

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS

CÉLIA REGINA LUCAS MIARA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (ETE) NA MASSA CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS
CERÂMICOS

PONTA GROSSA

2014

CÉLIA REGINA LUCAS MIARA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (ETE) NA MASSA CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS
CERÂMICOS

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais da
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Orientadora: Prof. Dr^a Adriana Scoton Antonio
Chinelatto

Coorientador: Prof. Dr. Sidnei Antonio Pianaro

PONTA GROSSA

2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Miara, Célia Regina Lucas
M618 Análise da incorporação do lodo de
estação de tratamento de esgoto (ETE) na
massa cerâmica para produção de blocos
cerâmicos/ Célia Regina Lucas Miara. Ponta
Grossa, 2014.
91f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e
Ciência de Materiais - Área de
Concentração: Desenvolvimento e
Caracterização de Materiais), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof^a Dr^a Adriana Scoton
Antonio Chinelatto.

Coorientador: Prof. Dr. Sidnei Antonio
Pianaro.

1.Incorporação. 2.Lodo de ETE. 3.Blocos
cerâmicos. 4.CONAMA 357/05. I.Chinelatto,
Adriana Scoton Antonio. II. Pianaro,
Sidnei Antonio. III. Universidade Estadual
de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia e
Ciência de Materiais. IV. T.

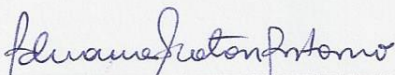
CDD: 620.140.4

CÉLIA REGINA LUCAS MIARA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (ETE) NA MASSA CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS
CERÂMICOS

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Mestrado em Engenharia de Materiais, área de concentração: Degradação e Meio Ambiente.

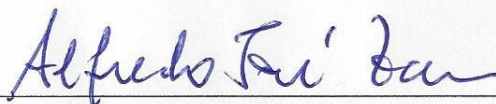
Ponta Grossa, 31 de julho de 2014.



Prof.^a Dr.^a Adriana Stocon Antonio Chinelatto – Orientadora
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. José Alberto Cerri
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR



Prof. Dr. Alfredo Zara
Doutor em Química
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Thiago, que despertou em mim a vontade de conhecer com mais esmero a Engenharia e Ciência dos Materiais.

Ao meu marido Paulo, com quem amo partilhar a vida. Agradeço pelo apoio e pela capacidade de me trazer a paz.

Aos meus pais, Luzia Soeli da Silva e Efigenio Lucas da Silva, que sempre me incentivaram a estudar;

Aos meus irmãos Fernando e Elizangela, pelas diferenças que nos unem.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter iluminado e encaminhado os meus passos para realização desta meta;

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Adriana Scoton Antonio Chinelatto, que aceitou me orientar prontamente e esteve sempre ao meu lado, auxiliando em todas as situações com dedicação e palavras de sabedoria e conforto;

Ao Prof. Dr. Sidnei Antonio Pinaro pela disposição e coorientação;

A todos os professores do Mestrado pela dedicação.

A minha querida irmã Elizangela pelo apoio, dedicação, companheirismo e auxílio nas tarefas do laboratório;

A minha querida nora Daniela pelo auxílio na realização do trabalho;

Em especial ao meu amigo e colega de trabalho, Antônio Arilson Zanedim, o “Tatu”, que tornou possível essa jornada, sempre fiel em todos os momentos, mesmo em situações difíceis tinha palavras de apoio e incentivo;

Ao Marcos Miara e a Camila Sousa pelo companheirismo profissional e por suprir a minha ausência no escritório;

A todo o corpo técnico dos laboratórios de Engenharia de Materiais que trabalharam com precisão, cautela e disposição, para dessa forma contribuir com dados concisos das análises realizadas;

Aos meus colegas da turma de Mestrado;

Ao pessoal da Olaria São Gerônimo, em especial ao Sr. Gerônimo que apoiou a pesquisa, forneceu a argila e permitiu o uso do forno para a sinterização dos corpos de prova.

Ao químico José Geraldo da SANEPAR pelo apoio e incentivo à pesquisa.

A todas as pessoas que foram importantes para essa caminhada e que contribuíram para a realização desse trabalho, em especial a Michele.

*“Venham fazer tijolos e queimá-los no
fogo e os usemos no lugar das pedras”*
(Genesis, Cap. XI, versículo 3).

RESUMO

O CONAMA 357/05 determina as condições e padrões de emissão adotados para o controle de lançamentos de efluentes no corpo receptor. Os sistemas de tratamento de esgoto buscam diminuir o impacto do lançamento dos efluentes nos corpos d'água receptores, atendendo a esta Resolução. Por outro lado o lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto tem se tornado um problema crescente sendo considerado como resíduo. Este trabalho busca verificar a viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) na massa cerâmica para produção de blocos cerâmicos. Para isso, amostras de lodo foram coletadas na ETE Verde da SANEPAR no Município de Ponta Grossa-PR e de argila da Cerâmica São Gerônimo no Município de Prudentópolis-PR. O lodo na ETE Verde é submetido a um processo de higienização, reduzindo significativamente a concentração de patógenos no resíduo. O processo utilizado é a caleação, que promove a estabilização, desinfecção química e térmica através da adição e mistura da cal ao lodo numa porcentagem de 30% a 50% do peso seco de lodo. Para a caracterização do lodo e da argila foram realizadas análises de difração de raios X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, espectroscopia de fluorescência de raios X e distribuição granulométrica. As composições estudadas foram feitas com adições de 5 a 50% em peso do lodo na massa cerâmica. Após a mistura do lodo com as argilas, as amostras foram conformadas por prensagem uniaxial e sinterizadas nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C. As amostras sinterizadas foram caracterizadas por medidas de densidade aparente, absorção de água, porosidade aparente, resistência mecânica, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Após verificar a viabilidade do uso do lodo de ETE na massa cerâmica, essas foram conformadas por extrusão e sinterizadas na Cerâmica São Gerônimo no Município de Prudentópolis-PR. Os resultados mostraram que a adição do lodo até 15% da massa da argila atende a todos os parâmetros preconizados pelas normas vigentes.

PALAVRAS-CHAVE: Incorporação, Lodo de ETE, Blocos Cerâmicos, CONAMA 357/05.

ABSTRACT

The CONAMA 357/05 lays down the conditions and emission standards adopted for the control of effluent discharges in the receiving body. The sewage treatment systems seek to reduce the impact of the release of effluents into water bodies receiver, given this resolution. On the other hand, the sludge generated in sewage treatment plants has become a growing problem being considered as waste. This work aims to verify the feasibility of incorporating sludge sewage treatment plant (ETE) in the composition of traditional ceramics. For this sludge samples were collected at the ETE Verde SANEPAR in the city of Ponta Grossa-PR and clay Ceramic in the city of São Geronimo, Prudentópolis-PR. The sludge in the ETE Verde is subjected to a cleaning process, significantly reducing the concentration of pathogens in the waste. The sludge in the ETE Verde is subjected to a cleaning process, significantly reducing the concentration of pathogens in the waste. The process used is *caleação*, which promotes stabilization, thermal and chemical disinfection by the addition and mixing of the lime sludge to a percentage of 30% to 50% by dry weight sludge. For the characterization of silt and clay were analyzed X-ray diffraction, differential thermal and thermogravimetric analysis, fluorescence spectroscopy X-ray and particle size distribution were made. The compositions studied were made with additions of 5 to 50% by weight of the ceramic mass sludge. After mixing the sludge with clay, the samples were processed by uniaxial pressing and sintered at temperatures of 900°C, 1000°C e 1100°C. The sintered samples were characterized by measurements of bulk density, water absorption, apparent porosity, mechanical strength, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. After verifying the feasibility of using sludge WWTP in ceramic body, these were processed by extrusion and sintered ceramics in the city of São Gerônimo, Prudentópolis-PR. The results showed that the addition of sludge to 15% of the mass of the clay meets all parameters recommended by current standards.

KEYWORDS: Merger, sludge ETE, Ceramic Blocks, CONAMA 357/05.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos (ABNT, 10004a).	17
Figura 2.2 – Gradeamento automatizado.....	23
Figura 2.3(a) e 2.3(b) – Gradeamentos manuais.	23
Figura 2.4 – Calha Parshall de 12”.	24
Figura 2.5 – RALF (Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente).	25
Figura 2.6 – Local de armazenagem do lodo.....	26
Figura 2.7 – Lagoa de estabilização.	27
Figura 2.8 – Croqui de localização da ETE Verde.	28
Figura 2.9 – Composição da ETE Verde.	29
Figura 2.10 – Foto aérea da região em estudo.	29
Figura 2.11 – Mapa dos bairros atendidos pela ETE Verde.	30
Figura 2.12 (a) e 2.12 (b) – Extrusora sendo utilizada para a fabricação de blocos cerâmicos vazados.	34
Figura 2.13 – Croqui de localização da Cerâmica São Gerônimo.....	36
Figura 2.14 – Local de extração da argila.	37
Figura 2.15 – Local de armazenamento da argila na Cerâmica São Gerônimo.	37
Figura 2.16 – Forno da Cerâmica São Gerônimo.	38
Figura 3.1 – Fluxograma de caracterização das matérias-primas e amostras.....	41
Figura 3.2 – Fluxograma representativo do processo experimental.....	42
Figura 3.3(a) e 3.3 (b) – Extrusora de bancada e molde em forma de barrinhas.....	48
Figura 4.1 (a) e 4.1(b) – Distribuição de tamanho de partícula: (a) argila e (b) lodo.....	55
Figura 4.2 – Distribuição de tamanho de partículas das composições: (a) composição 2 (5% lodo); (b) composição 3 (10% lodo); (c) composição 4 (15% lodo) e (d) composição 7 (50% lodo).....	56
Figura 4.3 – Difratograma de raios-X da argila.	58
Figura 4.4 – Difratograma de raios-X do lodo.....	59
Figura 4.5(a) e (b) – Análise térmica diferencial e termogravimétrica: (a) mistura de argilas e (b) lodo	60
Figura 4.6 – Retração linear e taxa de retração da mistura de argilas.	61
Figura 4.7 – Curva de retração linear de todas as composições estudadas.	62

Figura 4.8 – Variação da perda ao fogo com a temperatura para as composições estudadas .	63
Figura 4.9 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições estudadas.	64
Figura 4.10 – Difratoograma de raios X da composição 1 sinterizada a 900°C, 1000°C e 1100°C.	66
Figura 4.11 – Difratoograma de raios X da composição 3 sinterizada 900°C, 1000°C e 1100°C	66
Figura 4.12 – Difratoograma de raios X da composição 7 sinterizada a 900°C, 1000°C e 1100°C.....	67
Figura 4.13 – Difratoograma de Raios-x das amostras sinterizadas a 1100 °C	68
Figura 4.14 – Difratoograma de Raios-x das amostras sinterizadas a 1100 °C	68
Figura 4.15 – Diagrama de fases do sistema SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO	70
Figura 4.16 – Densidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.	71
Figura 4.17 – Absorção de água das composições em relação às temperaturas de sinterização.	72
Figura 4.18 – Porosidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.	73
Figura 4.19 – Resistência à flexão das composições em relação às temperaturas de sinterização.	75
Figuras 4.20 (a), (b) e (c) – Micrografias das amostras da composição 1 sinterizadas nas temperaturas: (a) 900°C, (b) 1000°C e (c) 1100°C.	77
Figuras 4.21 (a) e (b) – Micrografia das amostras da composição 6 (25% de lodo) com menor aumento sinterizadas a: (a) 1000°C e (b) 1100°C.....	78
Figuras 4.22 (a) e (b) – Micrografia das amostras da composição 6 (25% de lodo) com maior aumento sinterizadas a : (a) 1000°C e (b) 1100°C.....	78
Figura 4.23 – Micrografias das amostras da composição 7 (50% lodo) sinterizadas nas temperaturas: (a) 900°C; (b) 1000°C e (c) 1100°C.	79
Figura 4.24 – Micrografia da composição 7 sinterizada a 900°C.....	80
Figura 4.25 – Micrografias de todas as composições estudadas sinterizadas a 1100°C: (a) composição 1; (b) composição 2; (c) composição 3.....	81
Figura 4.25 – Micrografias de todas as composições estudadas sinterizadas a 1100°C: (d) composição 4; (e) composição 5; (f) composição 6.	81
Figura 4.25 – Micrografias de todas as composições estudadas sinterizadas a 1100°C: (g) composição 7.	81

Figura 4.26 – Espectros EDS.....	83
Figura 4.27 – Retração linear das composições sinterizadas a 1050°C no forno da Cerâmica São Gerônimo.....	84
Figura 4.28 – Absorção de água das composições prensadas e sinterizadas a 1050°C no forno da Cerâmica São Gerônimo.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Anexos da Norma NBR 10004 (ABNT, 10004a).....	18
Tabela 3.1 – Composições estudadas.	46
Tabela 4.1 – Limite de Atterberg das argilas A e B	54
Tabela 4.2 – Distribuição de tamanho das partículas para as composições 2, 3, 4 e 5.	55
Tabela 4.3 – Composição química da argila e do lodo.....	57
Tabela 4.4 – Variação da perda ao fogo com a temperatura para as composições estudadas	63
Tabela 4.5 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições estudadas	65
Tabela 4.6 – Composição química das amostras 2,3,4 e 7	69
Tabela 4.7 – Densidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização	71
Tabela 4.8 – Absorção de água das composições em relação às temperaturas de sinterização	72
Tabela 4.9 – Porosidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.	73
Tabela 4.10 – Resistência à flexão das composições em relação às temperaturas de sinterização.	75
Tabela 4.11 – Adaptação da Tabela de parâmetros para tijolos furados determinados por Santos (1993).	76
Tabela 4.12 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições sinterizadas em forno mufla.	84
Tabela 4.13 – Variação da absorção de água com a temperatura para as composições sinterizadas em forno mufla.	85
Tabela 4.14 – Resultados de absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão para as amostras extrudadas produzidas com as composições 4 e 5.	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	16
2.2 ESGOTO SANITÁRIO.....	19
2.2.1 Características do esgoto	20
2.2.2 Tratamento do esgoto sanitário.....	22
2.2.3 Resíduo do tratamento de esgoto: lodo de esgoto	27
2.2.4 Estação de Tratamento de Esgoto - ETE Verde (Ponta Grossa-Pr)	27
2.3 ARGILA	31
2.3.1 Cerâmica.....	31
2.3.2 Processamento de materiais cerâmicos tradicionais.....	32
2.3.3 Cerâmica São Gerônimo.....	35
2.3.3.1 Localização.....	35
2.3.3.2 Processo de fabricação	36
2.3.4 Aplicação de resíduos sólidos em cerâmicas.....	38
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
3.1 MATÉRIAS PRIMAS.....	43
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	43
3.2.1 Limite de Atterberg	43
3.2.2 Perda ao fogo	44
3.2.3 Distribuição do tamanho das partículas.....	45
3.2.4 Análise química	45
3.2.5 Análise mineralógica	45
3.2.6 Análise termodiferencial e termogravimétrica	46
3.3 HOMOGENEIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES	46
3.3.1 Homogeneização e preparação das amostras para o processo de prensagem.....	46
3.3.2 Homogeneização e preparação das amostras para o processo de extrusão.	47
3.3.3 Conformação dos corpos de prova	48
3.3.4 Análise dilatométrica.....	49
3.3.5 Sinterização	49

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS.....	50
3.4.1 Retração linear (RL)	50
3.4.2 Densidade aparente.....	50
3.4.3 Absorção de água (AA)	51
3.4.4 Porosidade Aparente (PA)	51
3.4.5 Tensão de ruptura a flexão (TRF).....	52
3.4.6 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	52
3.4.7 Análise por difração de raios X	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS	54
4.1.1 Limites de Atterberg das argilas da Cerâmica São Gerônimo utilizadas nessa pesquisa	54
4.1.2 Perda ao fogo do lodo.....	54
4.1.3 Análise granulométrica.....	54
4.1.4 Análise química	57
4.1.5 Análise mineralógica	58
4.1.6 Análise térmica diferencial e termogravimétrica.....	61
4.1.7 Análise dilatométrica.....	61
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PENSADOS E SINTERIZADOS EM FORNO MUFLA.....	62
4.2.1 Perda ao fogo	62
4.2.2 Retração linear de queima	64
4.2.3 Análise mineralógica	65
4.2.4 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente.	70
4.2.5 Tensão de ruptura à flexão.....	74
4.2.6 Análise microestrutural.....	76
4.3 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS NA CERÂMICA SÃO GERÔNIMO DAS AMOSTRAS PENSADAS E EXTRUDADAS	83
5 CONCLUSÃO.....	87
6 REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado juntamente com o conjunto de atividades humanas resulta na contínua e desenfreada geração de resíduos pelo homem, os quais muitas vezes não apresentam destinação correta. Tanto residências, como todos os ramos industriais, de transporte, de saúde, do setor público, etc., são pontos geradores de resíduos em diferentes quantidades e características.

A preocupação com a escassez dos recursos naturais e a poluição do meio ambiente culminou na criação de legislação específica para o reaproveitamento e destinação correta desses resíduos.

Um resíduo produzido em grande quantidade é o lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O termo lodo de esgoto é utilizado para denominar o resíduo resultante do processo de tratamento de esgoto.

Estima-se que a SANEPAR, empresa responsável pelo tratamento de esgoto do Município de Ponta Grossa, PR atende a uma população de 305.624 habitantes. Segundo a NBR 7229/1997 da ABNT, uma pessoa gera de 150 a 200 l de esgoto por dia, considerando a sua produção residencial em área urbana.

A utilização dos resíduos surge como uma ferramenta para a solução dos problemas sociais e ambientais em que a reciclagem é o conjunto de técnicas adotadas para aproveitar esses resíduos e reinseri-los no ciclo de produção.

Dados recentes apontam a urgência da necessidade de tratamento e destinação dos resíduos gerados pelo homem, que muitas vezes podem ter seu papel em benefício do meio ambiente, sendo reutilizados.

Uma alternativa adotada de destinação final do lodo em muitas regiões do Brasil é o envio para aterros sanitários. Essa solução apresenta custo elevado e tem deficiência de áreas físicas em aterros devido à crescente demanda da geração do lodo de esgoto. Outra opção é o uso na agricultura, técnica adotada em muitos países da Europa e com pesquisa em ascensão no Brasil. Com essa aplicação surge o controle dos metais pesados presentes no lodo, provenientes de processos industriais, e ainda fica vetado o seu uso na horticultura e demais produtos consumidos crus que tenham contato direto com o lodo.

A outra problemática refere-se à extração de recursos naturais que faz parte da história humana. As argilas situam-se normalmente em várzeas, planícies laterais de rios, zonas estas consideradas de proteção ambiental ou áreas de preservação permanente de acordo com o novo código florestal (Brasil, Lei 1265/2012).

A incorporação do lodo na argila como matéria-prima para a indústria cerâmica aplica a prática da destinação correta e reciclagem do resíduo reduzindo a extração da argila do meio ambiente e evitando a degradação de áreas nativas.

As principais vantagens de reciclar o lodo são: preservar os recursos naturais (menor consumo de matéria-prima), proteger o meio ambiente (diminui a extração de argila) e atenuar a destinação em aterros (reduzindo as áreas físicas e os custos com transporte).

O lodo de esgoto é abundante, por esse motivo o torna um resíduo característico para ser utilizado como matéria prima em outro processo.

Estudar a viabilidade da incorporação do resíduo da ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) na argila para a produção de blocos cerâmicos, visando a conservação dos recursos naturais, diminuindo o consumo de matérias-primas da natureza, amenizando o impacto ao meio ambiente e sugerindo uma opção de destinação para esse resíduo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a norma NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados, sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origens industriais, domésticas, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A ABNT, além da NBR 10004/04 (ABNT, 2004a) publicou outras três normas complementares para padronizar os aspectos relativos a resíduos sólidos, sendo:

NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento (ABNT, 2004b).

NBR 10006 – Solubilização de Resíduos - Procedimento (ABNT, 2004c).

NBR 10007 – Amostragem de Resíduos - Procedimento (ABNT, 2004d).

Quanto à classificação (item 4.2 da NBR 10004/04) os resíduos podem ser:

Resíduos classe I – Perigosos: aqueles que apresentam periculosidade, ou seja, oferecem risco à saúde pública e ao meio ambiente, ou uma das características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade (Anexos C, D, E e F) e patogenicidade, ou constem nos anexos A ou B da referida norma. Os resíduos perigosos são gerados de muitas fontes, que vão desde processos industriais de produção, como nossas gráficas, a baterias e lâmpadas fluorescentes, incluindo líquidos, sólidos, gases e lodos.

