13 (1/2) Janeiro/Abril, 2008.

DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, **Método de Ensaio nº 041**, designada Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização. 1994.

DONDI, M. **Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados**. Cerâmica industrial, 11(3) 36-40, 2006.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Método de análise solos**. Rio de Janeiro, 1997.

FERRANTI, E. M.; GEHLING, G. R. **Alternativa para desidratação de lodos de estação de tratamento de água (ETA) em leitos de secagem – condicionamento químico com resíduo de cal**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005.

FERREIRA FILHO, S. S.; ALÉM SOBRINHO. P. **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 3, n. 3. Jul/Set. 1998.

FLORÊNCIO, R. V. S.; SELMO, S. M. S. **Estudo comparativo de granulometria a laser para fins da reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil P. 2161 – 2172. 2006.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estação de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. Rio Claro. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2005. 81 p (Mestrado Ciências Biológicas).

HALL, W. S. & HALL, L. W. **Toxicity of alum sludge to Ceriodaphnia dubia and Pimephales promelas**. Bull Environ. Building Environmantal Contamination and Toxicology. 42:791-798p. 1989.

HOPPEN, C.; PORTELA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V.A. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental.** Revista Cerâmica nº 51. p. 85-95. 2005.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região Metropolitana de São Paulo.** Revista Engenharia Ambiental - Nº 2 - abr/jun. 117-126. 2007.

JENKINS, R. et al. **Quantitative X-ray Spectrometry.** Nova Iorque: Marcel Dekker, 1981, 588 p.

JUNIOR, V. M. T.; MYMRINE, V.; RIBEIRO, R. A. C.; PONTE, H. A. **Utilização de lodo de ETA no desenvolvimento de novos compostos cerâmicos.** 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR. 2006.

KINGERY, W. D; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics.** Second Edition. Ed. A Wiley – Interscience Publication, John Wiley e Sons – New York, 1976.

LIN, S.; EVANS, R. L.; SCHNEPPER, D.; HILL, T. **Evaluation of wastes from the East St.Louis water treatment plant and their impact on the Mississippi river.** Illinois State Water Survey Div., Champaign - National Technical Information Service-NTIS, ISWS/CIR-160/84, 90 p. (1984).

MENESES, A. C. L. S. M.; GADELHA, C. L. M.; MACHADO, T. T. V.; ALMEIDA, T. M. V.; JUNIOR, W. R. S. **Avaliação preliminar dos possíveis impactos dos lançamentos dos resíduos gerados de ETA de pedras de fogo na qualidade da água do riacho avenca/PB.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

MONTEIRO, S. N. ALEXANDRE. J. MARGEM J. L, R.; SANCHES. R.; VIENIRA, C. M. F. **Incorporation of sludge waste from water treatment.** Construction and Building Materials, January. 2007.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF).** Depto. de Ciências Exatas/ESALQ, Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA, julho, 1999.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica nº 50. Ano 2004. p. 324-330.

ORTS, M. J.; CAMPUS, B.; PICÓ, M. GOZALBO, A. **Metodos de analisis granulometrico. Aplicacion al control de la granulometria de materias primas.** Cerámica información, nº 191, Octubre, 1993. 14p.

PAIXÃO, Luiz Carlos Cardoso. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha.** Ouro Preto. – Rede Temática de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. p. 90 (Mestrado em Engenharia de Materiais)

PRACIDELLI, S. MELCHIADES, F. G. **Importância da composição granulométrica de massa para cerâmica vermelha.** Cerâmica Industrial 02, (01/02) Jan/Abr. 1997.

PETRUCCI, G. R. **Materiais de construção,** In. Materiais Cerâmicos. 11º Ed. Editora Globo São Paulo. 2003.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. **Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna - Curitiba/PR.** São Paulo. Encontro Latino Americano de Resíduos Sólidos/4º Congresso Regional de Engenharia Sanitária e Ambiental da 4a Região da AIDIS/Cone Sul. São Paulo, Jun 2003. v. II045. p. 1-10.