Resíduos Classe II – não Perigosos: Esta classe foi dividida em duas subclasses:

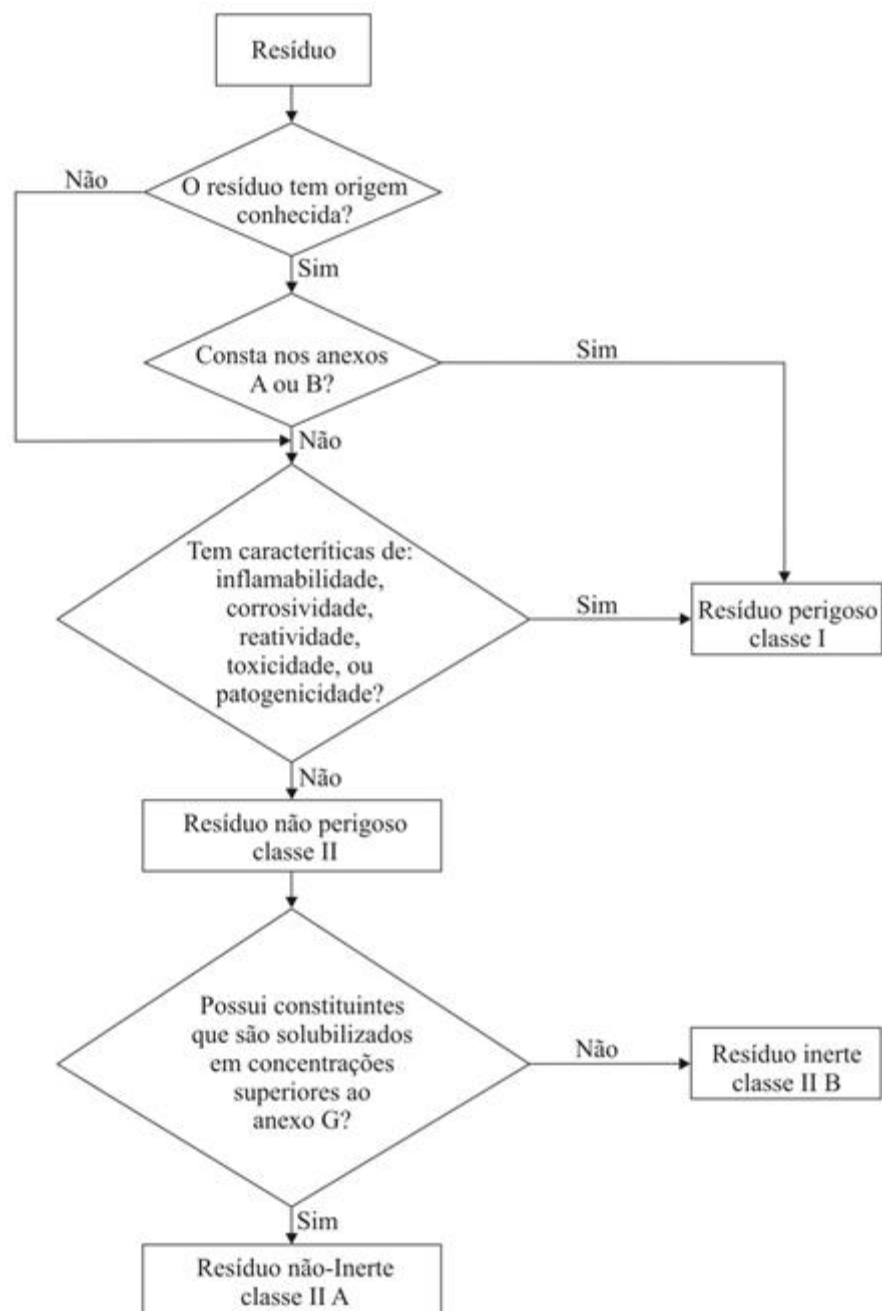
Resíduos Classe II-A – não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduos Classe II -B – Inertes: quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a NBR10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de

potabilidade de água, excetuando aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização).

Para facilitar a classificação dos resíduos sólidos, a NBR 10004 (ABNT, 2004a) apresenta em seu conteúdo, vários anexos e um esquema, ambos demonstrados a seguir na Figura 2.1 e Tabela 2.1, respectivamente.

Figura 2.1 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos (ABNT, 10004a).



Fonte: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Resíduos Sólidos – Classificação. NBR 10004, Rio de Janeiro (2004).

Tabela 2.1– Anexos da Norma NBR 10004 (ABNT, 10004a)

Anexo	Descrição
A (Normativo)	Resíduos perigosos de fontes não específicas.
B (Normativo)	Resíduos perigosos de fontes específicas.
C (Normativo)	Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos
D (Normativo)	Substâncias agudamente tóxicas
E (Normativo)	Substâncias tóxicas
F (Normativo)	Concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação
G (Normativo)	Padrões para o ensaio de solubilização
H (Informativo)	Classificação de alguns resíduos classificados como não perigosos

Fonte: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Resíduos Sólidos – Classificação. NBR 10004, Rio de Janeiro (2004).

O Fluxograma e a Tabela de anexos da NBR 10004 (ABNT, 2004a) apresentados auxiliam na classificação dos resíduos.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), o lodo da ETE pode ser enquadrado como classe II-A, resíduos não perigosos, não inertes. Essa classificação é válida apenas para os esgotos domésticos sem a contaminação de esgotos industriais que geralmente são classificados como resíduos classe I, perigosos.

No tocante à gestão de resíduos sólidos no Brasil, houve importante avanço com a aprovação da Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa Lei dispõe, dentre outros aspectos, sobre o aprimoramento das ações para fortalecer um modelo de gestão que consolide a hierarquia da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento e disposição final adequados de resíduos sólidos.

Outras resoluções a nível federal que trazem indicativos de padrões e parâmetros de qualidade para o descarte do lodo:

- Resolução CONAMA 357/2005: Define padrões a se manter com corpos de água e padrões de lançamento de efluentes.
- Resolução CONAMA 274/2000: Define padrões e balneabilidade com corpos de água.
- Resolução CONAMA 375/2006: Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

No Estado do Paraná, conforme a Lei Estadual nº 12.493/99:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei considera-se:

I - saneamento básico: conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

a) abastecimento de água potável: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição;

b) esgotamento sanitário: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente;

c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas;

d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas;

A responsabilidade pela execução de medidas para prevenir e/ou corrigir a poluição e/ou contaminação do meio ambiente decorrente de derramamento, vazamento, lançamento e/ou disposição inadequada de resíduos sólidos é:

I - da atividade geradora dos resíduos, quando a poluição e/ou contaminação originar-se ou ocorrer em suas instalações;

II - da atividade geradora de resíduos e da atividade transportadora, solidariamente, quando a poluição e/ou contaminação originar-se ou ocorrer durante o transporte;

III - da atividade geradora dos resíduos e da atividade executora de acondicionamento, de tratamento e/ou de disposição final dos resíduos, solidariamente, quando a poluição e/ou contaminação ocorrer no local de acondicionamento, de tratamento e/ou de disposição final.

2.2 ESGOTO SANITÁRIO

A norma brasileira NRR 9648/86 (ABNT, 1986) define esgoto sanitário com sendo “o despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”.

A mesma norma define esgoto sanitário como sendo “o despejo líquido resultante do uso da água para a higiene e necessidades fisiológicas humanas”. O esgoto industrial é

definido como sendo o “o despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitando os padrões de lançamento estabelecidos”.

Água de infiltração é “toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações” e a contribuição pluvial parasitária é definida como sendo “a parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”.

A palavra esgoto é utilizada tanto para definir o sistema de tubulação condutor de águas servidas, como o próprio líquido que flui por estas canalizações. (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Os esgotos podem ser classificados em dois grupos principais: esgoto sanitário doméstico e esgoto industrial. (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Os esgotos domésticos provêm principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas ou qualquer dispositivo de utilização de água para fins domésticos. São compostos essencialmente da água do banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes, águas de lavagem.

Os esgotos industriais, originários de qualquer utilização da água para fins industriais, adquirem características próprias em função do processo industrial empregado e devem ser tratados separadamente do esgoto doméstico.

2.2.1 Características do esgoto

- Físicas

A matéria sólida é a característica física mais importante do lodo de esgoto para o dimensionamento de controle de operações nas unidades de tratamento e representa em média 0,08 % do volume dos esgotos (a água compõe os restantes 99,92%) (JORDÃO e PESSOA, 1995).

Os sólidos totais (ST) permanecem como resíduo após a temperatura de 103 °C (JORDÃO e PESSÔA, 1995). Esses sólidos estão presentes em suspensão (SS ou SST) e dissolvidos (SD ou SDT), ainda dividem-se em sólidos fixos (matéria inorgânica) ou voláteis (matéria orgânica).

- Químicas

O lodo de esgoto apresenta grande variação em sua composição química, resultante do hábito da população, de esgotos industriais clandestinos, entre outros fatores.

As características químicas dos esgotos são classificadas em dois grupos: matérias orgânicas e inorgânicas.

a – Matéria orgânica

Segundo Jordão e Pessoa (1995), as substâncias orgânicas nos esgotos são constituídas principalmente por proteínas (40 a 60%), carboidrato (25 a 50%), gorduras e óleos (10%) e ureia, surfactantes, fenóis, pesticidas, entre outros.

As proteínas são produtores de nitrogênio, e contém carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, algumas vezes fósforos, enxofre e ferro. As proteínas são os principais constituintes de organismo animal, mas ocorrem também em plantas. O gás sulfídrico presente nos esgotos é proveniente do enxofre fornecido pelas proteínas. (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Os carboidratos contem carbono, hidrogênio e oxigênio. São as primeiras substâncias a serem destruídas pelas bactérias, com a produção dos ácidos orgânicos. Dentre os principais exemplos de carboidratos citam-se os açúcares em geral, o amido, a celulose, dentre outros.

A gordura é um termo que normalmente é usado para se referir ao material graxo, aos óleos e as substâncias semelhantes encontradas nos esgotos, proveniente do consumo de manteiga, óleos vegetais, em cozinhas. Pode estar presente também sob a forma de óleos minerais derivados do petróleo, e neste caso sua presença é altamente indesejável, pois geralmente são contribuições não permitidas que chegam as tubulações em grande volume ou grande concentração, aderem às paredes das tubulações e provocam seu entupimento e odores desagradáveis, além de diminuir as seções úteis; forma “escuma”, uma camada de material flutuante, nos decantadores, que pode entupir os filtros, interferem e inibem a vida aquática; trazem problemas de manutenção (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Os surfactantes (detergentes) são constituídos por moléculas orgânicas com a propriedade de formar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento em que o esgoto é lançado. Tendem a se agregar a interface ar-água, e nas unidades de aeração aderem à superfície de bolhas de ar, formando uma espuma muito estável e difícil de ser quebrada. O tipo mais comum é chamado ABS (Aquil – Benzeno – Sulfonado), típico dos detergentes sintéticos que apresentam resistência à ação biológica (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

b – Matéria inorgânica

A matéria inorgânica contida nos esgotos é formada, principalmente, pela presença de areia e de substâncias minerais dissolvidas. A areia é proveniente de águas de lavagem das ruas e de águas de subsolo, que chegam às galerias de modo indevido ou que se infiltram através das juntas das tubulações. Raramente os esgotos são tratados para remoção de constituintes inorgânicos, salvo a exceção de alguns despejos industriais (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

- Biológicas

O esgoto é constituído por organismos, microrganismos e pelos agentes patogênicos, como helmintos, protozoários, fungos, vírus, esporos, vermes e bactérias.

As bactérias são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica, tanto na natureza como nas unidades de tratamento biológico.

2.2.2 Tratamento do esgoto sanitário

A empresa SANEPAR adaptou a tecnologia denominada de RALF (Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente) para o processo de tratamento anaeróbico de esgoto.

O processo de tratamento anaeróbico se dá pela estabilização de resíduos feita pela ação de microrganismos, na ausência de ar ou de oxigênio elementar.

As etapas para o tratamento de esgoto com o sistema RALF da ETE estudada ocorrem da seguinte forma:

1ª Etapa: Rede coletora

O esgoto é coletado nas casas, prédios, escolas e encaminhado até a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por redes coletoras e interceptores.

2ª Etapa: Tratamento preliminar

Ao chegar à estação o esgoto é gradeado para reter sólidos grosseiros e o líquido é bombeado à ETE por meio de conjuntos moto bombas.

O tratamento preliminar é realizado através do sistema composto por caixa de entrada, gradeamento, calha de medição de vazão e desarenador.

Essa etapa conta com três gradeamentos sendo: o primeiro gradeamento (Figura 2.2) é automatizado com espaçamento de 2,5 cm entre as barras, o segundo e o terceiro gradeamentos (Figuras 2.3(a) e 2.3(b)) são manuais e possuem espaçamento entre as barras de 2,0 cm e 1,5 cm respectivamente.

Figura 2.2 – Gradeamento automatizado.



Fonte: A autora.

Figura 2.3(a) e 2.3(b) – Gradeamentos manuais.



Fonte: A autora.

Os desarenadores responsáveis pela retenção dos sólidos fixos são duas caixas de areia do tipo gravitacional. Possuem diâmetro de 3,8 m e estão localizadas logo após o primeiro gradeamento, entre canais paralelos com largura de 0,85 m.

A vazão é controlada por calha Parshall de 12” de largura. Após a calha Parshall (Figura 2.4) existe uma caixa divisora de fluxo, com dois vertedores triangulares que distribuem a vazão para os dois reatores. Para garantir que a vazão afluyente não ultrapasse o

limite de projeto considerado no dimensionamento, a bomba elevatória controla a vazão de entrada no processo de tratamento (MACHADO FILHO, 2011).

A principal finalidade desta etapa é reter os sólidos grosseiros para que o processo de tratamento de esgoto tenha continuidade adequada. O material retirado é levado por meio de caçambas para o aterro sanitário.

Figura 2.4 – Calha Parshall de 12”.



Fonte: A autora.

3ª Etapa: RALF (Reator Anaeróbico de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente)

Os reatores anaeróbicos de fluxo ascendente de lodo fluidizado são circulares, executados em paralelo e semienterrados.

As principais características dimensionais e dados paramétricos dos reatores anaeróbios, segundo a COBRAPE (1998) são:

- eficiência de remoção de material carbonáceo nos reatores (E1): 80%;
- eficiência total de remoção material carbonáceo no sistema (Et): 90%;
- diâmetro inferior: 14,2 m;
- diâmetro interno superior: 16,2 m;
- diâmetro externo superior: 25,6 m;
- lamina d'água: 7 m;
- altura da atmosfera interna: 0,85 m;
- concentração média de SST no reator: 2,5%;
- concentração média de SST no descarte de lodo: 3, 5%;
- fator de produção de lodo para reator alimentado por esgoto bruto: 0,30 kg SST/kg

DBO;

- volume útil: 1273 m³ ;

- área: 206,11 m²;

Os RALFs da ETE estudada possuem 60 tubos distribuidores em PVC com diâmetro de 75 mm, distribuídos uniformemente pelo reator e câmara aberta de sedimentação com placas vertedouras e retentora de espuma, com forma anelar-periférica.

O biogás gerado no processo é coletado através de tubulação vertical externa em PVC, com diâmetro de 50 mm, com queimador especial no seu extremo. Em todo perímetro externo do tanque existe um vertedor periférico instalado para regularizar o escoamento. Ao alcançar a superfície, o esgoto transborda por esse vertedor, sendo direcionado para um único ponto de coleta (caixa de coleta do efluente) através de uma canaleta lateral, disposta externamente ao RALF, dessa caixa o efluente é conduzido para o pós-tratamento.

Para melhor eficiência do RALF é realizada a limpeza da coroa uma vez ao dia e a limpeza da canaleta é feita três vezes na semana. (MACHADO FILHO, 2012).

A descarga de lodo excedente é feita por pressão hidráulica, através de tubulação de PVC diâmetro de 150 mm, instalada no fundo do reator. Os fluxos de lodo de descarte das unidades são reunidos em uma elevatória equipada com uma só bomba submersível, cujo recalque é dirigido para lançamento direto no terreno lateral. (COBRAPE, 1998). A Figura 2.5 mostra a vista do reator RALF.

Figura 2.5 – RALF (Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente).



Fonte: A autora.

4ª Etapa: Pós-tratamento

Essa fase recebe o esgoto tratado do RALF e o trata novamente em filtro biológico ou lagoa de estabilização para melhor purificação. Seu efluente pode ser lançado nos rios sem causar danos ao meio ambiente, à empresa SANEPAR, responsável pelo tratamento do

esgota, lança o efluente na lagoa de estabilização na própria unidade de tratamento e o lodo é encaminhado ao processo de higienização.

5ª Etapa: Higienização e acondicionamento do lodo

A empresa SANEPAR adota o processo de higienização e estabilização do lodo através da adição da cal, numa proporção de até 50% do volume de material.

O material higienizado fica acondicionado em um barracão coberto até a sua destinação final, que se dá como uso agrícola (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Local de armazenagem do lodo.



Fonte: A autora.

6ª Etapa: Lagoa de Pós-Tratamento

A lagoa de estabilização, apresentada na Figura 2.7, trata-se de uma unidade profunda que recebe separadamente os efluentes dos três reatores anaeróbicos. Os efluentes tratados são lançados no Arroio Verde que se coloca como um dos limites divisórios da área da ETE. (MACHADO FILHO, 2012).

Figura 2.7 – Lagoa de estabilização.



Fonte: A autora.

2.2.3 Resíduo do tratamento de esgoto: lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado nesse trabalho é do tipo anaeróbico coletado na ETE Verde.

Após o tratamento de esgoto tem-se o lodo e o efluente. O efluente líquido é a água a ser lançada nos corpos d'água e o lodo contém o material sólido e passa por um processo de tratamento antes do seu destino final.

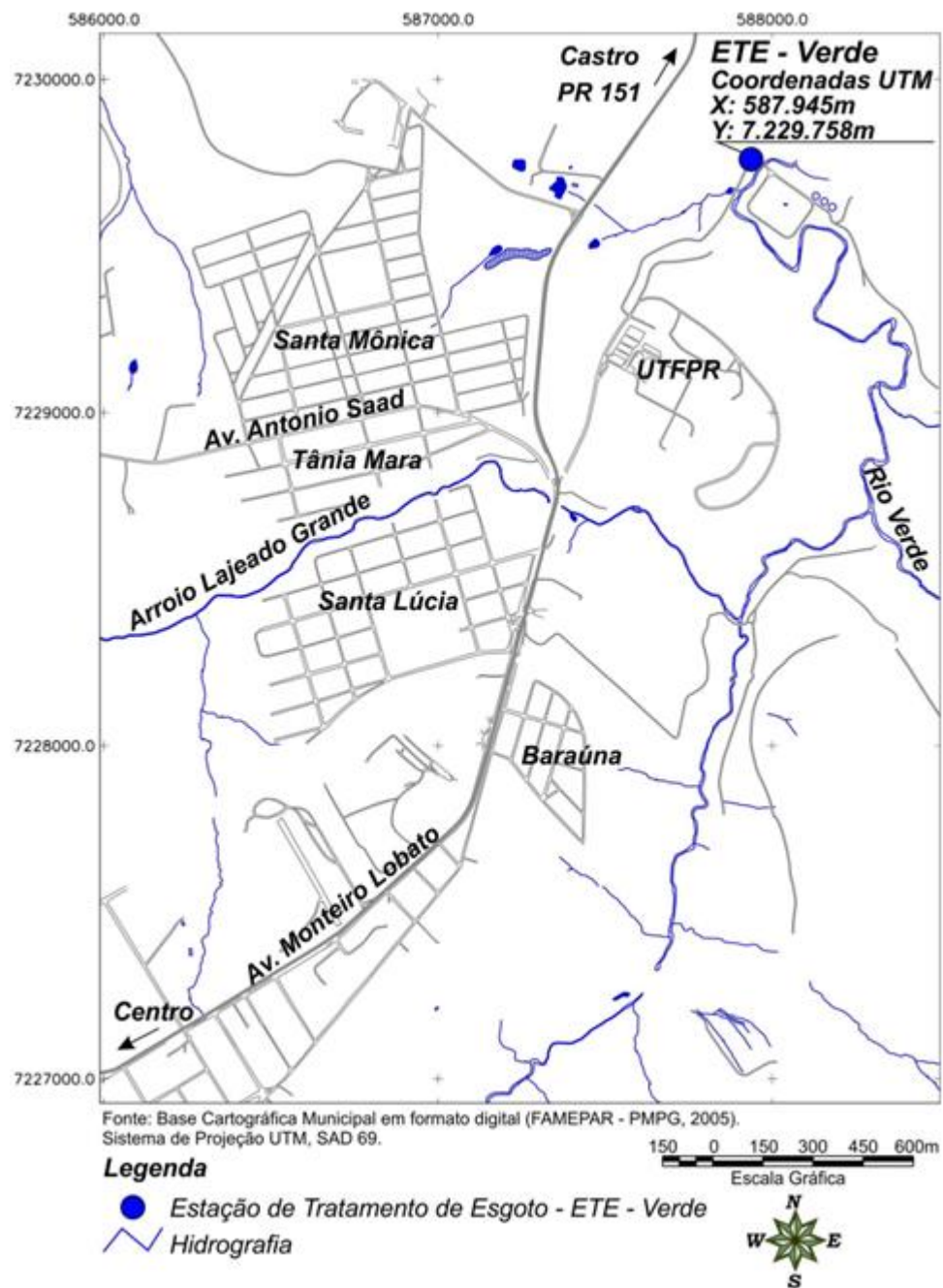
O lodo de esgoto resultante do processo de tratamento é composto de materiais orgânicos e minerais, além de água. As características do lodo e a sua composição dependem da origem do esgoto, do período de chuvas e da sazonalidade.

2.2.4 Estação de Tratamento de Esgoto - ETE Verde (Ponta Grossa-Pr)

O Município de Ponta Grossa é atendido por 7 Estações de Tratamento de Esgoto denominadas de ETE Ronda, ETE Tibagi, ETE Verde, ETE Olaria, ETE Gertrudes, ETE Cristo Rei, ETE Cará-Cará e ETE Congonhas.

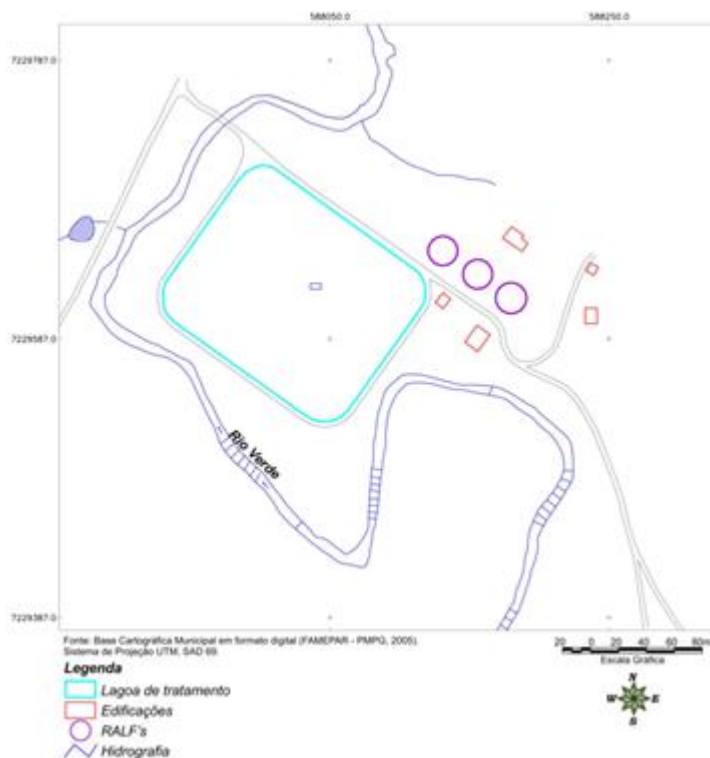
O trabalho de pesquisa e coleta do lodo foi realizado na ETE Verde que entrou em operação em 1991 e fica localizada no prolongamento da PR-151 no Jardim Pitangui, Município de Ponta Grossa / PR (Figura 2.8). Atualmente atende a 136.000 habitantes a uma vazão média a 200 L/s, com geração de lodo de aproximadamente de 140 m³/mês. É composta por três sistemas de gradeamentos, dois sistemas de desarenadores, quatro RALFs, uma única lagoa de estabilização facultativa (Figura 2.9) e um barracão para armazenagem do lodo com 24 leitos de secagem.