PENALVA REALI, M. **Principais Características quantitativas e qualitativa do lodo de ETA's.** In PENALVA REALI, N. (Org.), Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 2.

RIBEIRO, F. L. M. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito – MG.** Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto. 2007. p.115. (Mestrado em Engenharia Ambiental).

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, A. A. L. LABRINCHA, J. A. **Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas**. Cerâmica Industrial, 8 (1) Janeiro/Fevereiro, 2003.

RICHTER, C. A. & AZEVEDO, J. M. N. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. Editora Edgard Blucher. LTDA. 2003.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2001.

SABBAG, Maurício Guimarães **Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em blocos cerâmicos**. Iniciação Científica. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. 2003.

SABOGAL-PAZ & DI BERNARDO. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e disposição dos resíduos gerados na estação de tratamento de água**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

SÁNCHEZ, E.; GARCIA, J. SANZ V.; OCHANDIO, E. **Criterios de selección de materias primas para fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos**. Cerámica información, Catellón, n. 157, p.13-21, jul.ago. 1999.

SANEPAR - **Companhia de Saneamento do PARANÁ**. Trabalho Técnico de Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água. 2006.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, v.1, 1989.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, v.2, 1989.

SENS, M. L.; CARDOSO, M; MELHO FILHO, L. C. **Avaliação do desempenho de diferentes tipos de coagulantes empregados no tratamento de água para abastecimento público em relação ao volume de lodo gerado na sedimentação**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. Joinville. Anais Eletrônicos I-167. Brasil. 2003.

SMITH, William F. **Principio de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3 ed. Portugal: McGRAW-HILL. 1998.

TEIXEIRA, L. C.G.M.; FERREIRA FILHO, S.S. **Ensaio de pré-adensamento em batelada e semi-contínuos de lodo gerado em estações de tratamento de água**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro Anais Eletrônicos II-008. Brasil. 1999.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, N. R. ALÉSSIO, G.T. A. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural**. Cerâmica, 52 (215-220). 2006.

VAN VLACK, Laurence Hall. **Propriedades dos materiais cerâmicos**, Editora Edgard Blucher, 1973. p.318

VAN VLACK, Laurence Hall. **Princípio de ciência dos materiais**. Ed. Edgar Blucher. 1984.

VERÇOSA, E. J. **Materiais cerâmicos**. In. FALCÃO, L. A. B (Org.). Materiais da construção: concreto, madeira, cerâmica, plásticos, asfalto. Vol. 2. 5º Ed. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1994. p. 526-570

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

WANG, K.S.; CHIOU, I.J.; CHEN, C.H.; WANG, D.; **Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash**. Construction and Building Materials, v. 19, pp. 627-633, 2005.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORINO, M. D; SANTOS, W. L. **A substituição da argila por lodo de ETA na produção de cerâmica vermelha**. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador, BA. 2007.

- **Documentos em meio eletrônico (Internet);**

CARDOSO, Patrícia Regina da Silva. **Informações técnicas sobre o Policloreto de Alumínio**. Resposta Técnica produzida pelo Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas / SBRT06 de junho 2006. Disponível em < <http://www.sbrt.ibict.br>> Acesso realizado em 02/02/2008.

SABESP, COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tratamento de água**. Disponível em <http://www.sabesp.com.br/o_que_fazemos/captacao_e_distribuicao_de_agua/tratament_de_agua.htm>. 2002. Acesso realizado em novembro de 2008.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. 2003 Disponível em <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>. Acesso realizado em de outubro de 2008.

MINERALOGY DATABASE. Disponível em <<http://www.webmineral.com>>; Acesso realizado em agosto de 2008.

WWW- MINCRYST – **Crystallographic and crystallochemical database for mineral and their structural analogues**. Disponível em <<http://database.iem.ac.ru/mincryst>>. Acesso realizado em agosto de 2008.