Figura 2.8 – Croqui de localização da ETE Verde.



Fonte: Base Cartográfica Municipal

Figura 2.9 – Composição da ETE Verde.



Fonte: Base Cartográfica Municipal

O corpo receptor do efluente da ETE Verde é o Rio Verde classificado como Classe 2 de acordo com a Resolução CONAMA 20/86 (AMBIENGE, 2003).

A Figura 2.10 demonstra uma foto aérea da estação de tratamento de esgoto denominada de ETE Verde.

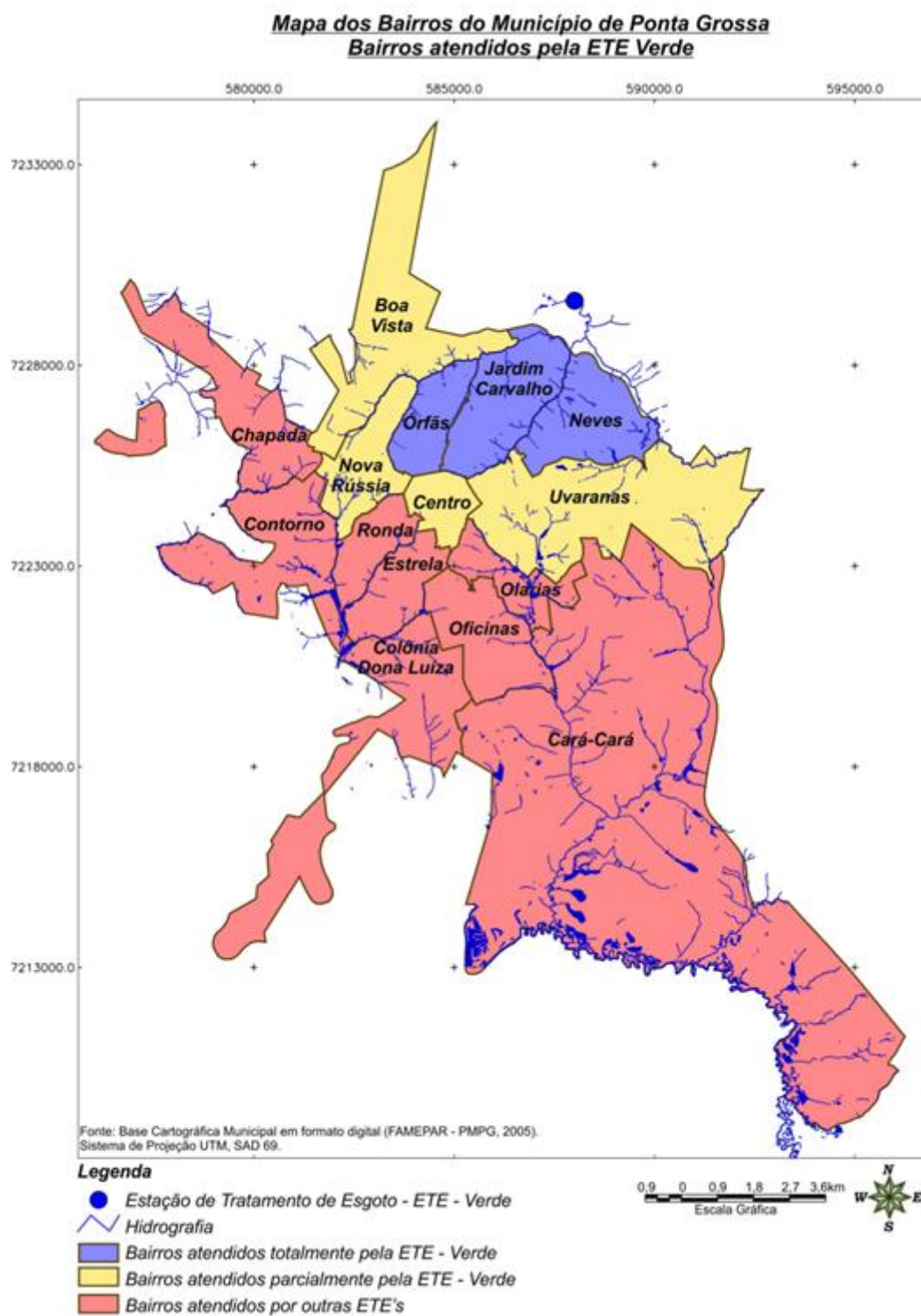
Figura 2.10 – Foto aérea da região em estudo.



Fonte: Google Earth (2012)

A ETE Verde atende aos bairros: Centro (parcialmente), Nova Rússia (parcialmente), Palmeirinha, Santa Mônica, Uvaranas (parcialmente), Nossa Senhora das Graças, Jardim Carvalho, Marina e Rio Verde (Figura 2.11).

Figura 2.1 – Mapa dos bairros atendidos pela ETE Verde.



Fonte: Base Cartográfica Municipal

2.3 ARGILA

Gomes (1986, p.10) define a argila como sendo: rocha constituída essencialmente por minerais argilosos, podendo conter outros minerais, os minerais não argilosos, além de matéria orgânica e outras impurezas caracterizada fisicamente por:

- possuir conteúdo elevado de partículas com diâmetro esférico equivalente (d.e.e.) $\leq 2\mu\text{m}$;
- quando pulverizada e misturada com água em quantidade adequada, torna-se plástica;
- após a secagem, torna-se consistente e rígida, e após a queima a temperatura elevada, se superior a 1000°C , adquire grande dureza.

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água certa plasticidade; quimicamente são as argilas formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Designa ainda o nome “argila” um grupo de partículas do solo cujas dimensões se encontram entre uma faixa especificada de valores (SANTOS, 1989).

Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), as argilas são compostas por partículas de diâmetro inferior a 0,002 mm, que apresentam plasticidade quando úmidas e, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos.

A argila mineralogicamente é composta por caulinita, illita e montmorilonita, enquanto as impurezas presentes, às vezes úteis, são: quartzo, mica, feldspato, óxido de ferro, carbonatos e matéria orgânica. É proveniente da decomposição de rochas ígneas primárias, tais como granitos, feldspatos e pegmatitos, que se formam através da ação química da água, do óxido de carbono, dos ácidos húmicos e raramente dos gases de enxofre, flúor, auxiliados por temperaturas elevadas. Apresentam cores e tonalidades variadas, predominando do cinza-médio a escuro, além das tonalidades esverdeadas, amareladas, avermelhadas e amarronzadas (CORREIA FILHO, 1997).

2.3.1 Cerâmica

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis destes materiais são normalmente atingidas por meio de um processo de tratamento térmico a alta temperatura conhecido como sinterização (CALLISTER, 2002).

Os materiais cerâmicos são compostos de elementos metálicos e não metálicos, para os quais as ligações interatômicas ou são totalmente iônicas ou parcialmente iônicas com alguma natureza covalente. Eles são frequentemente óxidos, nitretos e carbetos. Estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de eletricidade e calor, e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes abrasivos do que os metais e polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, os cerâmicos são duros, porém mais quebradiços (CALLISTER, 2002).

Os materiais cerâmicos são geralmente divididos em dois grupos: as cerâmicas tradicionais e as cerâmicas avançadas.

As cerâmicas tradicionais são obtidas a partir de materiais primas naturais tais como argilo-minerais e areia; as cerâmicas avançadas são feitas a partir de óxidos, nitretos, carbonetos e boretos de alta pureza, têm composição definida e o tamanho, a forma e a distribuição das partículas são controladas. O mercado mundial de cerâmicas tradicionais é pelo menos uma ordem de grandeza maior que o de cerâmicas avançadas (PADILHA, 2000).

2.3.2 Processamento de materiais cerâmicos tradicionais

No Brasil, somente na década de 30 começou a produção dos primeiros tijolos furados por meio de processo mecanizado. Além do tijolo, a argila é utilizada para a fabricação de vários materiais cerâmicos utilizados na construção civil, como: telhas, manilhas, elementos vazados, entre outros. BATISTA (2009 apud OLIVEIRA, 2000, pp. 57-65).

As fases para a preparação da fabricação dos produtos cerâmicos incluem a extração da matéria prima, preparação da massa, conformação, secagem e a sinterização.

O método de fabricação de produtos cerâmicos inicia na extração da matéria-prima em sua jazida.

A preparação da massa se inicia logo após a extração. As argilas geralmente são depositadas em locais abertos para o processo de amadurecimento, onde adquirem propriedades provenientes da ação das intempéries. Esse fator influencia na fermentação das partículas orgânicas quando em contato com o oxigênio do ar.

O destorroamento para a fabricação de produtos a base de cerâmica vermelha, demonstrado é realizado, nas pequenas olarias, de forma manual com a utilização de pás, enxadas e picaretas, entre outros. As empresas de grande porte utilizam processos modernos e empregam britadores, moinhos que desaglomeram as partículas com maior eficiência. A

moagem com maior intensidade aumenta a porcentagem de partículas finas, levando a um maior empacotamento de grãos na conformação da peça, proporcionando menor porosidade, retração linear e maior resistência mecânica (BARBA et al. 1997).

Dependendo da forma e características desejadas para a peça cerâmica, pode-se escolher o método de conformação a ser utilizado. A conformação é a responsável, na maioria dos casos, por dar a forma final ao produto cerâmico. De um modo geral, os métodos de conformação podem ser agrupados de acordo com as propriedades reológicas da massa cerâmica, sendo dividida conformação de pós secos ou semi-secos, conformação de massas plásticas e colagem de barbotina.

A prensagem uniaxial é uma das técnicas de conformação de peças empregada no processamento de materiais cerâmicos tradicionais. Ela consiste na compactação da massa contida em uma cavidade rígida, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial através de um ou vários punções rígidos (Albaro, 2001). A prensagem uniaxial pode ser designada com prensagem a úmido ou a seco, dependendo do teor de umidade do material.

A técnica por conformação plástica é amplamente empregada na produção de cerâmicas tradicionais, incluindo, tijolos vazados, lajes, manilhas, louças de mesa, etc. Todos esses produtos utilizam massas à base de argila.

A conformação plástica geralmente pode ser feita pelo processo de extrusão, no qual a massa plástica é empurrada através de um bocal, sendo que a forma do bocal define o perfil do material extrudado. Nesse processo, as matérias-primas e a água podem ser introduzidas manualmente por meio de uma correia que as leva até a extrusora, também conhecida como maromba. A massa cerâmica é comprimida por uma rosca helicoidal, passando por uma grelha, extraíndo o ar através do sistema a vácuo. Após este procedimento, a massa cerâmica continua em outra rosca helicoidal que efetua a extrusão no formato desejado através da boquilha. A argila extrudada passa sobre o cortador manual, onde é realizado o corte no comprimento desejado. As Figuras 2.12 (a) e 2.12 (b) mostram uma extrusora sendo utilizada para a fabricação de blocos cerâmicos vazados.

Figura 2.12 (a) e 2.12 (b) – Extrusora sendo utilizada para a fabricação de blocos cerâmicos vazados.



Fonte: A autora.

A etapa de secagem de peças cerâmicas é considerada uma etapa delicada e muito importante. No processo de secagem do material cerâmico inicialmente ocorre a saída das moléculas de água dos poros da peça através da difusão das moléculas para a superfície por evaporação e em seguida inicia o processo lento de retirada da água adsorvida. Quando a água evapora as partículas de matérias-primas acomodam-se nos lugares antes ocupados pelas moléculas de água manifestando-se na forma de contração do volume da peça cerâmica.

A taxa de evaporação da água pode ser controlada pela temperatura, umidade e taxa de escoamento do ar (CALLISTER, 1999).

Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. Sua força motora é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, conseguido pela diminuição da superfície total do sistema. Em muitas ocasiões, isto traz como consequência a eliminação do espaço vazio existente entre as partículas, resultando em um corpo rígido e completamente ou parcialmente denso. Esse aquecimento, chamado sinterização, normalmente confere à massa de pó aglomerada as propriedades físicas e mecânicas desejadas (SILVA, 1998).

O processo de sinterização dos materiais cerâmicos tradicionais ocorre em uma sequência de temperatura crescente. Segundo MÁS (2003), as transformações físicas e químicas durante a sinterização são:

- Saída da umidade residual: a água de umidade sai por volta dos 100°C e a água interna do cristal da argila crua sai entre 550°C e 600°C.

- Decomposição das argilas: entre as temperaturas de 550°C e 650°C acontece à desidroxilação das argilas, ou seja, a perda de água de constituição da argila. A partir do momento em que não há água de constituição na argila, suas propriedades serão perdidas de forma irreversível. Na curva de análise térmica diferencial (ATD) para as temperaturas entre 550°C e 650°C fica registrado um pico endotérmico, demonstrando a absorção de calor. A argila na sinterização inicial entre 600°C a 700°C, é mais fraca do que o material do qual provém, esfarelando-se.

- Temperatura crítica do choque térmico: nas temperaturas entre 560°C e 580°C, através de ensaio de dilatometria verifica-se a presença de sílica livre na matéria prima, a qual aumenta bruscamente a sua dimensão. A variação severa de dimensão ocasiona trinca no material.

- Decomposição dos carbonatos: entre 850°C e 1000°C, demonstrado pelo ensaio de análise térmica diferencial (ATD), ocorre à decomposição dos carbonatos. A calcita (carbonato de cálcio) se decompõe em torno de 900°C a 950°C. Quando há a presença de calcário, este deve estar finamente moído para que possa reagir e formar silicatos de cálcio.

- Sinterização: acima de 900°C, os fundentes (os óxidos de potássio, sódio e ferro, entre outros) formam líquidos de alta temperatura. Esse líquido penetra entre as partículas sólidas, promovendo a aproximação entre elas e diminuindo a porosidade. Quanto mais elevada a temperatura, maior será a quantidade de líquido formada. No resfriamento, o líquido forma um vidro que mantém as partículas sólidas unidas.

2.3.3 Cerâmica São Gerônimo

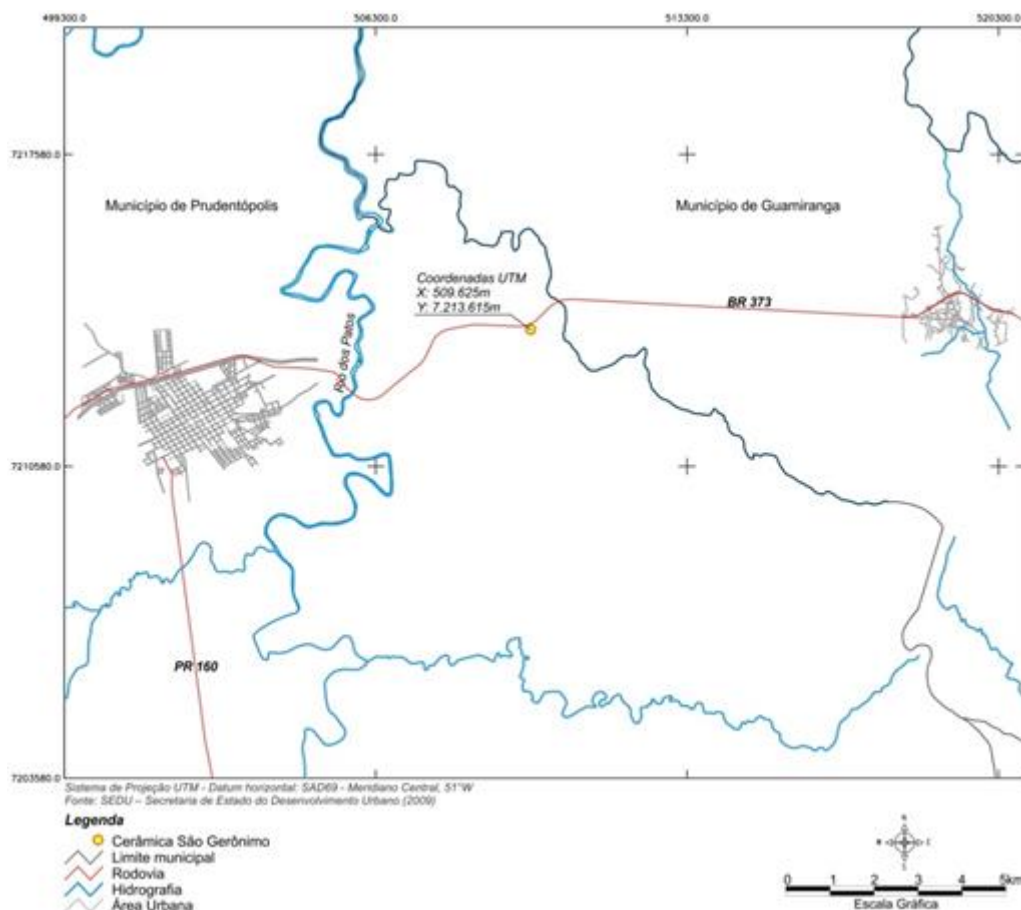
2.3.3.1 Localização

A Cerâmica São Gerônimo fica situada no Município de Prudentópolis/PR, na Rodovia BR 373 (Figura 2.13).

Do ponto de vista fisiográfico, o município de Prudentópolis está inserido no Segundo Planalto do território paranaense, compreendido entre a Serra de São Luiz do Purunã e a Serra da Esperança. Geologicamente encontra-se representado por sedimentos e rochas vulcânicas da Bacia do Paraná, das eras Paleozóica e Mesozóica, estando presentes na base

para o topo as formações Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto, Botucatu e Serra Geral. Localmente, as áreas trabalhadas encontram-se representada pelas formações Teresina e Rio do Rasto (MINEROPAR, 2001).

Figura 2.13 – Croqui de localização da Cerâmica São Gerônimo.



Fonte: Base Cartográfica Municipal

2.3.3.2 Processo de fabricação

Para o processo produtivo, a argila utilizada na Cerâmica São Gerônimo é de jazida própria, situada próxima ao empreendimento.

A extração da argila (Figura 2.14) é realizada diariamente com o uso de retroescavadeira, a qual faz o carregamento até o caminhão basculante, que transporta até a Cerâmica São Gerônimo para armazenamento do material (Figura 2.15).

Figura 2.14 – Local de extração da argila.



Fonte: A autora.

Figura 2.15 – Local de armazenamento da argila na Cerâmica São Gerônimo.



Fonte: A autora.

A Cerâmica São Gerônimo mistura dois tipos de argilas para produção dos materiais cerâmicos.

O material é carregado manualmente à transportadora automática, que o conduz até o misturador. No misturador é controlada a umidade, efetuando-se a mistura das argilas.

Do misturador, a argila desce ao laminador, que tem por objetivo reduzir a argila pastosa em lâminas finas, fazendo-a passar entre dois cilindros de ferro fundido que, além de triturar por esmagamento todas as pedrinhas ou torrões ainda não desfeitos, produzem mais uma mistura.

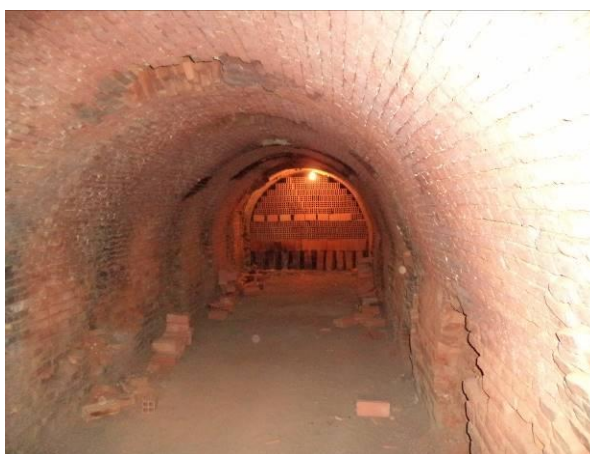
O material laminado é transportado por uma esteira automática até a maromba a vácuo, onde alimentadores forçam-no a passar através das grelhas, fragmentando-o em pequenas porções nas quais se processa a desaeração, reduzindo, ao mínimo, o ar contido ou incluído na massa cerâmica pela ação das misturas e da água agregada.

Caindo na rosca-sem-fim, a argila é impelida para frente, passa através da câmara de vácuo e depois através dos orifícios da boquilha, que é o molde dos tijolos.

O bloco de argila extrudada, sai da boquilha, corre sobre os rolos da máquina cortadora e é automaticamente cortado em tamanhos pré-fixados, que correspondem ao comprimento dos tijolos furados.

As peças prontas são transportadas por carrinhos até as estufas, onde permanecem por 10 horas a temperatura de 90°C. Após a estufa, as peças são manualmente transportadas até os fornos (Figura 2.16) e empilhadas, de forma que a queima se processe homogênea em todas as peças, onde permanecem por 30 horas, sendo, então, encaminhadas para o controle de qualidade e posteriormente para a expedição e consumo.

Figura 2.16 – Forno da Cerâmica São Gerônimo.



Fonte: A autora.

2.3.4 Aplicação de resíduos sólidos em cerâmicas

As massas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituída de materiais plásticos e não plásticos, com uma ampla possibilidade de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes. Desta forma, a reciclagem e a reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais na incorporação com a argila para produção de materiais cerâmicos, têm sido objeto de pesquisas em diversos setores, que buscam soluções que conciliem vários aspectos, como custo de disposição, tratamentos, tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e, finalmente, o impacto econômico e ambiental da reciclagem.

Na área acadêmica, a possibilidade da incorporação de resíduos na fabricação de produtos cerâmicos vem sendo estudada com frequência. (DÍAZ et al.,2013) avaliaram a possibilidade de uso de lodo de esgoto e lama vermelha como matérias primas cerâmicas. Nesta investigação os autores concluíram que com a adição do lodo, a resistência à flexão diminuiu e com a lama, a resistência mecânica encontrada foi muito boa. A propriedade massa específica aparente diminuiu com a adição do lodo em comparação com os corpos de prova feitos somente com argila, devido à combustão da matéria orgânica presente lodo, o que gera poros no corpo de prova, aumentando a absorção de água e consequentemente diminuindo a resistência mecânica e em relação à lama, ocorreu o aumento da massa específica aparente devido à adição de ferro, elemento que serve como fundente e que pode ajudar na fase vítrea, diminuindo os valores de porosidade aparente e de absorção de água. Os autores sugerem a avaliação das misturas em escala semi-industrial, sendo que na primeira fase do trabalho, a mistura analisada poderia ser utilizada na fabricação de tijolos de alvenaria, na segunda fase do trabalho os resultados obtidos indicam materiais que precisam de acabamentos como reboco, por exemplo, devido ao seu aspecto estético.