ANEXOS

Tabela I - Registros dos experimentos - Mistura “A” entre as argilas da COOAFOZ – AA e AP

T (°C)	MISTURAS "A"	AP	AA	CLS (%)	MTRF-S (kgf/cm ²)	CLQ (%)	CLT (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (Kgf/cm ²)
950	A1	10 0	0	0,06	16,8 ± 2,20	0,4 ± 0,0	0,4 ± 0,00	23,8 ± 0,2	36,5 ± 0,3	1,3 ± 0,0	12,8 ± 0,1	52,9 ± 6,7
	A2	70	30	0,06	13,9 ± 1,70	0,7 ± 0,0	0,7 ± 0,03	24,5 ± 0,2	38,0 ± 1,1	1,5 ± 0,0	11,6 ± 0,1	31,8 ± 4,5
	A3	60	40	0,06	12,2 ± 1,81	0,8 ± 0,0	0,9 ± 0,03	25,4 ± 0,3	36,9 ± 0,4	1,4 ± 0,0	9,8 ± 0,1	16,6 ± 2,6
	A4	50	50	0,09	10,2 ± 1,45	1,1 ± 0,0	1,2 ± 0,03	25,4 ± 0,1	37,5 ± 1,1	1,4 ± 0,0	10,3 ± 0,1	15,8 ± 3,5
	A5	40	60	0,13	8,0 ± 1,38	1,3 ± 0,2	1,4 ± 0,22	25,7 ± 0,1	38,1 ± 0,2	1,5 ± 0,0	10,5 ± 0,0	14,5 ± 2,1
	A6	30	70	0,20	7,0 ± 0,62	1,5 ± 0,1	1,7 ± 0,17	26,0 ± 0,2	38,2 ± 1,7	1,4 ± 0,0	9,7 ± 0,3	11,9 ± 1,7
	A7	0	10 0	0,28	3,0 ± 0,56	2,0 ± 0,1	2,3 ± 0,15	28,4 ± 0,2	39,0 ± 0,2	1,3 ± 0,0	8,0 ± 0,1	6,6 ± 0,4
1050	A1	10 0	0	-	- - -	1,2 ± 0,0	1,3 ± 0,03	21,6 ± 0,4	32,3 ± 0,2	1,5 ± 0,0	13,6 ± 0,0	74,3 ± 4,3
	A2	70	30	-	- - -	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,08	22,3 ± 0,1	34,1 ± 0,5	1,6 ± 0,0	12,1 ± 10,7	36,7 ± 4,6
	A3	60	40	-	- - -	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,12	23,3 ± 0,3	35,1 ± 0,3	1,5 ± 0,0	10,1 ± 0,1	23,4 ± 4,0
	A4	50	50	-	- - -	2,0 ± 0,0	2,1 ± 0,2	24,7 ± 0,3	36,5 ± 0,3	1,4 ± 0,0	10,7 ± 0,1	20,0 ± 3,0
	A5	40	60	-	- - -	2,2 ± 0,0	2,3 ± 0,3	22,7 ± 0,3	34,6 ± 0,3	1,5 ± 0,0	10,5 ± 0,1	13,0 ± 1,2
	A6	30	70	-	- - -	2,9 ± 0,1	2,9 ± 0,07	24,2 ± 0,5	35,7 ± 0,5	1,4 ± 0,0	10,0 ± 0,1	11,6 ± 0,7
	A7	0	10 0	-	- - -	4,4 ± 0,1	4,5 ± 0,17	27,0 ± 0,1	37,5 ± 0,1	1,3 ± 0,0	8,6 ± 0,2	8,9 ± 1,8

Tabela II- Registros dos experimentos – Misturas “B” entre as argilas da Cerâmica Santa Rita – OA e OP

T (°C)	MISTURAS "B"	OP	OA	CLS (%)	MTRF-S (kgf/cm ²)	CLQ (%)	CLT (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (Kgf/cm ²)	
950	B1	100	0	0,19	18,3 ± 1,30	0,5 ± 0,08	0,7 ± 0,00	21,3 ± 0,21	36,3 ± 0,39	1,7 ± 0,07	14,7 ± 0,10	65,2 ± 1,00	1,00
	B2	70	30	0,34	17,2 ± 1,20	1,3 ± 0,00	1,6 ± 0,03	22,7 ± 0,24	37,2 ± 0,61	1,6 ± 0,02	13,2 ± 0,17	46,6 ± 3,03	3,03
	B3	60	40	0,32	13,8 ± 1,22	1,5 ± 0,07	1,8 ± 0,03	22,9 ± 0,32	38,5 ± 0,64	1,7 ± 0,04	12,0 ± 0,26	40,2 ± 2,23	2,23
	B4	50	50	0,41	13,0 ± 1,12	1,4 ± 0,05	1,8 ± 0,03	22,6 ± 0,12	39,0 ± 1,76	1,7 ± 0,08	9,9 ± 0,30	35,9 ± 3,00	3,00
	B5	40	60	0,42	13,3 ± 1,37	1,7 ± 0,03	2,1 ± 0,22	24,8 ± 0,15	39,1 ± 2,48	1,6 ± 0,05	10,7 ± 0,10	34,1 ± 2,43	2,43
	B6	30	70	0,45	12,5 ± 1,88	1,8 ± 0,10	2,3 ± 0,17	24,6 ± 0,30	40,1 ± 1,91	1,8 ± 0,08	11,3 ± 0,50	30,1 ± 2,98	2,98
	B7	0	100	0,94	10,0 ± 1,08	2,8 ± 0,11	3,8 ± 0,25	27,5 ± 0,70	41,6 ± 2,30	1,8 ± 0,07	11,8 ± 1,00	25,4 ± 2,00	2,00
1050	B1	100	0	-	- - -	1,7 ± 0,06	1,9 ± 0,03	18,5 ± 0,27	33,6 ± 1,22	1,8 ± 0,01	14,9 ± 0,06	76,4 ± 1,90	1,90
	B2	70	30	-	- - -	2,6 ± 0,14	3,0 ± 0,08	19,5 ± 1,19	33,8 ± 0,50	1,7 ± 0,04	13,3 ± 0,07	67,1 ± 1,00	1,00
	B3	60	40	-	- - -	2,3 ± 0,13	2,7 ± 0,12	20,6 ± 0,30	34,3 ± 0,14	1,7 ± 0,01	12,5 ± 0,09	52,6 ± 3,20	3,20
	B4	50	50	-	- - -	2,8 ± 0,11	3,2 ± 0,00	20,6 ± 0,30	35,2 ± 0,22	1,7 ± 0,00	13,0 ± 0,07	39,3 ± 3,14	3,14
	B5	40	60	-	- - -	2,0 ± 0,17	2,5 ± 0,00	21,4 ± 0,80	35,3 ± 0,20	1,7 ± 0,01	10,8 ± 0,06	37,0 ± 2,10	2,10
	B6	30	70	-	- - -	4,0 ± 0,06	4,4 ± 0,27	21,3 ± 0,45	36,6 ± 1,31	1,8 ± 0,02	10,2 ± 0,42	29,6 ± 1,94	1,94
	B7	0	100	-	- - -	4,1 ± 0,12	5,0 ± 0,17	22,7 ± 0,14	37,0 ± 1,65	1,9 ± 0,01	11,9 ± 0,09	26,8 ± 3,28	3,28

Tabela III - Registros dos experimentos - Mistura entre as argilas da COOAFOZ – AL