Silva, M. V. et al. (2011) estudaram o desenvolvimento de tijolos com a incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água e concluíram que tijolos com 90% de lodo e 10% de cinza não possibilitaram o ensaio em prensa para verificar o limite estabelecido pela NBR 10863/94 (ABNT, 1994) e que apenas os tijolos confeccionados nas proporções cinza: lodo: solo: cimento de 8:20:60:12 atenderam aos requisitos mínimos quanto à compressão e a absorção de água conforma a NBR 10863/94 (ABNT, 1994), podendo ser recomendado para o uso na construção e foram classificados como classe II- não inerte.

Araújo, F. S. D. et al. (2008) investigaram a influência do lodo de ETE na massa para a fabricação de cerâmica vermelha. Nesse trabalho os autores identificaram que os corpos de prova com adição de lodo sofreram aumento progressivo na retração linear de queima até 1100 °C, com redução em 1.200°C, esse fato, foi associado ao inchamento da peça nessa temperatura. Outro fator analisado pelos autores foi a alteração da densidade de acordo com a temperatura de queima, consequência direta da formação da fase vítrea e preenchimento dos poros.

R. Tartari et al.(2008) pesquisaram a utilização do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) da unidade Tamanduá em Foz do Iguaçu, PR como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Nessa pesquisa os autores analisaram as misturas binárias em diversas porcentagens em peso entre as argilas da Cerâmica Santa Rita e da Cooperativa de Artesões

de Foz do Iguaçu, PR. Foram realizados ensaios tecnológicos nos corpos-de-prova confeccionados por prensagem uniaxial e sinterizados de 950 até 1050 °C. Em seguida foi incorporado o lodo 4, 8, 12 e 16% nas composições entre as argilas que apresentaram os melhores resultados. Os autores concluíram que a porcentagem máxima de lodo a ser adicionada a massa cerâmica estudada foi de 8%, logo acima desse resultado os ensaios demonstraram trincas e deformações.

Teixeira et al. (2006) estudaram o efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) do Município de Presidente Prudente nas propriedades de material cerâmico estrutural. Neste estudo os pesquisadores realizaram caracterizações física, química e mineralógica do lodo da ETA e ensaios tecnológicos em corpos de prova com diferentes concentrações de lodo. Os resultados obtidos na análise mineralógica demonstraram que estes lodos apresentaram composição parecida com as das argilas usadas pelas cerâmicas. O resultado geral demonstrou que a adição do lodo da ETA a massa cerâmica piorou as suas propriedades, entretanto, os valores obtidos para as propriedades tecnológicas ainda permaneceram dentro dos valores limites aceitáveis para a produção de tijolos e concluíram que as propriedades físicas e cerâmicas do lodo e, principalmente, da argila irão definir a possibilidade ou não de incorporação e a concentração, para cada temperatura de queima.

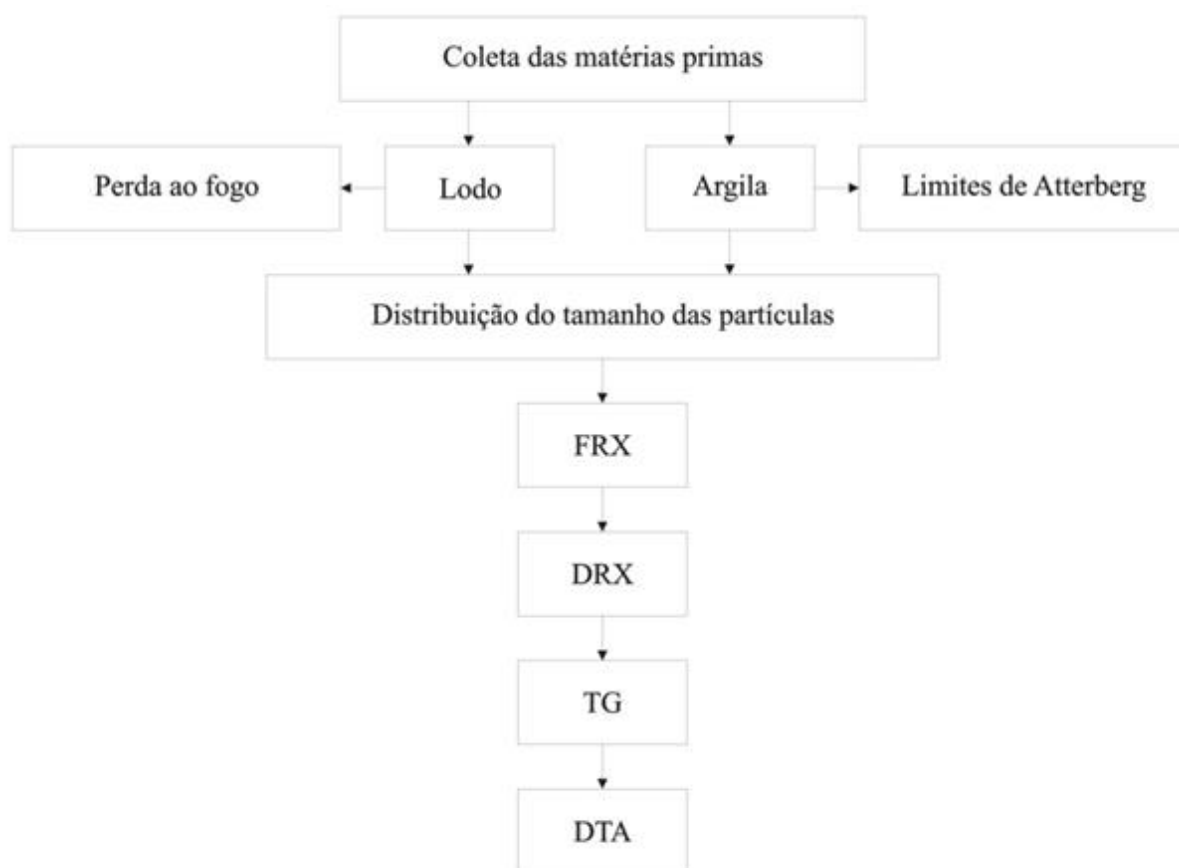
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, estão descritos os procedimentos experimentais, utilizados neste trabalho.

Inicialmente as matérias-primas foram caracterizadas química e fisicamente (Figura 3.1). Em seguida foram preparadas as composições com diferentes quantidades de lodo (5 a 50% em massa). Essas composições foram conformadas por prensagem uniaxial e caracterizadas quanto às suas propriedades físicas e químicas. A partir desses resultados, foram preparadas as composições por extrusão e sinterizadas na Cerâmica São Gerônimo.

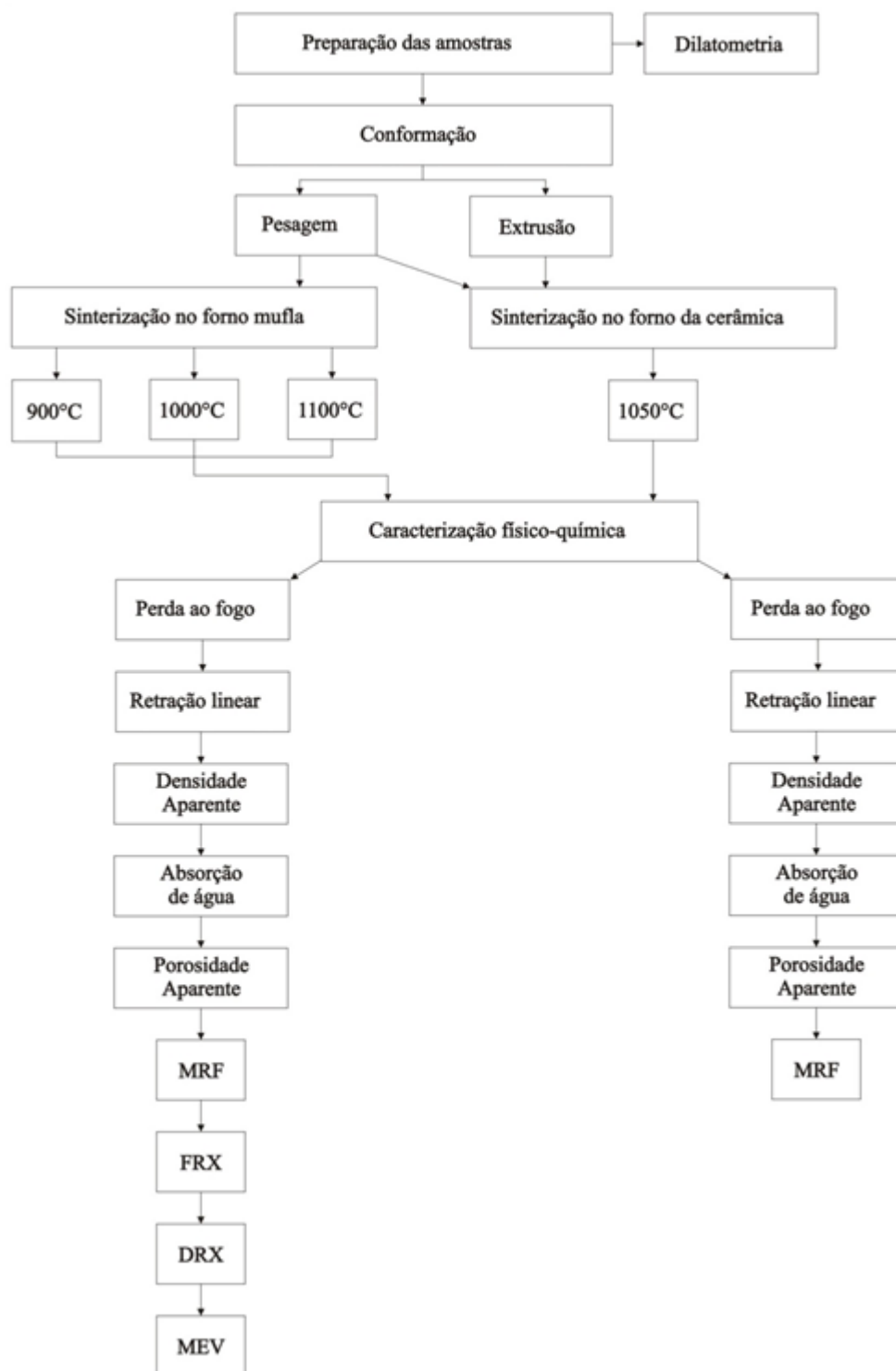
A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do procedimento experimental utilizado para esse estudo.

Figura 3.1 – Fluxograma de caracterização das matérias-primas e amostras.



Fonte: A autora.

Figura 3.2 – Fluxograma representativo do processo experimental



Fonte: A autora.

3.1 MATÉRIAS PRIMAS

As argilas utilizadas neste estudo são naturais do Município de Prudentópolis/PR, onde são empregadas na fabricação de tijolos e blocos vazados pela Cerâmica São Gerônimo. O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE-Verde) da SANEPAR em Ponta Grossa/PR, logo após o tratamento do esgoto.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A Cerâmica São Gerônimo faz a extração de cinco argilas diferentes, mas utiliza para a fabricação do seu produto, a mistura de duas dessas argilas. Para o controle da retração dos tijolos, é adicionado a massa, tijolos queimados descartados. Esses tijolos são moídos e misturados à massa cerâmica, em pequena quantidade.

Para a realização desse trabalho foram escolhidas as duas argilas que estavam sendo utilizadas para a fabricação dos produtos no momento em que foi feita a coleta do material.

Com a mistura dessas duas argilas foi feita a amostra referência sendo que a partir dessa amostra foram adicionadas diferentes quantidades de lodo.

As argilas utilizadas foram caracterizadas quanto à sua plasticidade (limites de Atterberg) e a mistura das duas argilas foi caracterizada pela distribuição de tamanho de partículas, composição química e mineralógica e análise térmica diferencial e termogravimétrica.

O lodo coletado foi caracterizado quanto à sua perda ao fogo, distribuição de tamanho de partículas, composição química, mineralogia e análise térmica diferencial e termogravimétrica.

3.2.1 Limite de Atterberg

Os limites de Atterberg determinam a quantidade de água que uma determinada substância possui no seu estado de transição entre o estado líquido e o estado plástico (LL) e quando perde a plasticidade (LP)

O índice de plasticidade (IP) é fator determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Os limites de Atterberg das matérias-primas foram determinados conforme a norma NBR 7180/84 (ABNT,1984), de acordo com a equação 3.1.

$$IP = LL - LP \quad (3.1)$$

Em que: IP = Índice de plasticidade;

LL= Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

Para obter o limite de liquidez (LL) das matérias-primas utilizadas pela Cerâmica São Gerônimo foi colocada parte da amostra da argila em um recipiente de porcelana, em seguida adicionada água até a obtenção de uma massa homogênea. Uma amostra da massa obtida foi acondicionada na concha do aparelho Casagrande, de forma que a parte central ficou com 1 cm de espessura, com o cinzel foi feita uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho. Para a determinação da umidade foi girada a manivela do aparelho Casagrande, na proporção de duas voltas por segundo, até o total fechamento da ranhura e após esse procedimento foi retirada uma pequena quantidade do material no local onde as bordas da ranhura se tocaram. Em seguida foi verificado o peso úmido da amostra, a qual foi posteriormente colocada na estufa por 24 horas a temperatura de 105° C. Após a secagem foi feito o peso seco da amostra. Todo o processo foi repetido 5 vezes para cada amostra.

O limite de plasticidade foi alcançado com a massa homogeneizada, a qual foi feita uma pequena bola, sendo esta rolada sobre uma placa de vidro, com a pressão da palma da mão para dar o formato cilíndrico até atingir as dimensões de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, em seguida foi coletado alguns fragmentos fissurados e medido o teor de umidade conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986).

3.2.2 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo consiste na determinação da perda de massa dos corpos de prova durante a sinterização.

Para avaliar a perda ao fogo, uma amostra de lodo foi seca em estufa por 24 h a temperatura de 105°C, em seguida foi destorroada, moída e passada na peneira com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT) e pesada. Após esse procedimento, a mesma foi aquecida num forno mufla à temperatura de 1000°C por 2 h e pesada. A perda de massa do material durante a queima foi identificada conforme a equação 3.2.

$$PF (\%) = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que: PF = Perda ao fogo (%);

Mi = Massa inicial após a estufa (g);

Mf = Massa final após a sinterização (g).

3.2.3 Distribuição do tamanho das partículas

As propriedades do produto cerâmico final dependem significativamente da distribuição granulométrica e área superficial da matéria prima empregada, tornando essa técnica muito importante. Para o ensaio de distribuição de partículas foi utilizado o equipamento da marca: Shimadzu SALD-220. A distribuição de tamanho de partículas foi feita após a mistura das duas argilas.

3.2.4 Análise química

As matérias primas e o lodo, após secos em estufa por 24 h a uma temperatura de 105 °C foram moídos e destorroados em almofariz e passados na peneira com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT). As matérias-primas foram analisadas quimicamente por fluorescência de raios-X, utilizando o equipamento da marca Shimadzu modelo EDX-7000. Os elementos químicos com maior concentração presente nas amostras apresentam seus resultados em forma de óxidos.

3.2.5 Análise mineralógica

A caracterização mineralógica das matérias primas foi feita por difração de raios X, utilizando um difratômetro XRD-6000 da marca Shimadzu. Após a secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas, a massa foi destorroada em almofariz de porcelana e adequada granulometricamente sendo passada em peneira a com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT). Para a realização da difração de raios-X foi utilizada radiação Cu-K α , com uma tensão de aceleração de 40 kV e a corrente de 30 mA, com varredura de 2° a 80° para 2 Θ , velocidade de varredura de 2°/min. Os resultados de identificação de cada fase foi dado por comparação entre os picos gerados por difratograma, utilizando o software XRD 6000.

3.2.6 Análise termodiferencial e termogravimétrica

As decomposições térmicas, reações e perdas de massa das matérias-primas foram analisadas por meio de análise térmica diferencial associada à termogravimetria na faixa de temperatura de 25°C a 1150°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto, em um equipamento de análise térmica da marca NESTCHZ modelo STA 409EP.

3.3 HOMOGENEIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

3.3.1 Homogeneização e preparação das amostras para o processo de prensagem

Após a escolha das argilas que seriam utilizadas neste trabalho, foram preparadas as misturas com diferentes quantidades de lodo.

Inicialmente foi preparada uma amostra referência que consistia da mistura das duas argilas escolhidas. As argilas foram misturadas em moinhos de bolas com a adição de 2% de silicato de sódio, como defloculante, por 6 horas. Em seguida foram secas em estufa por 24 h a 110°C. A mistura seca foi então destorroada em almofariz de porcelana e passada em peneira com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT).

A essa mistura foi adicionada diferentes quantidades de lodo, que variaram de 5 a 50% em peso. A Tabela 3.1 foi apresenta as composições estudadas com as respectivas denominações utilizadas nesse trabalho para cada uma delas.

Tabela 3.1 – Composições estudadas.

Composição	% Argilas (em peso)	% Lodo (em peso)
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20
6	75	25
7	50	50

Fonte: A autora

As composições da amostra referência (0% de lodo) com as porcentagens de lodo 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 50%, foram preparadas em moinho de bolas, em água, por

aproximadamente 4 horas. Em seguida, as mesmas permaneceram na estufa por 24 h a 110 °C e posteriormente a esse processo as amostras foram destorroadas em almofariz de porcelana e passadas na peneira malha ABNT com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT).

Esta metodologia foi escolhida por proporcionar uma boa homogeneização das misturas.

3.3.2 Homogeneização e preparação das amostras para o processo de extrusão.

Para verificar a possibilidade de conformação das massas cerâmicas estudadas também pelo processo de extrusão e verificar se o lodo afetaria esse processo de conformação, as composições 4 e 5 foram conformadas por extrusão. Essas duas composições foram escolhidas por apresentarem uma quantidade razoável de lodo na sua formulação, 15 e 20%, e também por terem apresentado bons resultados quanto às suas propriedades físicas.

Para o processo de extrusão realizado no laboratório de Engenharia de Materiais foi coletada a mistura das argilas utilizadas na fabricação de tijolos vazados no misturador da maromba da empresa São Gerônimo. Além da mistura das argilas, foram coletados tijolos na saída do processo de extrusão a cada 15 minutos, totalizando 5 amostras.

A mistura das argilas e os tijolos coletados foram embalados e vedados para manter a umidade do material. Para medir o teor de umidade do material coletado, foi separada uma pequena quantidade de argila do misturador da maromba, pesada e colocada na estufa por 24 h a 105°C. O mesmo procedimento foi realizado com os tijolos, onde uma pequena amostra de cada tijolo foi cortada e colocada na estufa por 24 h a 105°C. Após a secagem, as amostras foram pesadas novamente e por meio da equação 3.3 foi obtido o teor de umidade em porcentagem.

$$w = \frac{M_t - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Em que: w = teor de umidade (%);

M_t = massa do material úmido;

M_s = massa do material seco.

Em seguida 5 quilos do material do misturador da maromba foram levados à estufa a temperatura de 105°C por 24 horas.

Após a secagem do material foram preparadas duas amostras com a adição de 15% e 20% de lodo a massa de argila (composições 4 e 5).

As duas amostras foram homogeneizadas em uma bateadeira industrial com a adição de água, previamente determinada através do teor de umidade utilizado na Cerâmica São Gerônimo.

3.3.3 Conformação dos corpos de prova

a) Conformação dos corpos de prova por prensagem

Os corpos-de-prova das composições estudadas foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica P10 ST, com uma pressão de 24 MPa em forma de barrinhas, utilizando uma matriz de aço retangular com as dimensões de (15,1 x 30,1 x 55,1) mm.

b) Conformação dos corpos de prova por extrusão

Os corpos de provas das composições 4 e 5 foram alimentadas numa extrusora de bancada marca Gelinski, modelo MVIG-05 (Figura 3.3 a) . O processo de extrusão iniciou com a consolidação da massa e extração do ar da argila, a qual foi forçada através de um molde em forma de barrinha com as dimensões de (10,8 x 10,6 x 25,4) cm (Figura 3.3b).

Figura 3.3(a) e 3.3 (b) – Extrusora de bancada e molde em forma de barrinhas.



Fonte: A autora

3.3.4 Análise dilatométrica

Para verificar o comportamento durante o processo de sinterização e os efeitos da adição do lodo na sinterização dos corpos de prova foram realizados ensaios de dilatometria com todas as composições estudadas. Os ensaios foram realizados em um dilatômetro da marca Netzsch Dil 402EP. As amostras foram aquecidas a uma taxa de 10°C/min até a temperatura de 1150 °C/min.

Os copos de prova para análise dilatométrica foram prensados com uma amostra de cada composição, em matriz uniaxial de aço na forma cilíndrica com diâmetro de 6 mm.

3.3.5 Sinterização

a) Sinterização no forno mufla

Os corpos de prova prensados foram sinterizados em forno mufla marca JUNG, em atmosfera natural com patamar de 120 minutos e taxa de aquecimento de 10°C/min, nas temperaturas de 900 °C, 1000 °C e 1100 °C, sendo os mesmos mantidos na temperatura por 2 horas. O resfriamento foi realizado de forma natural, dentro do próprio forno.

A curva de queima foi determinada com o objetivo de proporcionar um aquecimento lento e facilitar a combustão da matéria orgânica de forma mais uniforme, reduzindo a possibilidade de deformação nas peças.

b) Sinterização na Cerâmica São Gerônimo

Os corpos de prova conformados por prensagem das composições 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 foram enviados ao forno da Cerâmica São Gerônimo para a sinterização por 30 horas a 1050°C, temperatura utilizada na empresa para o processo sinterização dos tijolos vazados. O mesmo procedimento foi adotado para os corpos de prova conformados por extrusão das amostras 4 e 5.

Os corpos de prova conformados por prensagem e extrusão e sinterizados na Cerâmica São Gerônimo foram caracterizados com ensaios de: perda ao fogo, retração linear, densidade aparente, absorção de água, porosidade aparente, tensão de ruptura a flexão.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS

Os corpos-de-prova sinterizados foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais.