T (°C)	MISTURAS "AL"	AP (%)	AA (%)	Lodo (%)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	AÁ (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (kgf/cm ²)
950	AL α -00	70	30	0	0,06	1,5 $\pm$ 0,17	1,53 $\pm$ 0,06	24,5 $\pm$ 0,24	38,0 $\pm$ 0,10	1,6 $\pm$ 0,02	12,8 $\pm$ 0,14	36,8 $\pm$ 2,13
	AL α -04	68	28	4	0,36	1,5 $\pm$ 0,08	2,22 $\pm$ 0,05	24,5 $\pm$ 0,12	37,5 $\pm$ 0,12	1,8 $\pm$ 0,00	10,9 $\pm$ 0,05	31,8 $\pm$ 4,57
	AL α -08	66	26	8	0,37	1,6 $\pm$ 0,03	2,08 $\pm$ 0,06	23,3 $\pm$ 0,25	35,1 $\pm$ 0,33	1,6 $\pm$ 0,02	11,0 $\pm$ 0,07	31,7 $\pm$ 3,82
	AL α -12	64	24	12	0,50	2,3 $\pm$ 0,08	3,04 $\pm$ 0,08	26,5 $\pm$ 0,31	39,1 $\pm$ 0,34	1,7 $\pm$ 0,01	12,3 $\pm$ 0,49	28,6 $\pm$ 4,15
	AL α -16	62	22	16	0,49	2,5 $\pm$ 0,06	2,68 $\pm$ 0,10	25,9 $\pm$ 1,07	38,4 $\pm$ 0,87	1,8 $\pm$ 0,01	13,3 $\pm$ 0,18	23,4 $\pm$ 1,80
1050	AL β -00	70	30	0	0,48	1,9 $\pm$ 0,11	1,98 $\pm$ 0,08	19,3 $\pm$ 0,18	34,1 $\pm$ 0,55	1,7 $\pm$ 0,00	13,6 $\pm$ 0,68	57,1 $\pm$ 3,21
	AL β -04	68	28	4	0,42	3,6 $\pm$ 0,23	4,08 $\pm$ 0,22	22,6 $\pm$ 0,41	35,1 $\pm$ 0,50	1,9 $\pm$ 0,02	11,6 $\pm$ 0,05	51,4 $\pm$ 3,70
	AL β -08	66	26	8	0,46	3,7 $\pm$ 0,07	4,13 $\pm$ 0,09	21,9 $\pm$ 1,12	35,2 $\pm$ 1,21	1,9 $\pm$ 0,02	12,4 $\pm$ 0,05	38,3 $\pm$ 3,19
	AL β -12	64	24	12	0,56	4,2 $\pm$ 0,11	4,68 $\pm$ 0,14	22,5 $\pm$ 0,17	35,2 $\pm$ 0,22	1,9 $\pm$ 0,05	13,2 $\pm$ 0,05	36,7 $\pm$ 4,65
	AL β -16	62	22	16	0,52	4,2 $\pm$ 0,21	4,53 $\pm$ 0,16	21,7 $\pm$ 0,52	35,7 $\pm$ 0,72	1,9 $\pm$ 0,01	13,6 $\pm$ 0,11	31,1 $\pm$ 3,07

Tabela IV - Registros dos experimentos - Mistura entre as argilas da COOAFOZ – AL`

T (°C)	MISTURAS "AL`"	AP (%)	AA (%)	Lodo (%)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	AÁ (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (kgf/cm ²)
950	AL α -00	100	0	0	0,06	2,0 $\pm$ 0,05	2,03 $\pm$ 0,00	23,8 $\pm$ 1,00	36,5 $\pm$ 0	1,4 $\pm$ 0,01	11,6 $\pm$ 0,14	76,2 $\pm$ 4,50
	AL α -04	96	0	4	0,39	3,0 $\pm$ 0,10	3,38 $\pm$ 0,04	22,9 $\pm$ 0,52	38,5 $\pm$ 1,3	2,1 $\pm$ 0,17	12,5 $\pm$ 0,08	55,5 $\pm$ 3,02
	AL α -08	92	0	8	0,42	3,0 $\pm$ 0,04	3,38 $\pm$ 0,06	23,6 $\pm$ 0,18	39,0 $\pm$ 0,4	2,1 $\pm$ 0,02	13,3 $\pm$ 0,04	52,9 $\pm$ 6,76
	AL α -12	88	0	12	0,42	2,9 $\pm$ 0,06	3,34 $\pm$ 0,05	25,7 $\pm$ 0,95	40,8 $\pm$ 2,2	2,0 $\pm$ 0,08	14,0 $\pm$ 0,09	42,7 $\pm$ 3,18
	AL α -16	84	0	16	0,45	3,2 $\pm$ 0,11	3,66 $\pm$ 0,07	24,7 $\pm$ 0,55	39,4 $\pm$ 0,5	2,0 $\pm$ 0,11	14,7 $\pm$ 0,13	34,4 $\pm$ 3,31
1050	AL β -00	100	0	0	0,00	1,2 $\pm$ 0,03	1,28 $\pm$ 0,03	21,6 $\pm$ 0,43	32,3 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,01	12,0 $\pm$ 0,14	86,1 $\pm$ 4,60
	AL β -04	96	0	4	0,42	5,7 $\pm$ 0,28	6,11 $\pm$ 0,31	18,1 $\pm$ 0,35	34,8 $\pm$ 2,1	2,3 $\pm$ 0,17	12,7 $\pm$ 0,15	74,3 $\pm$ 4,33
	AL β -08	92	0	8	0,37	5,8 $\pm$ 0,09	6,18 $\pm$ 0,08	18,7 $\pm$ 0,22	33,6 $\pm$ 0,7	2,3 $\pm$ 0,07	13,3 $\pm$ 0,07	67,7 $\pm$ 4,67
	AL β -12	88	0	12	0,42	5,9 $\pm$ 0,19	6,27 $\pm$ 0,15	20,9 $\pm$ 0,36	37,4 $\pm$ 2,6	2,3 $\pm$ 0,24	14,2 $\pm$ 0,39	56,9 $\pm$ 3,27
	AL β -16	84	0	16	0,41	5,9 $\pm$ 0,08	6,35 $\pm$ 0,07	21,1 $\pm$ 0,72	35,3 $\pm$ 2,4	2,1 $\pm$ 0,22	15,2 $\pm$ 0,09	36,7 $\pm$ 3,30

Tabela V - Registros dos experimentos - Mistura entre as argilas da Cerâmica Santa Rita – BL

T (°C)	MISTURAS "BL"	AP (%)	AA (%)	Lodo (%)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	AAÁ (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (kgf/cm ²)
950	AL α -00	70	30	0	0,34	1,3 $\pm$ 0,00	1,58 $\pm$ 0,05	22,7 $\pm$ 0,22	40,2 $\pm$ 0,10	1,6 $\pm$ 0,02	14,7 $\pm$ 0,17	46,6 $\pm$ 3,03
	AL α -04	68	28	4	0,36	3,2 $\pm$ 0,14	3,58 $\pm$ 0,11	24,1 $\pm$ 0,40	38,7 $\pm$ 0,52	2,0 $\pm$ 0,00	13,2 $\pm$ 0,42	21,5 $\pm$ 3,20
	AL α -08	66	26	8	0,49	3,6 $\pm$ 0,27	3,54 $\pm$ 0,06	24,7 $\pm$ 0,48	39,7 $\pm$ 0,56	1,9 $\pm$ 0,01	14,2 $\pm$ 0,14	20,8 $\pm$ 3,45
	AL α -12	64	24	12	0,57	3,0 $\pm$ 0,15	4,11 $\pm$ 0,18	24,9 $\pm$ 0,46	39,8 $\pm$ 0,53	1,9 $\pm$ 0,01	15,2 $\pm$ 0,08	17,2 $\pm$ 2,60
	AL α -16	62	22	16	0,58	3,6 $\pm$ 0,16	4,13 $\pm$ 0,05	24,6 $\pm$ 0,18	40,3 $\pm$ 0,60	2,0 $\pm$ 0,01	15,2 $\pm$ 0,09	15,5 $\pm$ 2,82
1050	AL β -00	70	30	0	0,00	2,5 $\pm$ 0,14	2,63 $\pm$ 0,19	21,5 $\pm$ 1,19	33,8 $\pm$ 0,50	1,7 $\pm$ 0,04	14,9 $\pm$ 0,07	67,1 $\pm$ 1,00
	AL β -04	68	28	4	0,43	4,4 $\pm$ 0,19	4,68 $\pm$ 0,16	17,8 $\pm$ 0,23	32,2 $\pm$ 0,82	2,1 $\pm$ 0,02	13,4 $\pm$ 0,08	27,1 $\pm$ 2,70
	AL β -08	66	26	8	0,53	5,1 $\pm$ 0,23	5,63 $\pm$ 0,23	19,8 $\pm$ 0,22	33,8 $\pm$ 0,73	2,1 $\pm$ 0,02	14,1 $\pm$ 0,10	22,7 $\pm$ 3,90
	AL β -12	64	24	12	0,52	5,5 $\pm$ 0,42	5,85 $\pm$ 0,22	20,1 $\pm$ 0,56	35,2 $\pm$ 0,61	2,2 $\pm$ 0,07	14,9 $\pm$ 0,10	22,6 $\pm$ 1,63
	AL β -16	62	22	16	0,48	5,7 $\pm$ 0,33	6,3 $\pm$ 0,15	20,7 $\pm$ 0,79	36,4 $\pm$ 0,31	2,2 $\pm$ 0,01	15,0 $\pm$ 0,06	20,6 $\pm$ 2,16