3.4.1 Retração linear (RL)

Após a sinterização, foi determinada a retração linear dos corpos de prova. Para isso o comprimento dos corpos de prova foram medidos com paquímetro antes e após a queima e a retração linear foi calculada a partir da equação 3.4:

$$RL (\%) = \frac{L_c - L_s}{L_c} \times 100 \quad (3.4)$$

Em que: RL = Retração linear de queima (%);

L_c = Comprimento do corpo de prova antes da queima (mm);

L_s = Comprimento do corpo de prova depois da queima (mm).

3.4.2 Densidade aparente

A densidade aparente (D_a) das amostras sinterizadas foi determinada pelo método de Arquimedes. O procedimento consistiu em deixar por 24 horas os corpos de prova sinterizados imersos em água destilada e após esse período foram medidos os pesos imersos e úmidos. Para a obtenção do peso seco, os corpos de prova foram secados na estufa por 24 horas a temperatura de 105°C.

A densidade é calculada de acordo com a equação 3.5.

$$Da = \frac{P_s}{(P_u - P_i)} \rho_L \quad (3.5)$$

Em que: D_a = Densidade aparente (g);

P_s = Peso seco (g);

P_u = Peso úmido (g);

P_i = Peso imerso (g);

ρ = Densidade da água.

3.4.3 Absorção de água (AA)

A absorção de água do material cerâmico sinterizado é um parâmetro utilizado para medir a porcentagem de água absorvida pelo corpo de prova conforme a NBR 6220/11 (ABNT, 2011).

Para isso, os corpos-de-prova ficaram imersos em água destilada durante 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram retirados e o excesso de água superficial foi removido com pano úmido e em seguida pesados em balança eletrônica da marca Shimadzu, modelo AX200. Os valores de absorção de água foram calculados de acordo com a equação 3.6.

$$AA (\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (3.6)$$

Em que: AA = Absorção da água (%);

P_s = Peso seco (g);

P_u = Peso úmido (g).

Segundo a NBR 15270-1 os valores referenciais de absorção de água para blocos cerâmicos de vedação são de no mínimo 8 % e máximo 22 %.

3.4.4 Porosidade Aparente (PA)

Porosidade aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. A porosidade do material interfere diretamente no percentual de absorção de água, pois a quantidade elevada desses poros compromete a qualidade do produto cerâmico, indicando, por exemplo, que o corpo cerâmico não sofreu uma queima ideal.

A porosidade aparente dos corpos de prova queimados foi determinada de acordo com a norma NBR 6220/2011 (ABNT, 2011) e calculada conforme a equação 3.7.

$$\% PA = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \quad (3.7)$$

Em que: PA = Porosidade Aparente(%);

P_s = Peso seco (g);

P_u = Peso úmido (g);

P_i = Peso imerso (g).

3.4.5 Tensão de ruptura a flexão (TRF)

A tensão de ruptura à flexão refere-se à resistência do material a flexão simples pelo método dos três pontos, segundo a norma NBR ISSO 5014/12 (ABNT, 2012). Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios mecânicos da marca Shimadzu modelo AG-I 10 kN. O ensaio foi realizado utilizando velocidade de aplicação de carga de 1,27 mm/min. Os ensaios para a determinação da tensão de ruptura a flexão foram realizados com cinco corpos de prova de cada temperatura de sinterização. A determinação de ruptura à flexão é dada pela equação 3.8.

$$TRF (Kgf/cm^2) = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.8)$$

Em que: TRF = Tensão de ruptura à flexão (Kgf/cm²);

P = Carga atingida no momento de ruptura (Kgf);

L = Distancia entre os apoios do corpo de prova (cm);

b = Largura do corpo de prova (cm);

h = Altura do corpo de prova (cm)

3.4.6 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise microestrutural, os corpos de prova foram lixados e polidos de acordo com os procedimentos usuais de preparação de superfícies. O método consiste em lixar com a utilização de água corrente a superfície de análise da amostra com diferentes granulometrias de lixas, iniciando pela lixa 220, passando depois para as lixas de nºs 320, 400 e 600. Após as amostras serem lixadas, foram polidas com alumina, lavadas em banho de ultrassom por 30

minutos. Em seguida secas em estufa por 24 horas e finalmente foram recobertas com uma fina camada de ouro. As micrografias para realização de estudos morfológicos e microestruturais das amostras foram obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo: SSX-550 com EDS acoplado.

3.4.7 Análise por difração de raios X

Para a análise das fases formadas após a sinterização, foi feita a difração de raios X utilizando o difratômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-6000, com radiação $K\alpha(\text{Cu}) = 1,54060 \text{ \AA}$, operando com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. A velocidade do goniômetro utilizada foi de 2 graus/minuto, variando 2θ de 5° a 90° .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

4.1.1 Limites de Atterberg das argilas da Cerâmica São Gerônimo utilizadas nessa pesquisa

Os limites de Atterberg das argilas utilizadas pela Cerâmica São Gerônimo, aqui denominadas de A e B são apresentados na Tabela 4.1.

Após análise dos resultados, segundo critérios utilizados em mecânica dos solos (CAPUTO, 1994), as amostras A e B podem ser classificadas como altamente plásticas ($IP > 15\%$).

Tabela 4.1 – Limite de Atterberg das argilas A e B

Argila	Limite de Liquidez (LL) (%)	Limite de Plasticidade (LP) (%)	Índice de Plasticidade (IP) (%)
A	49,74	26,86	22,88
B	56,84	24,39	32,44

Fonte: A autora.

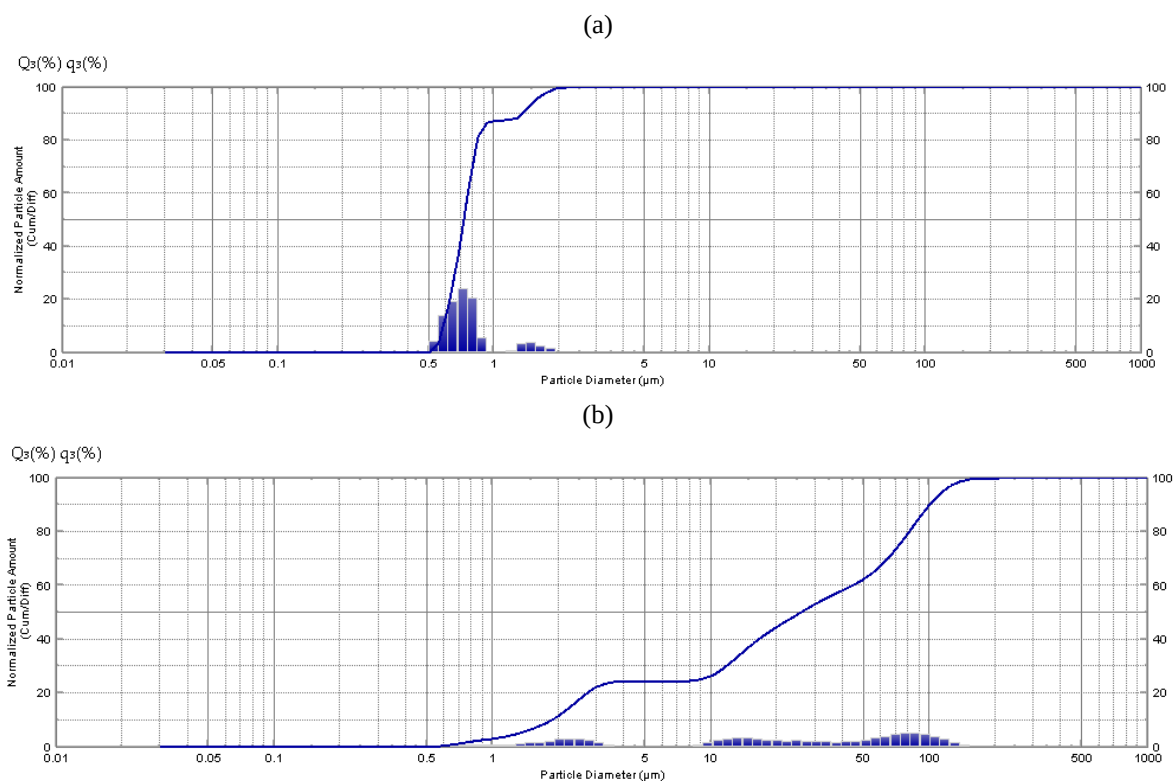
4.1.2 Perda ao fogo do lodo

A calcinação do lodo a 1000°C mostrou redução de 44,52 % em peso, o que demonstra que o lodo possui grande quantidade de matéria orgânica.

4.1.3 Análise granulométrica

As distribuições de tamanho de partículas da mistura das argilas e do lodo estão apresentadas na Figura 4.1 (a) e (b), respectivamente. A argila apresenta um tamanho médio de partícula de D_{50} de $0,72\ \mu\text{m}$ e uma faixa de tamanho de partícula estreita, com D_{10} de $0,57\ \mu\text{m}$ e D_{90} de $1,33\ \mu\text{m}$ e o lodo apresenta uma larga distribuição de tamanho, com D_{10} de $1,83\ \mu\text{m}$ e D_{90} de $99,83\ \mu\text{m}$ e tamanho médio de partícula D_{50} de $25,62\ \mu\text{m}$.

Figura 4.1(a) e 4.1(b) – Distribuição de tamanho de partícula: (a) argila e (b) lodo.



Fonte: A autora

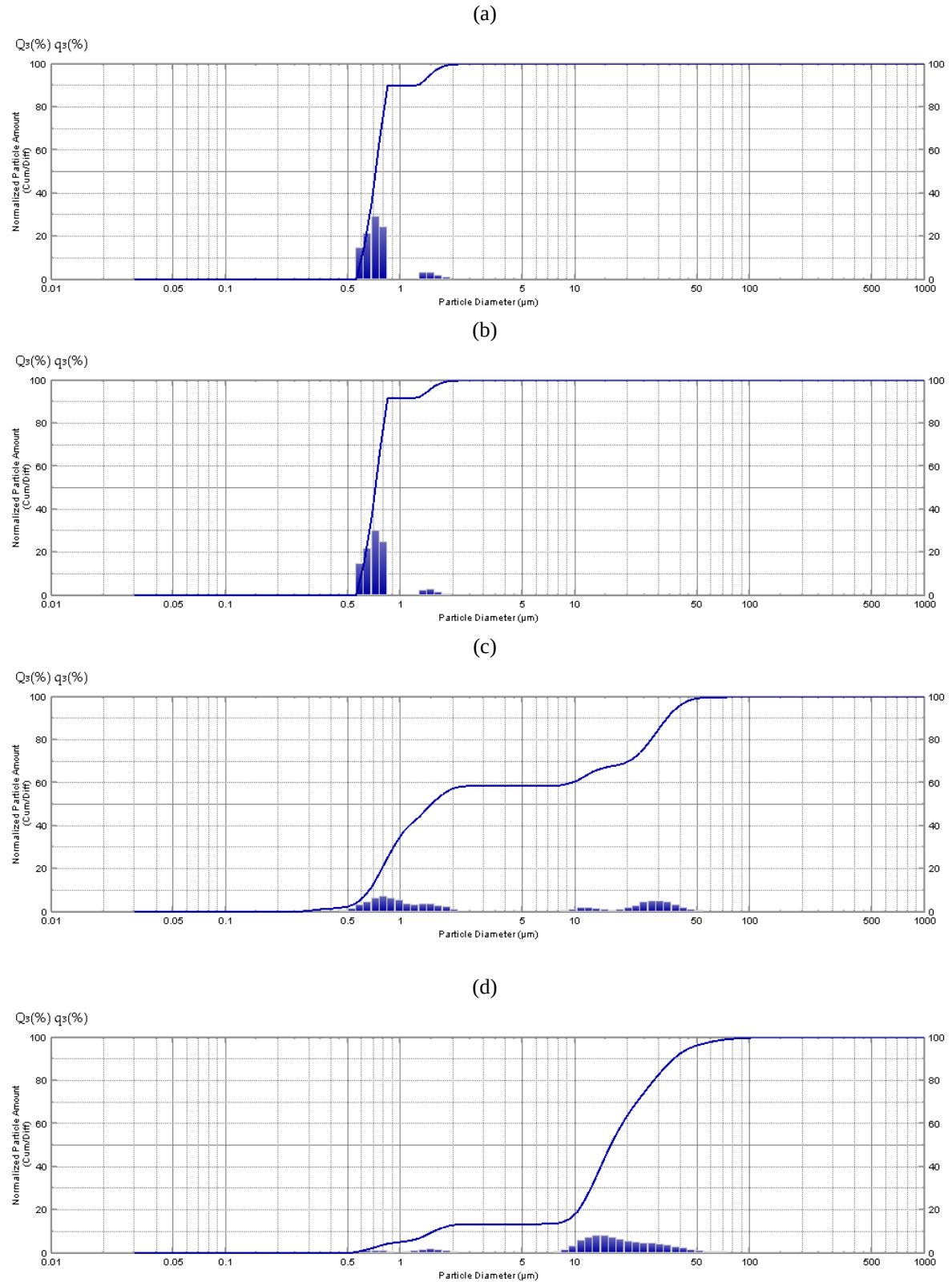
Quando são feitas as composições com a adição do lodo, verifica-se que a distribuição de tamanho de partículas e o tamanho médio de partículas pouco varia até a porcentagem de adição de lodo de 10%. A partir da adição de 15%, o tamanho médio de partícula aumenta e a distribuição torna-se mais larga. A Figura 4.2 apresenta as curvas de distribuição de tamanho das composições feitas com a adição de 5, 10, 15 e 50% de lodo e a Tabela 4.2 mostra os tamanhos de partícula a D_{50} , D_{10} e D_{90} para essas composições.

Tabela 4.2 – Distribuição de tamanho das partículas para as composições 2, 3, 4 e 5.

Composição	D_{50} (μm)	D_{10} (μm)	D_{90} (μm)
2 (5% lodo)	0,72	0,59	0,84
3 (10% lodo)	0.72	0.59	0.84
4 (15% lodo)	1.49	0,65	33,4
7 (50% lodo)	15,9	1,52	36,3

Fonte: A autora

Figura 4.2 – Distribuição de tamanho de partículas das composições: (a) composição 2 (5% lodo); (b) composição 3 (10% lodo); (c) composição 4 (15% lodo) e (d) composição 7 (50% lodo).



Fonte: A autora.

4.1.4 Análise química

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das composições químicas das misturas das argilas usadas para a produção da amostra referência utilizadas pela Cerâmica São Gerônimo e do lodo da ETE Verde.

Tabela 4.3 – Composição química da argila e do lodo.

Composição	Argila %	Lodo %
CaO	—	38,753
SiO ₂	63,708	15,541
Al ₂ O ₃	25,512	15,010
MgO	—	12,657
Fe ₂ O ₃	6,095	10,984
SO ₃	—	4,142
K ₂ O ₃	3,248	0,958
TiO ₂	0,977	1,729
MnO	0,415	—
ZrO ₂	0,186	—
ZnO	—	0,225

Fonte: A autora.

A mistura das argilas apresenta composição química semelhante à maioria das argilas para o uso em cerâmica vermelha, ou seja, rica em sílica (63,7%) e alumina (25,5%) e de natureza não carbonática devido a ausência de CaO. O teor de ferro (6,09%) está dentro dos valores considerado normais para a argila (entre 4 e 8%), conferindo a coloração vermelha após a queima e ainda apresenta quantidades menores de óxidos de K, Mn, Ti e Zr. Em relação ao lodo da ETE, o mesmo é constituído basicamente por CaO, Al₂O₃, SiO₂, MgO que correspondem a cerca de 83,27 %. Destaca-se a alta concentração de CaO, proveniente da cal utilizada para o processo de estabilização do lodo.

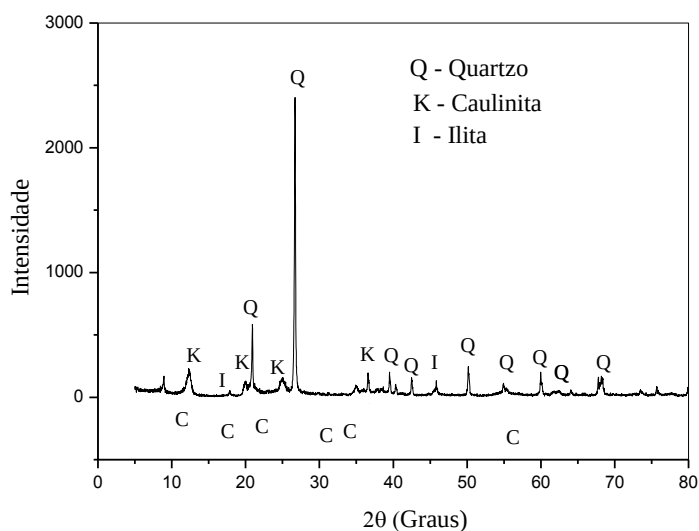
4.1.5 Análise mineralógica

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os difratogramas de raios X das misturas das argilas usadas para a produção da amostra de referência utilizadas pela Cerâmica São Gerônimo e do lodo da ETE Verde.

Na Figura 4.3 que representa o difratograma da mistura das argilas, destacam-se os picos de difração das fases cristalinas do α -quartzo (SiO_2), caulinita e a illita. A omissão da fase cristalina Fe_2O_3 pode indicar que a presença de ferro demonstrada na composição química da argila, esteja em solução com outras fases ou esteja presente em fase amorfa, razão pela qual não foi detectada pela difração de raios-X. Essas fases são características das argilas empregadas na fabricação de cerâmica vermelha, as quais apresentam cor vermelha quando sinterizadas a 950°C .

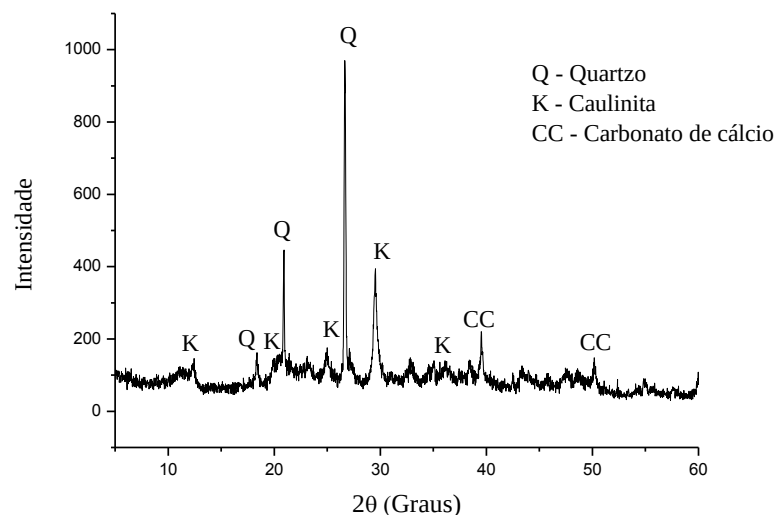
Na difração de raios-X do lodo, apresentada na Figura 4.4, foram identificadas as fases de Quartzo, Carbonato de Cálcio e Caulinita. O carbonato de cálcio é oriundo do processo de higienização e estabilização do lodo e o quartzo e a caulinita provavelmente do tratamento de esgoto.

Figura 4.3 – Difratograma de raios-X da argila.



Fonte: A autora.

Figura 4.4 – Difratograma de raios-X do lodo.



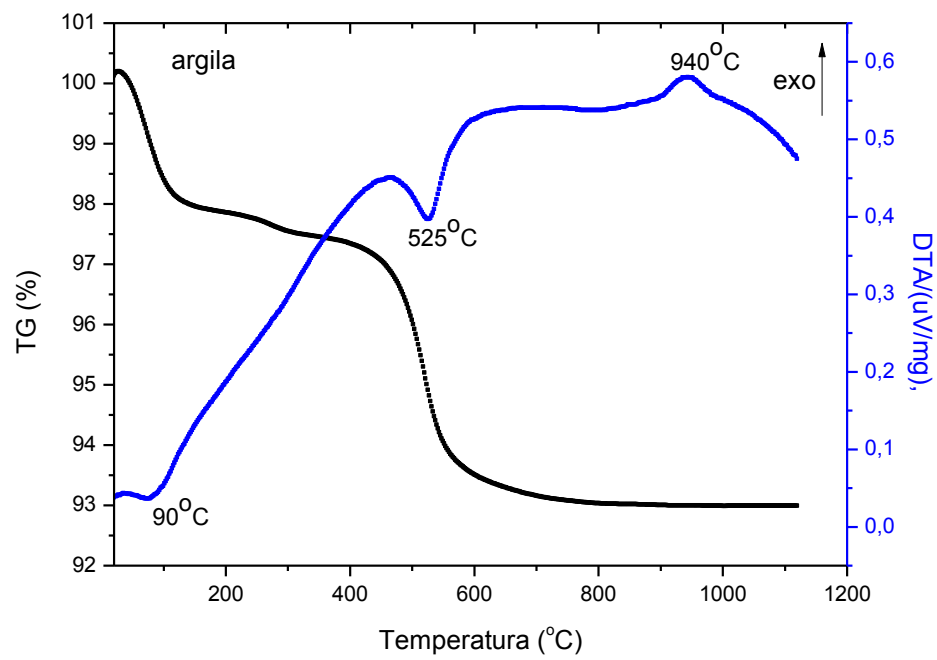
Fonte: A autora.

4.1.6 Análise térmica diferencial e termogravimétrica

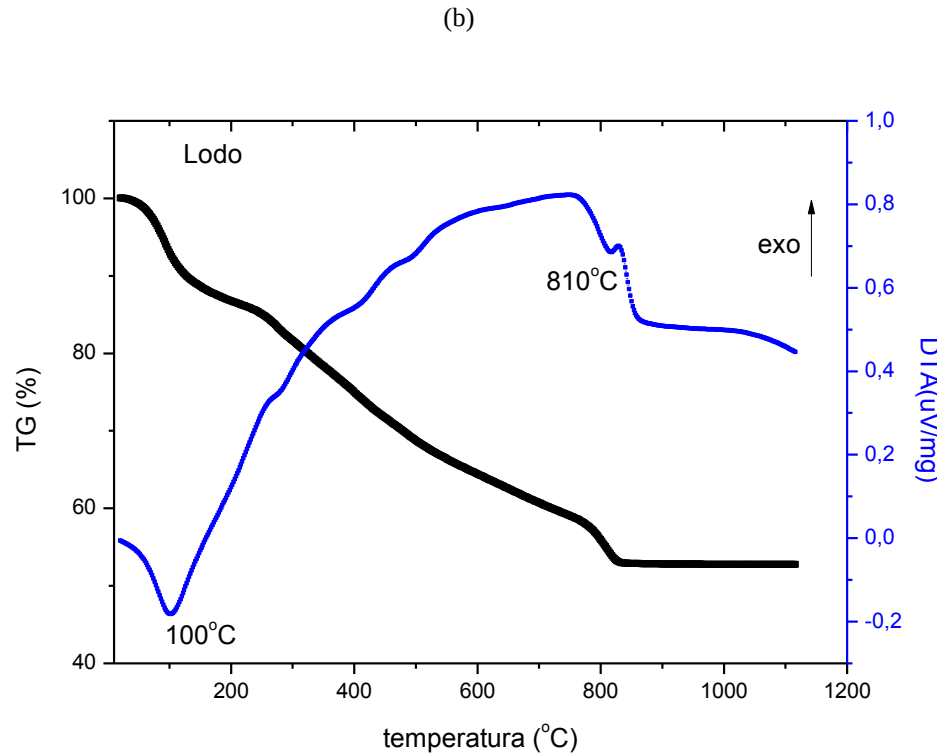
A análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) da argila e do lodo é apresentada nas Figuras 4.5 (a) e (b). Pelas curvas ATD/TG da argila se observam dois picos endotérmicos, os quais são acompanhados de perda de massa, sendo um na temperatura de 90°C, característico da perda de água livre e adsorvida e o outro a 525°C, característico da perda de hidroxilas, referente à desidroxilação da caulinita. A TG mostra uma perda de massa em torno de 2%, correspondente à perda de água livre e outra perda de massa, entre 100 e 600 °C de aproximadamente 5%, relativa à perda de hidroxilas. Na temperatura de 940°C há um pico exotérmico, provavelmente relacionado à nucleação da mulita.

Na análise térmica ATD/TG do lodo observa-se também dois picos endotérmicos, acompanhados de perda de massa. O primeiro pico apresenta-se na temperatura de 100°C e é provavelmente referente à perda de água adsorvida fisicamente. O segundo pico endotérmico encontra-se a 810°C e pode ser atribuído a decomposição do carbonato de cálcio presente no lodo, conforme a difração de raios-X apresentada na Figura 4.5 (b). Observa-se também uma perda de massa em quase toda faixa de temperatura que vai de 100°C até aproximadamente 810°C, que é provavelmente a perda de materiais orgânicos presentes no lodo, observado no resultado de perda ao fogo.

Figura 4.5(a) e (b) – Análise térmica diferencial e termogravimétrica: (a) mistura de argilas e (b) lodo



Fonte: A autora.

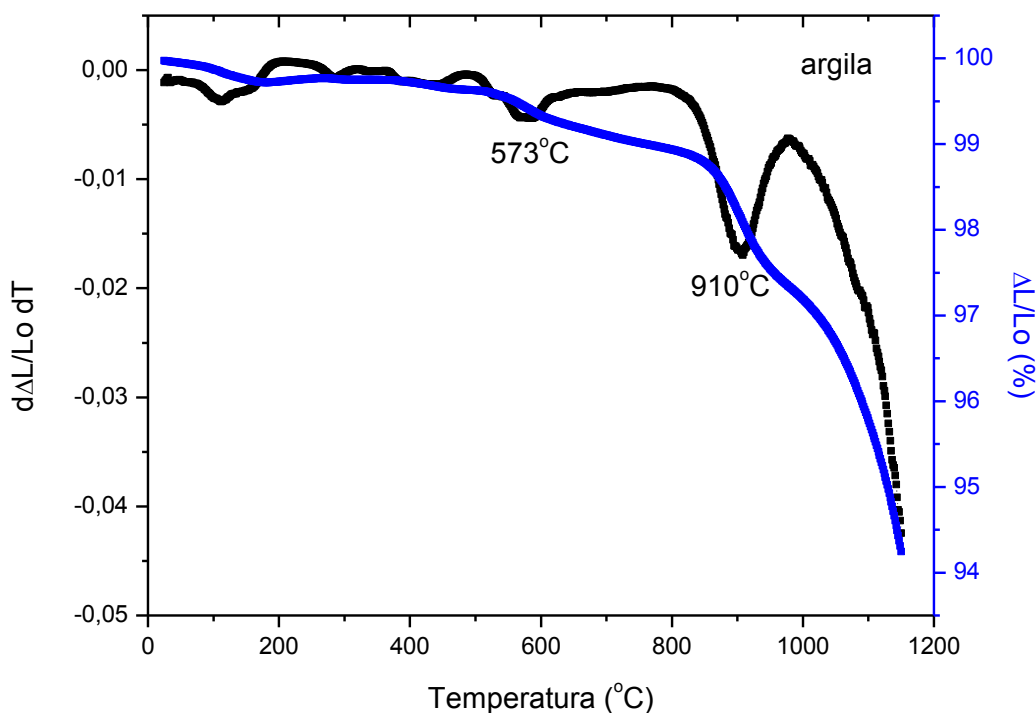


Fonte: A autora.

4.1.7 Análise dilatométrica

A Figura 4.6 apresenta a curva de retração e taxa de retração da mistura de argilas utilizadas nesse trabalho. Observa-se que ocorre uma variação na curva de retração e na taxa de retração a 573°C devido à transformação polimórfica do quartzo α para quartzo β . A partir de aproximadamente 900°C inicia-se um o processo de retração mais intenso, onde ocorre a mudança de inclinação da curva dilatométrica, iniciando a formação da fase líquida. A partir desta temperatura, nota-se que a retração é bastante intensa, o que pode ser atribuído à difusão volumétrica, que é a responsável pela retração e densificação, ao lado da formação de fase líquida. O líquido proveniente desta região escoa para os interstícios entre as partículas mais refratárias, que não se fundiram, e por capilaridade, provoca a aproximação dessas partículas, o que resulta em uma retração bastante significativa (MORAIS, 2007).

Figura 4.6 – Retração linear e taxa de retração da mistura de argilas.



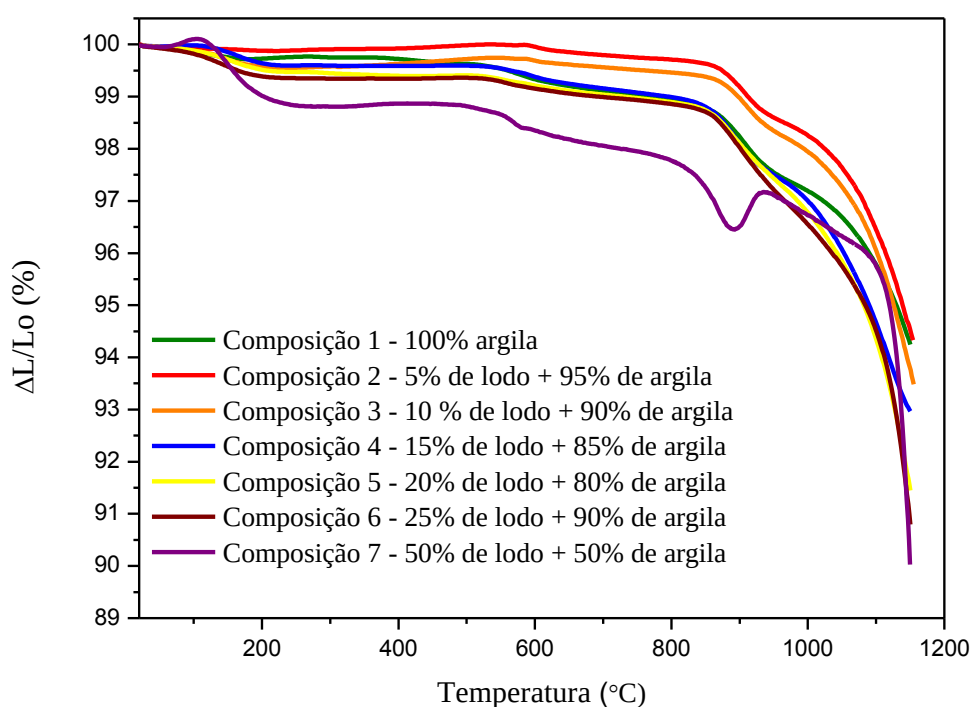
Fonte: A autora

A Figura 4.7 mostra a curva de retração linear de todas as composições estudadas. Observa-se que a adição de lodo, em até 25% em massa, não afeta de maneira significativa o processo de sinterização do material, uma vez que a temperatura na qual se inicia a grande

retração (ou densificação) é pouco alterada. O que pode ser observado é que com maiores quantidades de lodo (acima de 20%), a retração dos corpos-de-prova é maior.

Para a composição 7, que tem 50% de lodo, pode ser observado um pico na curva de retração linear, o qual provavelmente está associado a decomposição do carbonato de cálcio, que ocorre nessa faixa de temperatura (entre 800 e 900°C). Nessa decomposição ocorre a liberação de gás carbônico CO₂, que pode ter causado a expansão do corpo de prova.

Figura 4.7 – Curva de retração linear de todas as composições estudadas.



Fonte: A autora.

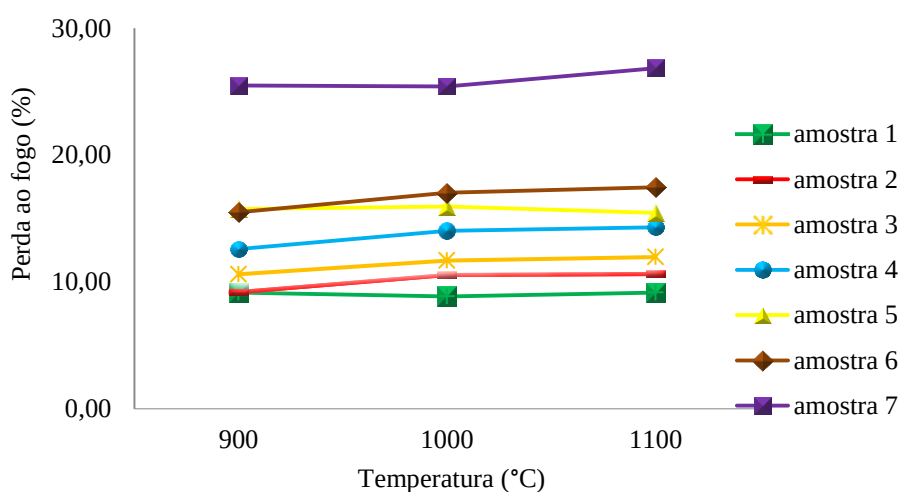
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRENSADOS E SINTERIZADOS EM FORNO MUFLA

4.2.1 Perda ao fogo

Os valores de perda ao fogo das composições sinterizadas a 900, 1000 e 1100°C são apresentados na Figura 4.8 e na Tabela 4.4. A perda ao fogo, como esperado, permanece praticamente constante com a temperatura de sinterização. Isso ocorre porque, provavelmente

a 900°C, a mais baixa temperatura de sinterização estudada, toda a perda de massa já aconteceu. Com relação à adição de lodo, esses resultados mostram que, quanto maior a porcentagem de lodo adicionado à massa de argila, devido a sua composição, principalmente formada por matéria orgânica que entra em combustão durante o processo de sinterização, maior é a perda ao fogo do material.

Figura 4.8 – Variação da perda ao fogo com a temperatura para as composições estudadas



Fonte: A autora

Tabela 4.4 – Variação da perda ao fogo com a temperatura para as composições estudadas.

Temperatura de Sinterização (°C)	Perda ao fogo (%)						
	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	9,16	9,19	10,60	12,58	15,76	15,49	25,49
1000	8,86	10,55	11,69	14,04	15,94	17,03	25,43
1100	9,16	10,63	11,97	14,31	15,45	17,45	26,87
Média aprox.	9,06±0,1	10,12±0,8	11,22±6,2	11,42±0,7	15,71±0,2	16,65±1,0	25,93±0,8

* C = Composições das amostras

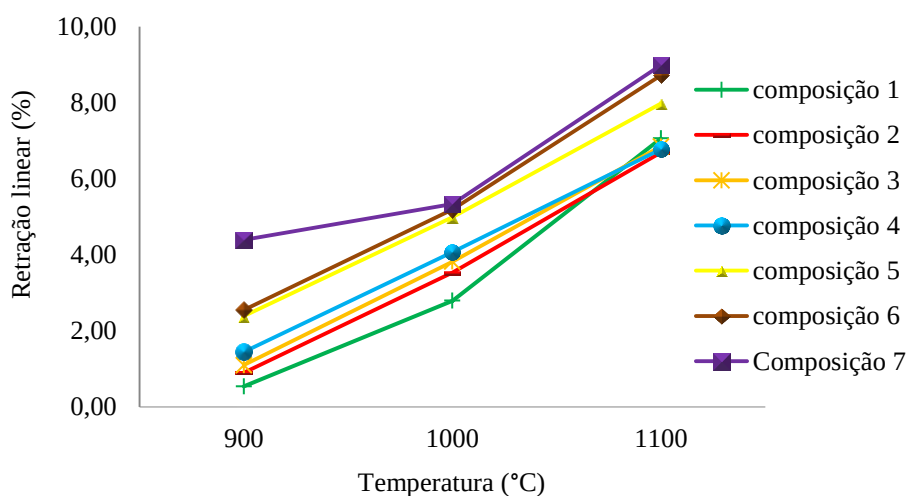
Fonte: A autora.

4.2.2 Retração linear de queima

O gráfico da Figura 4.9 e a Tabela 4.5 apresentam as retrações lineares das composições após as sinterizações a 900°C, 1000°C e 1100°C. O corpo de prova de referência (composição 11) apresenta retração linear de 0,5% em 900°C e 7,05% em 1100°C.

Observa-se que a retração linear aumenta com o aumento da temperatura para todas as composições, devido ao aumento do grau de densificação da massa. Além disso, para a temperatura de sinterização de 1100°C, não houve variação significativa de retração linear para as composições com até 15% de adição de lodo (composição 4). Nas composições 5, 6 e 7 com quantidades maiores de lodo, a retração linear foi maior, em torno de 9% para a composição 7.

Figura 4.9 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições estudadas.



Fonte: A autora.

Tabela 4.5 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições estudadas

Temperatura de Sinterização (°C)	Retração linear (%)						
	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	0,54	0,90	1,10	1,45	2,39	2,55	4,39
1000	2,79	3,53	3,82	4,07	4,99	5,19	5,33
1100	7,06	6,69	6,85	6,77	7,98	8,72	8,99
Média aprox.	3,46±3,3	3,70±2,8	3,92±2,8	4,09±2,6	5,12±2,7	5,48±3,0	6,23±2,4

* C = Composições das amostras

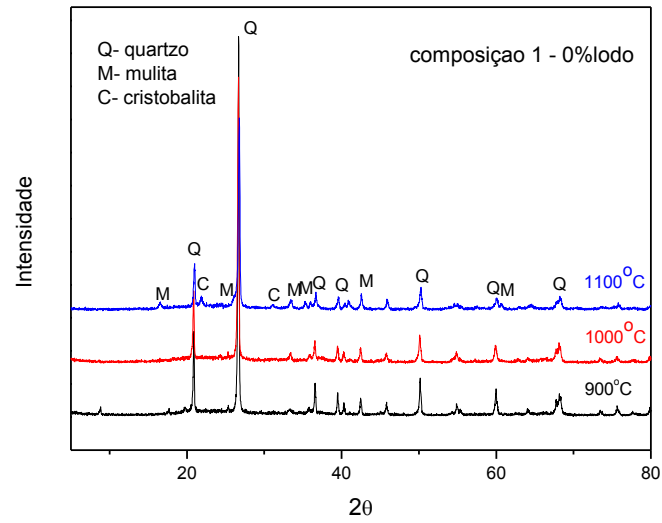
Fonte: A autora.

4.2.3 Análise mineralógica

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam a difração de raios X das composições de 1, 3 e 7 sinterizadas nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C, respectivamente. Observa-se pelas Figuras 4.10 e 4.11 que, a 900°C e 1000°C, há a presença predominantemente de quartzo e pequenos picos de mulita. A 1100°C, verifica-se a presença do quartzo, da mulita e da cristobalita.

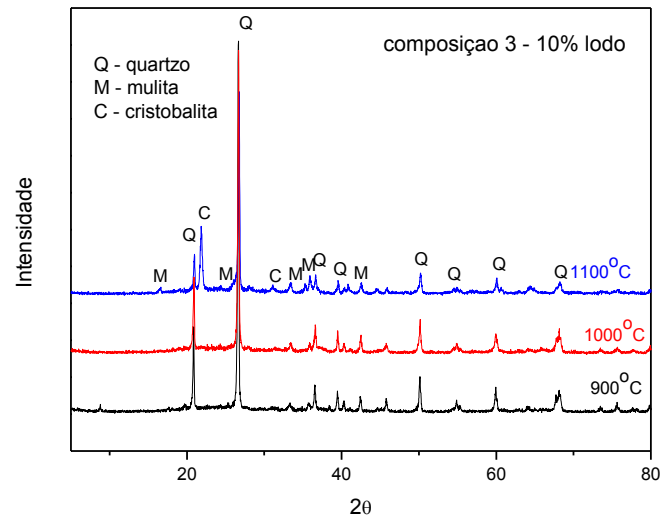
Para a composição 7, observa-se que com o aumento da temperatura de sinterização, os picos da fase anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) se tornam mais evidentes, indicando uma maior cristalização dessa fase. É possível observar também, pequenos picos referentes a fase wolastonita (CaSiO_3).

Figura 4.10 – Difratoograma de raios X da composição 1 sinterizada a 900°C, 1000°C e 1100°C.



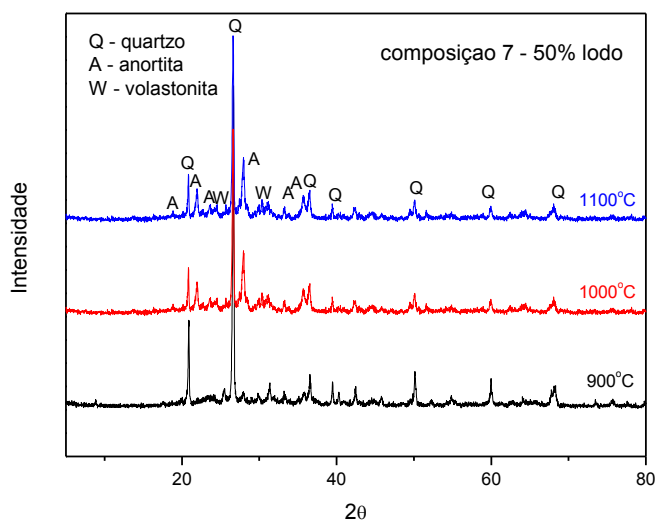
Fonte: A autora.

Figura 4.11 – Difratoograma de raios X da composição 3 sinterizada 900°C, 1000°C e 1100°C.



Fonte: A autora.

Figura 4.12 -- Difratoograma de raios X da composição 7 sinterizada a 900°C, 1000°C e 1100°C



Fonte: A autora.

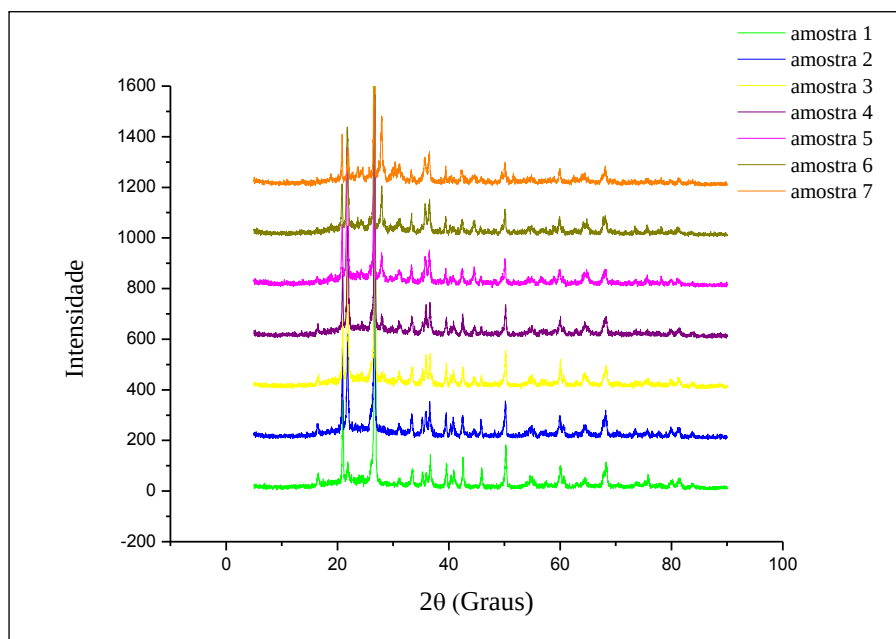
Para um melhor entendimento da evolução das fases em função da quantidade de lodo adicionada, é apresentada a Figura 4.13, a qual mostra as fases formadas para todas as composições estudadas, sinterizadas a 1100°C.

Observa-se que, com o aumento da quantidade de lodo, as fases anortita e volastonita se formam, enquanto que a fase mulita diminui. Para visualizar essas mudanças, a Figura 4.14 apresenta uma região da difração de raios X com 2θ variando de 15 a 35 graus.

Pela Figura 4.14 observa-se que com o aumento da adição de lodo na massa cerâmica, ocorre o aparecimento da fase anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e volastonita (CaSiO_3) e a diminuição da fase mulita. A anortita é produto da reação entre o óxido de cálcio (proveniente da decomposição do carbonato de cálcio) com a metacaulinita (resultante da decomposição da caulinita) e o quartzo de granulometria fina. Este comportamento é habitual em materiais com concentração elevada de óxido de cálcio (THOMAS, 2001).