Tabela VI - Registros dos experimentos - Mistura entre as argilas da Cerâmica Santa Rita – BL`

T (°C)	MISTURAS "BL`"	OP (%)	AO (%)	Lodo (%)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	AAÁ (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	PF (%)	MTRF (kgf/cm ²)
950	AL α -00	100	0	0	0,9	0,5 $\pm$ 0,08	1,0 $\pm$ 0,05	21,3 $\pm$ 0,30	36,3 $\pm$ 0,39	1,7 $\pm$ 0,07	13,2 $\pm$ 0,10	65,2 $\pm$ 1,00
	AL α -04	96	0	4	0,891	5,3 $\pm$ 0,17	6,3 $\pm$ 0,12	28,2 $\pm$ 2,40	43,3 $\pm$ 1,30	2,1 $\pm$ 0,12	20,7 $\pm$ 0,13	55,0 $\pm$ 3,50
	AL α -08	92	0	8	0,84	5,6 $\pm$ 0,10	6,4 $\pm$ 0,11	31,3 $\pm$ 2,10	45,5 $\pm$ 2,10	2,0 $\pm$ 0,11	20,6 $\pm$ 0,23	41,0 $\pm$ 2,98
	AL α -12	88	0	12	0,865	5,7 $\pm$ 0,15	6,6 $\pm$ 0,16	31,0 $\pm$ 2,24	46,7 $\pm$ 2,40	2,0 $\pm$ 0,10	22,1 $\pm$ 0,14	36,6 $\pm$ 2,48
	AL α -16	84	0	16	1,018	5,7 $\pm$ 0,06	6,8 $\pm$ 0,05	31,6 $\pm$ 2,10	46,9 $\pm$ 2,77	2,1 $\pm$ 0,23	22,6 $\pm$ 0,13	32,3 $\pm$ 1,67
1050	AL β -00	100	0	0	0	1,7 $\pm$ 0,06	2,1 $\pm$ 0,04	18,5 $\pm$ 0,22	33,6 $\pm$ 1,22	1,8 $\pm$ 0,01	13,3 $\pm$ 0,06	76,4 $\pm$ 1,90
	AL β -04	96	0	4	0,764	7,5 $\pm$ 0,19	8,3 $\pm$ 0,20	22,5 $\pm$ 0,11	36,1 $\pm$ 2,30	2,3 $\pm$ 0,24	21,1 $\pm$ 0,08	56,7 $\pm$ 3,33
	AL β -08	92	0	8	0,827	8,4 $\pm$ 0,21	9,2 $\pm$ 0,14	23,1 $\pm$ 0,40	36,2 $\pm$ 1,80	2,3 $\pm$ 0,20	21,1 $\pm$ 0,10	55,9 $\pm$ 2,18
	AL β -12	88	0	12	0,878	8,6 $\pm$ 0,11	9,6 $\pm$ 0,11	22,3 $\pm$ 0,40	38,7 $\pm$ 2,30	2,3 $\pm$ 0,06	22,5 $\pm$ 0,11	51,9 $\pm$ 2,72
	AL β -16	84	0	16	0,993	8,7 $\pm$ 0,09	9,9 $\pm$ 0,12	22,5 $\pm$ 0,11	38,0 $\pm$ 2,39	2,4 $\pm$ 0,22	22,8 $\pm$ 0,10	38,6 $\pm$ 3,19