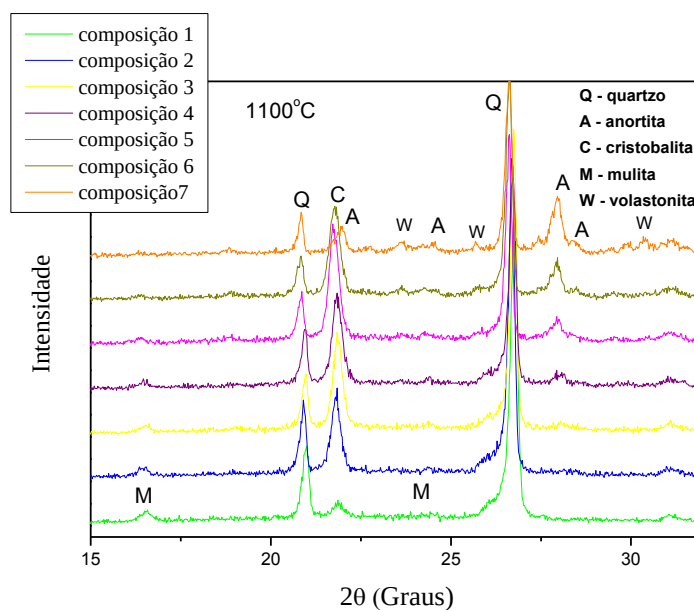
Com a adição de 5% de lodo (composição 2), a fase anortita não pode ser observada. A adição de 25% de lodo (composição 6) provocou um aumento considerável da fase anortita enquanto que o teor de mulita diminuiu. Isso ocorre porque provavelmente a SiO_2 que seria utilizada para a formação da mulita foi sendo consumida para a formação de compostos com cálcio. Para a composição com 50% lodo, a mulita praticamente não aparece.

Figura 4.13 – Difratoograma de Raios-x das amostras sinterizadas a 1100 °C



Fonte: A autora.

Figura 4.14 – Difratoograma de Raios-x das amostras sinterizadas a 1100 °C



Fonte: A autora.

Quando observa-se a análise química das composições estudadas apresentadas na Tabela 4.6, verifica-se a predominância de óxido de silício e óxido de alumínio, com uma quantidade crescente de óxido de cálcio proveniente do lodo adicionado.

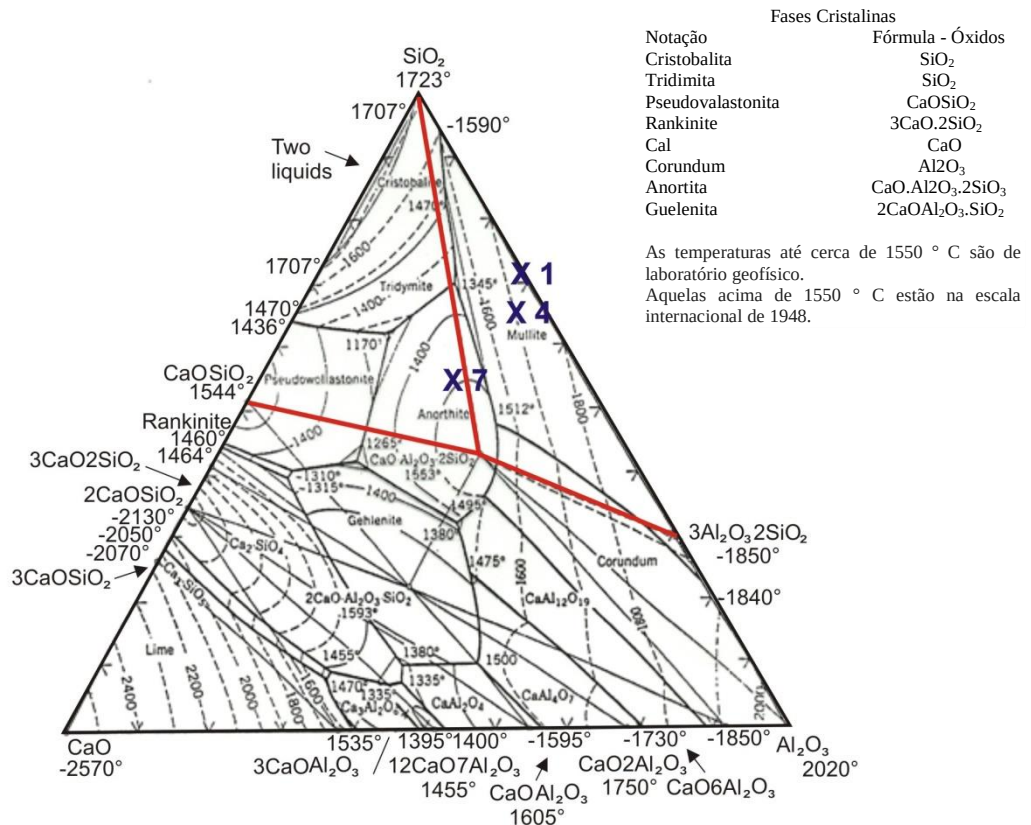
Tabela 4.6 – Composição química das amostras 2,3,4 e 7

Composição química	Composição 2 (5% de lodo)	Composição 3 (10% de lodo)	Composição 4 (15% de lodo)	Composição 7 (50% de lodo)
CaO	1,116	2,138	3,412	14,149
SiO ₂	64,771	64,199	60,209	46,395
Al ₂ O ₃	23,085	22,454	22,763	21,306
MgO	----	----	1,965	6,443
Fe ₂ O ₃	6,527	6,608	6,934	7,871
SO ₃	3,182	----	0,194	----
K ₂ O	3,248	3,209	3,145	2,199
TiO ₂	1,008	1,063	1,077	1,230
MnO	0,271	0,270	0,261	0,238
ZrO ₂	0,041	0,038	0,039	0,049
V ₂ O ₅	----	0,022	----	----
ZnO	----	----	----	0,077
CuO	----	----	----	0,043

Fonte: A autora.

Utilizando a análise química e com o auxílio do diagrama de fases óxido de alumínio - óxido de silício - óxido de cálcio (Figura 4.15) verifica-se que o aumento da quantidade de óxido de cálcio faz com que as composições se desloquem dentro do diagrama, indo do triângulo de compatibilidade da sílica-mulita-anortita para o triângulo de compatibilidade vizinho da sílica-anortita-volastonita, no qual a temperatura inicial de fusão é cerca de 200 °C mais baixa (teoricamente, de 1345 para 1170 °C) e onde, a mulita é substituída pela volastonita.

No diagrama estão representadas as composições 1, 4 e 7. A composição 1 não apresenta cálcio na sua composição química, encontrando-se localizada na lado do triângulo SiO₂ -Al₂O₃ e tendo como fases formadas a mulita e sílica, que encontra-se nesse caso, na forma de quartzo e cristobalita. A composição 4 encontra-se dentro do triângulo de compatibilidade da mulita-sílica-anortita, sendo essas as principais fases detectadas na difração de raios X. Já a composição 7 está localizada no triângulo de compatibilidade da anortita-sílica-volastonita, sendo que pela difração de raios X, observa-se a presença das fases da sílica (na forma polimórfica do quartzo), anortita e picos menos intensos de volastonita.

Figura 4.15 – Diagrama de fases do sistema SiO₂-Al₂O₃-CaO

Fonte: E.M. Levin, C.R. Robbins, H. F. McMurdie, "Phase Diagrams for Ceramists", The Am. Ceram. Soc., Columbus, Ohio (1974) Figs. 132, 2493.

Considerando o sistema real, onde estão presentes outros componentes minoritários, os efeitos discutidos se mantêm, mas ocorrem em temperaturas sempre mais baixas (SILVA, 2005).

A presença da anortita e da volastonita indica que o óxido de cálcio não permaneceu livre, portanto, passível de hidratação, mas reagiu, consumindo a fase amorfa metaculinita e formando fases cristalinas cálcicas.

4.2.4 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente.

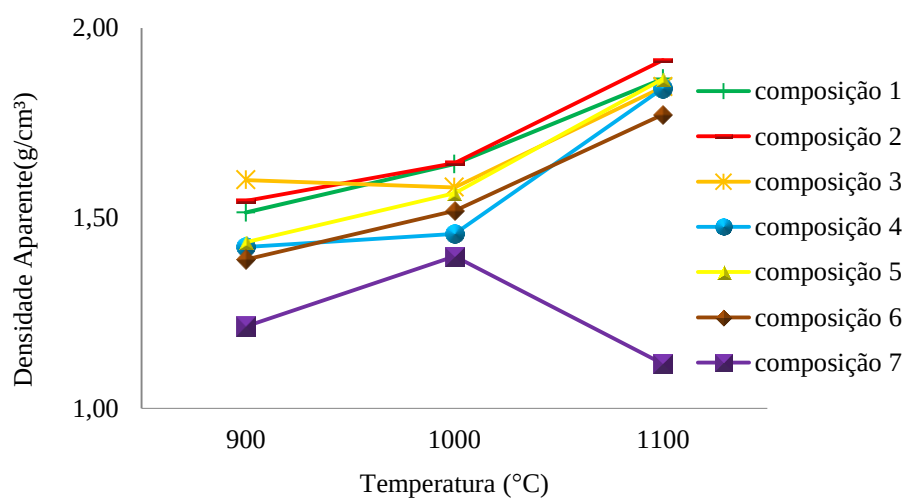
A absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) em função da temperatura de sinterização das composições estudadas são apresentadas nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, e Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, respectivamente. Essas propriedades estão associadas ao tipo de microestrutura formada no corpo sinterizado. Conforme mostram as Figuras, pode-se observar que com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da absorção de água e da porosidade aparente e um aumento na densidade aparente para as

composições 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Esse fato está associado a maior densificação da massa cerâmica com o aumento da temperatura.

Com relação à quantidade de lodo adicionada, observa-se que os valores de AA, PA e DA variaram relativamente pouco com a adição de até 25% de lodo. Para essas composições, na temperatura de sinterização de 1100°C, a absorção de água ficou em torno de 16,6%.

A amostra 7, com 50% de adição de lodo, apresentou uma absorção de água nas temperaturas de sinterização estudadas entre 38,8% a 46,6%, bem superiores às outras composições. Esse aumento na AA e PA podem ser atribuídos a grande quantidade de matéria orgânica presente no lodo, que ao ser ignizada, deixa espaço entre os grãos que demoram a ser preenchidos pela massa fundida.

Figura 4.16 – Densidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.



Fonte: A autora.

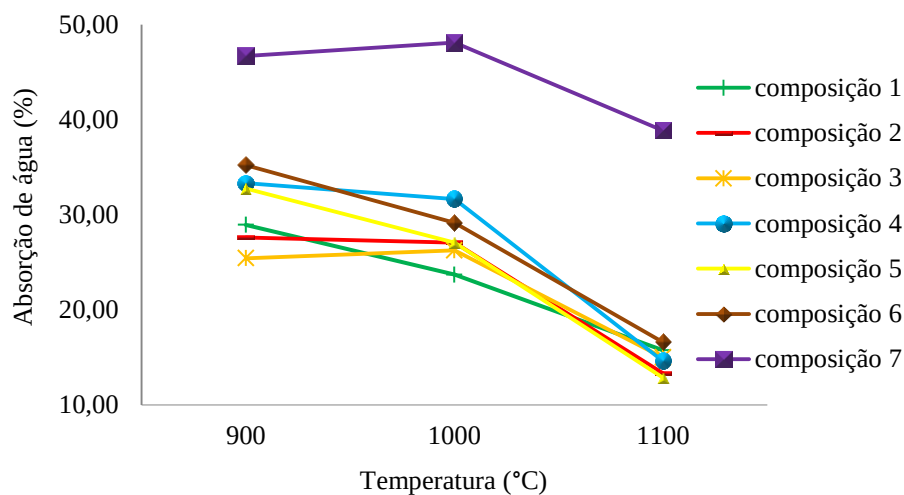
Tabela 4.7 – Densidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.

Temperatura de Sinterização (°C)	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	1,51	1,55	1,60	1,42	1,44	1,39	1,22
1000	1,64	1,64	1,58	1,46	1,57	1,52	1,40
1100	1,87	1,92	1,85	1,84	1,87	1,77	1,12
Média aprox.	1,67±0,1	1,70±0,1	1,67±0,1	1,57±0,2	1,62±0,2	1,56±0,2	1,24±0,1

* C = Composições das amostras

Fonte: A autora.

Figura 4.17 – Absorção de água das composições em relação às temperaturas de sinterização.



Fonte: A autora.

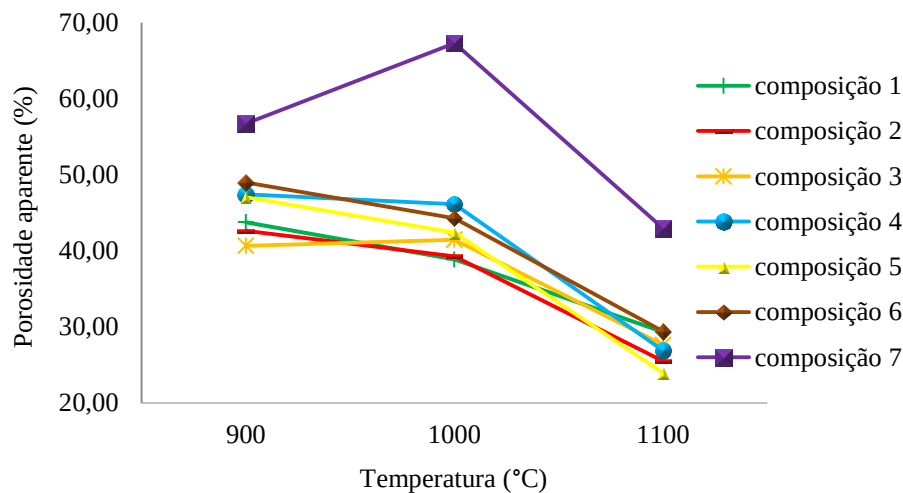
Tabela 4.8 – Absorção de água das composições em relação às temperaturas de sinterização.

Temperatura de Sinterização (°C)	Absorção de água (%)						
	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	28,92	27,61	25,43	33,32	32,76	35,22	46,69
1000	23,68	23,89	26,25	31,64	27,08	29,15	48,10
1100	15,73	13,32	14,98	14,61	12,85	16,60	38,85
Média aprox.	22,77±6,6	21,60±7,4	22,22±6,2	26,52±10,3	24,23±10,2	26,99±9,4	44,54±4,9

* C = Composições das amostras

Fonte: A autora.

Figura 4.18 – Porosidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.



Fonte: A autora.

Tabela 4.9 – Porosidade aparente das composições em relação às temperaturas de sinterização.

Temperatura de Sinterização (°C)	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	43,79	42,63	40,67	47,42	47,06	49,00	56,73
1000	38,88	39,27	41,47	46,14	42,37	44,28	67,30
1100	29,35	25,51	27,65	26,90	23,97	29,42	42,96
Média aprox.	37,34±7,3	35,80±9,0	36,9±7,7	40,15±11,4	37,80±12,2	40,9±10,2	55,66±12,2

* C = Composições das amostras.

Fonte: A autora.

Na sinterização dos corpos de prova a 900°C e 1000°C, para todas as composições, os resultados de absorção de água extrapolaram os valores limites determinados pela normalização que é de 22% para a produção de blocos cerâmicos vazados.

Os corpos de prova com a adição de lodo a massa cerâmica até a porcentagem de 25% sinterizados a temperatura de 1100 °C, segundo a NBR 15270-1 se enquadram dentro dos valores máximos indicados na literatura para a absorção de água.

4.2.5 Tensão de ruptura à flexão

A Figura 4.19 apresenta o módulo de ruptura à flexão dos corpos de prova em função da temperatura de sinterização para todas as composições estudadas. Os valores de resistência à flexão alcançados são apresentados na Tabela 4.10.

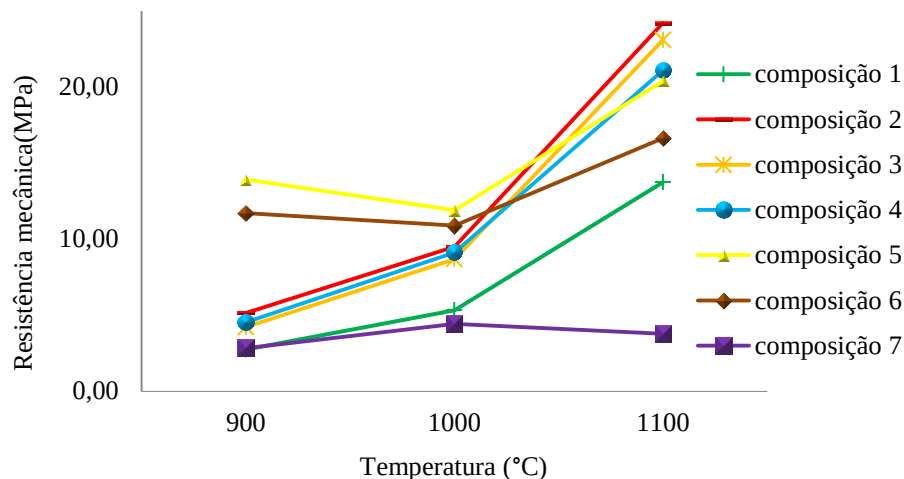
Pode-se observar, como o esperado, que a resistência à flexão aumenta com o aumento da temperatura de sinterização, pois com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da porosidade aberta no material, e um maior grau de densificação, como observado na Figura 4.18.

Outro fator observado é que ocorre um aumento do módulo de ruptura com a adição de até 25% de lodo em relação à composição sem a adição de lodo. Pode-se verificar que o módulo de ruptura da amostra referência (sem adição de lodo) é de 13,7 MPa na temperatura de sinterização de 1100°C enquanto para as composições com a adição de lodo, a resistência aumenta para 24,2 MPa com 5% de lodo, 23,0 MPa com 10% de lodo, 21,1 MPa com 15% de lodo, 20,3 MPa com 20% de lodo e 16,6 MPa com 25% de lodo. Somente a composição 7 (adição de 50% de lodo) apresentou uma diminuição da resistência mecânica.

A resistência à flexão das amostras queimadas depende do balanço entre a absorção de água e da quantidade de certas fases cristalinas de elevada resistência mecânica, (BOSCHI, 1998).

Uma das fases presentes nas composições com lodo é a anortita, que é uma fase que apresenta uma alta resistência mecânica. A fase anortita foi detectada na difração de raios X dessas composições. Assim, a presença dessa fase, juntamente com a fase cristalina da mulita pode ter ocasionado esse aumento de resistência mecânica.

Figura 4.19 – Resistência à flexão das composições em relação às temperaturas de sinterização.



Fonte: A autora.

Tabela 4.10 – Resistência à flexão das composições em relação às temperaturas de sinterização.

Temperatura de Sinterização (°C)	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	2,74	5,16	4,22	4,53	13,92	11,71	2,84
1000	5,33	9,50	8,69	9,13	11,91	10,89	4,44
1100	13,74	24,21	23,09	21,10	20,39	16,63	3,78
Média aprox.	7,27±5,7	12,95±9,9	12,00±9,8	11,58±8,5	15,40±4,43	13,07±3,10	3,68±0,8

* C = Composições das amostras.

Fonte: A autora.

Santos (1993, p.208) realizou ensaios de laboratório em corpos de prova moldados por prensagem e extrusão. Os corpos de prova foram queimados em temperaturas comuns aos fornos industriais para a produção de materiais cerâmicos, sendo estas 950, 1050, 1150 e 1250°C. Após determinada às características no estado cru e posteriormente a sinterização, comparou os valores medidos com os valores limites recomendados, determinados em laboratório. Para que uma massa cerâmica possa ser usada na fabricação de tijolos, determinou valores limites, os quais estão expostos na Tabela 4.11 na página seguinte:

Tabela 4.11 – Adaptação da Tabela de parâmetros para tijolos furados determinados por Santos (1993).

Massa cerâmica (extrudada e prensada)	Para tijolos furados
Tensão de ruptura da massa seca a 110°C (mínima)	25 Kgf/cm ² (2,45 MPa)
Tensão de ruptura da massa sinterizada (mínima)	55 Kgf/cm ² (5,39 MPa)
Absorção de água da massa após a sinterização (máxima)	25,0 %
Cor após a queima	Vermelha

Fonte: Santos (1993)

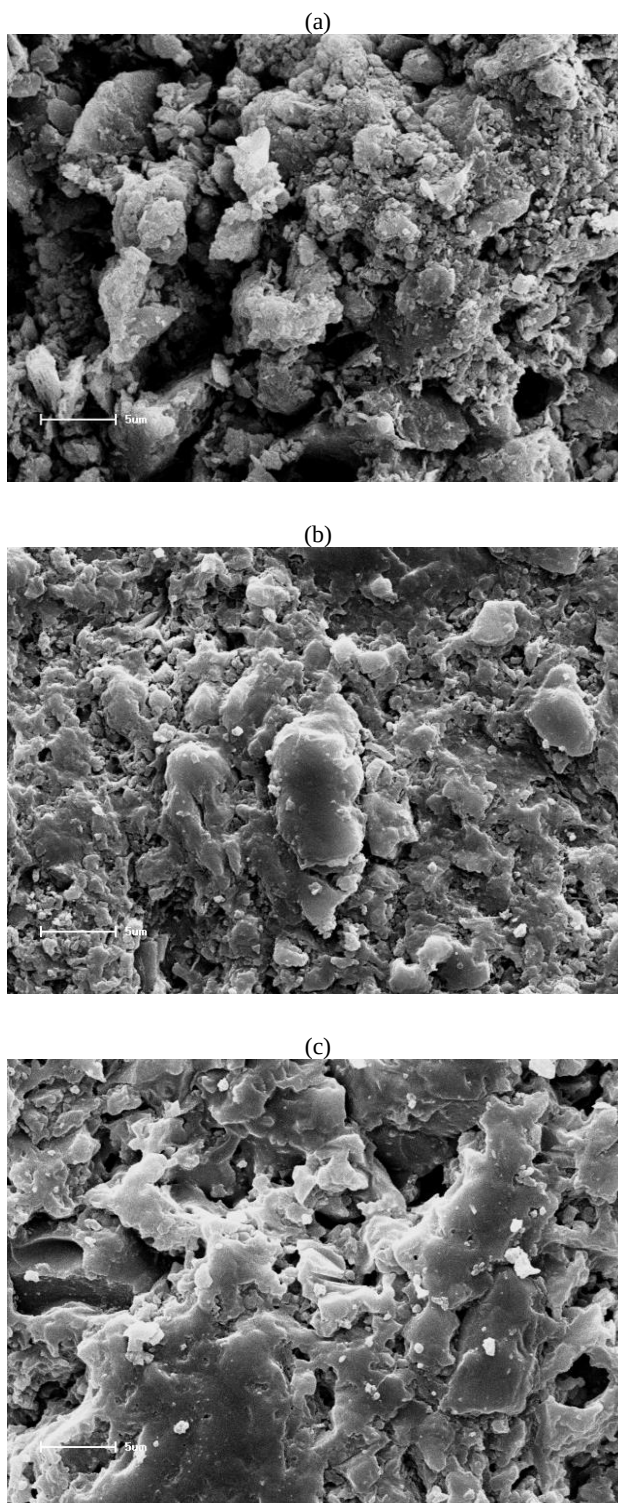
Assim, de acordo Santos (1993), excetuando a composição 7, as resistências mecânicas alcançadas pelas composições sinterizadas a 1100°C encontram-se dentro dos valores necessários para que possam ser utilizadas como blocos.

4.2.6 Análise microestrutural

A Figura 4.20 apresenta as micrografias da composição 1 sinterizada a 900, 1000 e 1100°C. Observa-se que com o aumento da temperatura, ocorre uma mudança na microestrutura, principalmente com relação à diminuição da porosidade. Na temperatura de 1100°C (Figura 4.20 (c)) é possível verificar também uma maior ligação entre as partículas feita pela fase líquida formada durante a sinterização.

Com relação às temperaturas de sinterização, as mesmas considerações podem ser feitas para as microestruturas das outras composições estudadas, excetuando-se a composição 7.

Figuras 4.20 (a), (b) e (c)– Micrografias das amostras da composição 1 sinterizadas nas temperaturas: (a) 900°C, (b) 1000°C e (c) 1100°C.

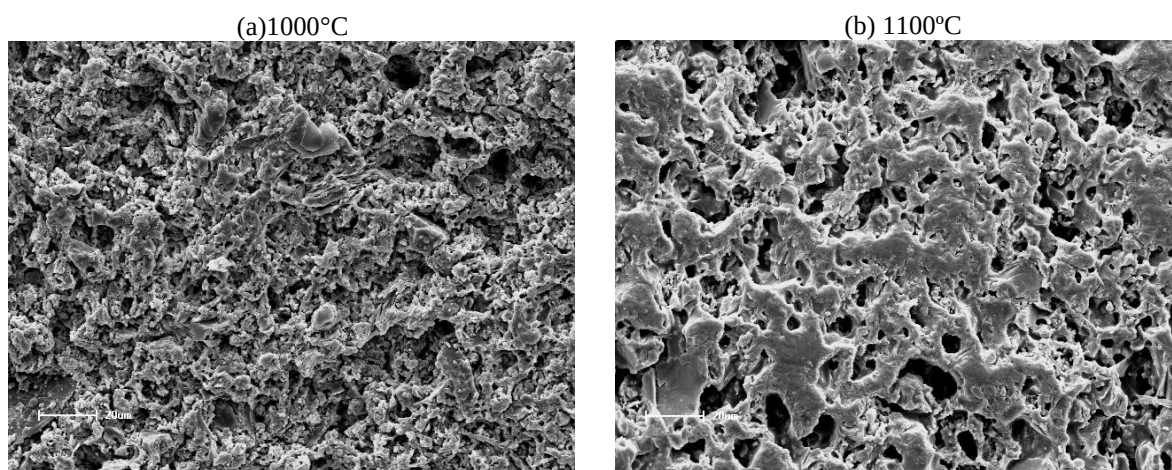


Fonte: A autora.

As Figuras 4.21 (a) e (b) e 4.22 (a) e (b) apresentam a microestrutura da composição 6 (25% em peso de lodo), sinterizada a 1000°C e 1100°C, com diferentes aumentos. Pelas Figuras verifica-se claramente a evolução no fechamento dos poros em consequência da sinterização. A amostra sinterizada a 1000°C apresenta uma superfície mais rugosa, com

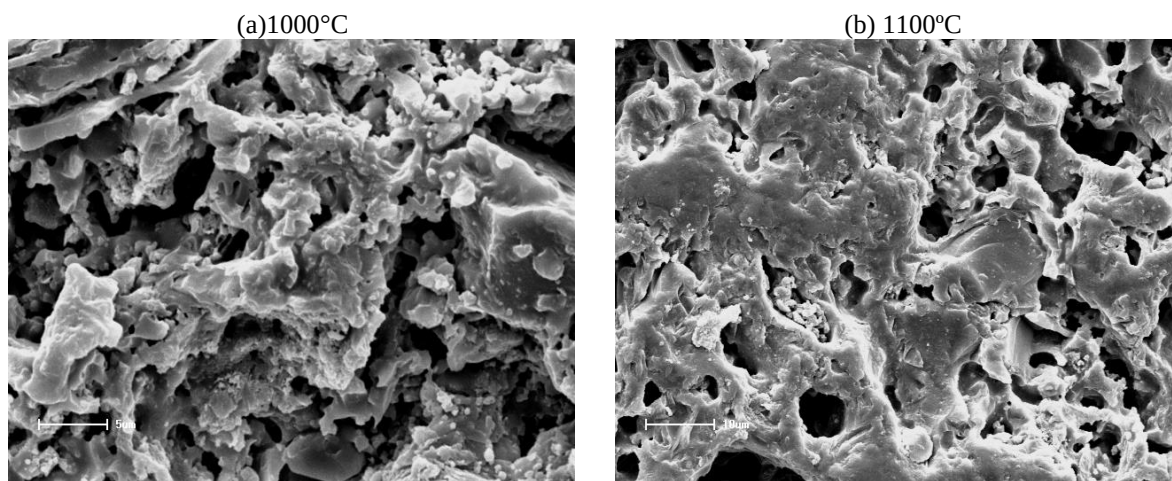
efeito mais acentuado no corpo de prova sinterizado a 1100°C. Essa rugosidade é causada pela formação de fase líquida insuficiente para propiciar uma sinterização eficiente com alisamento da superfície e pouca quantidade de defeitos.

Figuras 4.21(a) e (b) – Micrografia das amostras da composição 6 (25% de lodo) com menor aumento sinterizadas a: (a) 1000°C e (b) 1100°C.



Fonte: A autora.

Figuras 4.22 (a) e (b) – Micrografia das amostras da composição 6 (25% de lodo) com maior aumento sinterizadas a: (a) 1000°C e (b) 1100°C.

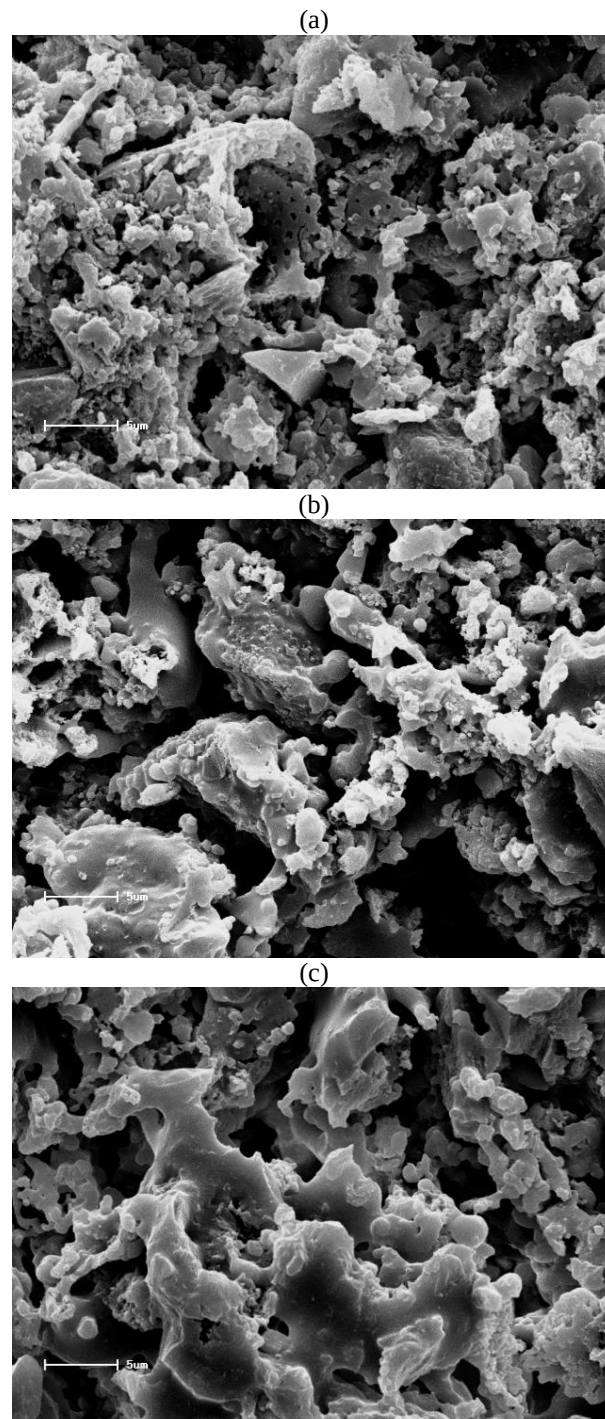


Fonte: A autora.

As micrografias da composição 7 (50% de lodo) para as temperaturas de sinterização de 900, 1000 e 1100°C são mostradas na Figura 4.23. Observa-se que essa composição apresenta uma alta porosidade mesmo para a temperatura de 1100°C. Esse fato pode ser comprovado pelos altos valores de porosidade aparente e absorção de água já apresentados. A 1100°C (Figura 4.23(c)) pode-se observar que houve a formação da fase

líquida, pelas regiões mais lisas na micrografia, mas foi insuficiente para densificar o material. Observa-se também nessas imagens que a microestrutura é mais heterogênea quando comparada com as outras composições.

Figura 4.23 – Micrografias das amostras da composição 7 (50% lodo) sinterizadas nas temperaturas: (a) 900°C; (b) 1000°C e (c) 1100°C.

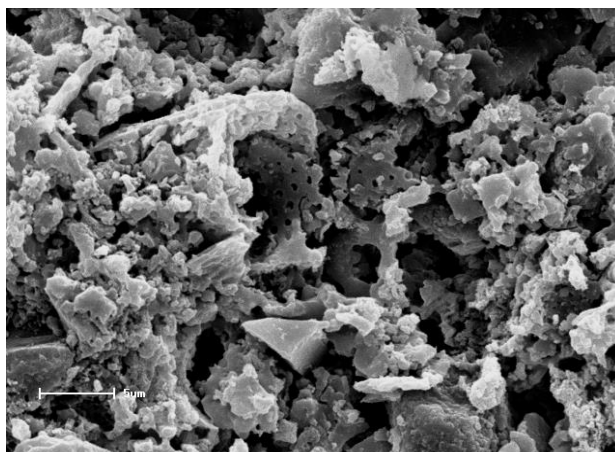


Fonte: A autora.

Estruturas aparentemente de origem microbiológica também foram observadas nas micrografias das amostras sinterizadas a 900°C (Figura 4.24), por ser o lodo de esgoto, uma

mistura de substâncias que geralmente se caracteriza por apresentar minerais, coloides e partículas provenientes de matéria orgânica decomposta.

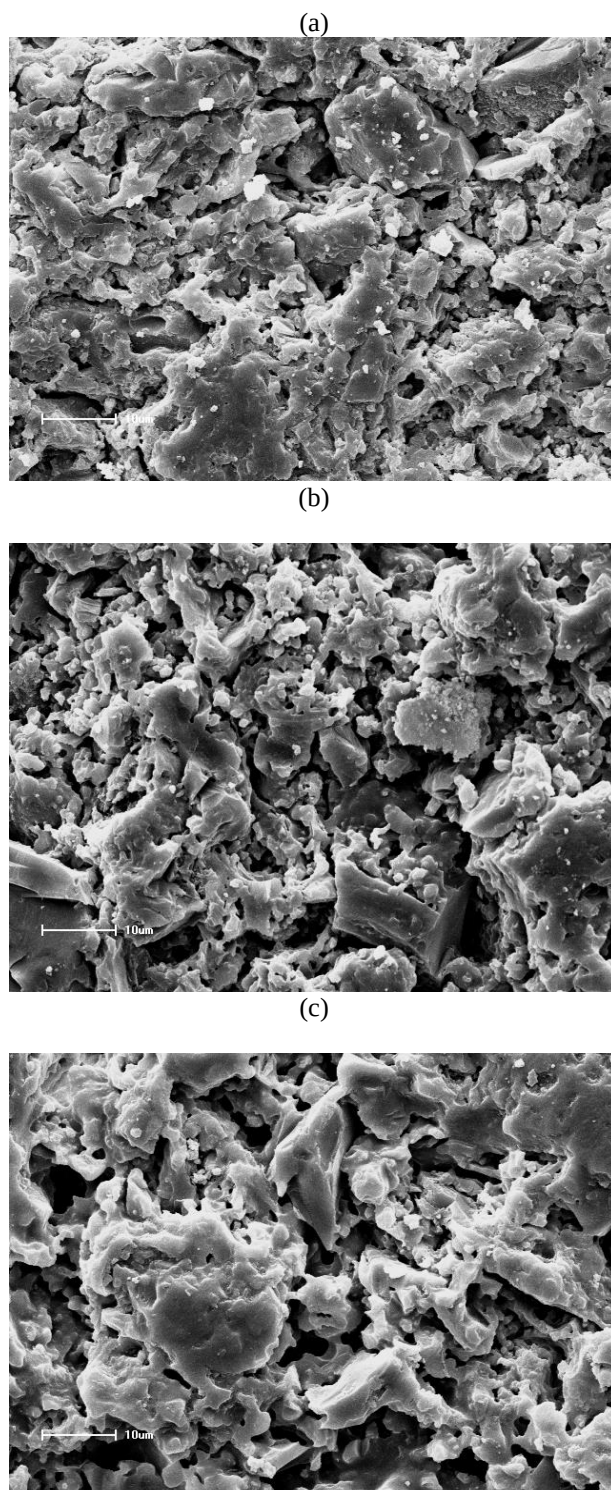
Figura 4.24 – Micrografia da composição 7 sinterizada a 900°C.



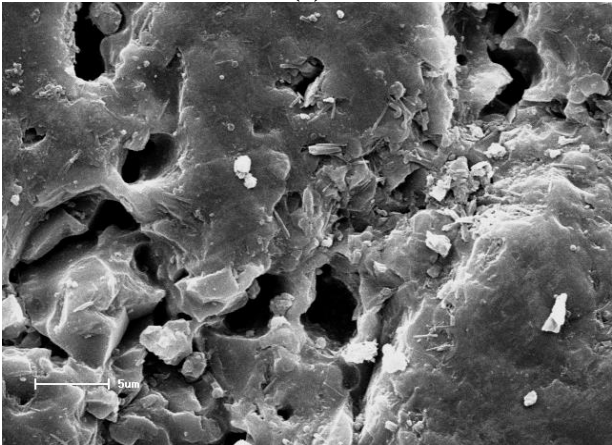
Fonte: A autora.

Para comparação, a Figura 4.25 apresenta as micrografias de todas as composições estudadas sinterizadas a 1100°C. Observa-se que, aparentemente, com o aumento da quantidade de lodo, ocorre um aumento na quantidade de fase líquida formada, pois verifica-se uma maior região com superfície lisa, característica da fase vítrea formada a partir do resfriamento do líquido. Isso pode ser observado principalmente nas composições que apresentam uma quantidade de lodo superior a 10%. A maior formação da fase líquida pode ser atribuída a maior quantidade de cálcio presente na composição, o que provoca a formação de fases cálcicas e o deslocamento da composição para um triângulo de compatibilidade onde a formação da fase líquida se dá em menor temperatura, como já discutido anteriormente. Já quando a quantidade de lodo é muito alta, como no caso da composição 7, que possui 50% lodo na sua formulação, a porosidade verificada é bem maior, apesar da fase líquida formada. Isso pode ser atribuído a alta quantidade de matéria orgânica presente no lodo.

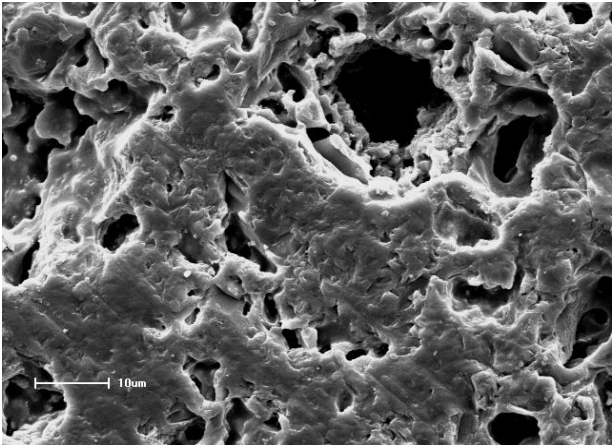
Figura 4.25 – Micrografias de todas as composições estudadas sinterizadas a 1100°C: (a) composição 1; (b) composição 2; (c) composição 3; (d) composição 4; (e) composição 5; (f) composição 6 e (d) composição 7.



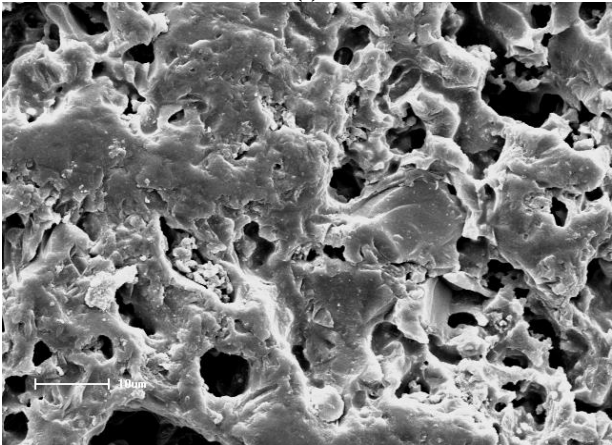
(d)

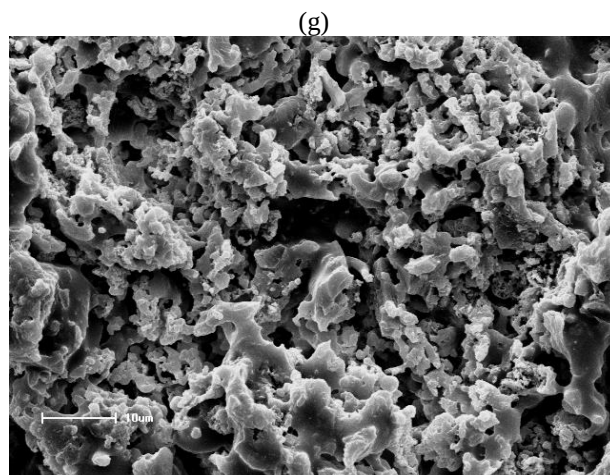


(e)



(f)

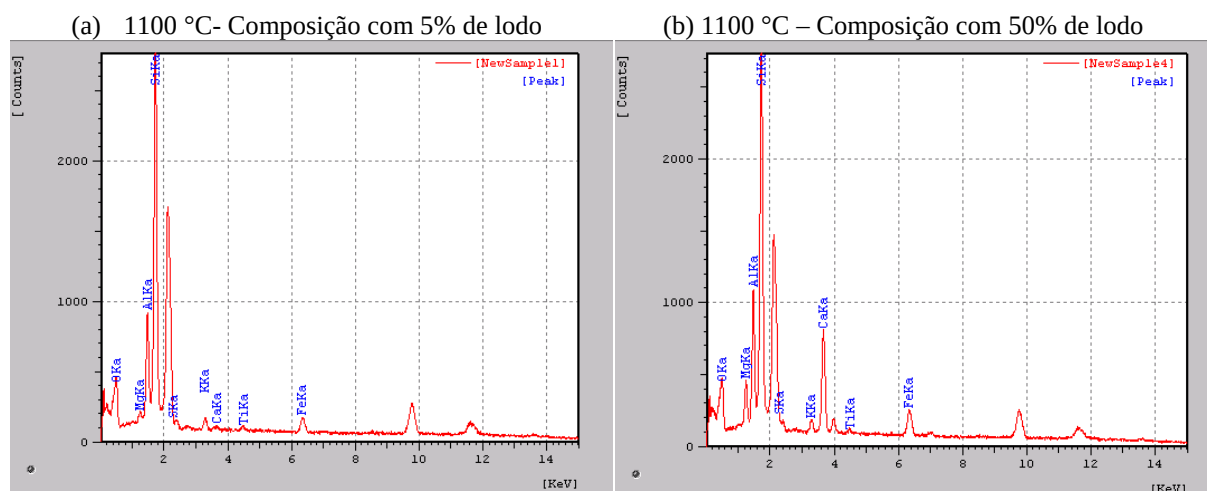




Fonte: A autora.

Como esperado, as análises por EDS realizadas nas composições estudadas mostraram o aumento da quantidade de cálcio com a adição do lodo de ETE. A Figura 4.26 mostra o EDS da composição com 5% de lodo e a composição com 50 % lodo.

Figura 4.26 – Espectros EDS.



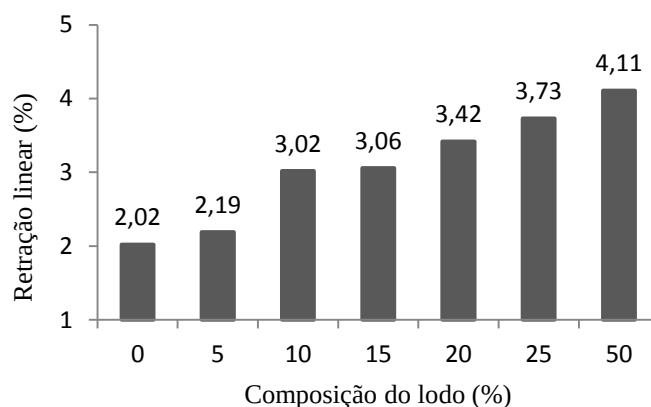
Fonte: A autora.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS NA CERÂMICA SÃO GERÔNIMO DAS AMOSTRAS PRENSADAS E EXTRUDADAS

Santos (1993) recomenda para a fabricação de tijolos furados, valores de retração linear inferior a 6%. A Figura 4.27 apresenta as retrações lineares sofridas pelos corpos de prova sinterizados a 1050°C.

O corpo de prova referência (composição 1) apresentou retração linear de 2,02 % e o corpo de prova da composição 7 apresentou retração linear de 4,11 %, isto é, com o acréscimo de lodo a massa cerâmica, ocorreu o aumento da retração linear conforme demonstrado na Figura 4.27. Mesmo na composição 7 com 50% de acréscimo de lodo a massa cerâmica, a retração linear ficou dentro dos parâmetros recomendado por Santos (1993).

Figura 4.27 – Retração linear das composições sinterizadas a 1050°C no forno da Cerâmica São Gerônimo.



Fonte: A autora.

Quando compara-se esses valores com os das retrações lineares das amostras sinterizados em forno mufla no laboratório (Tabela 4.12), observa-se que as retrações foram menores, quando comparadas com as mesmas amostras sinterizadas a 1000 e 1100°C.

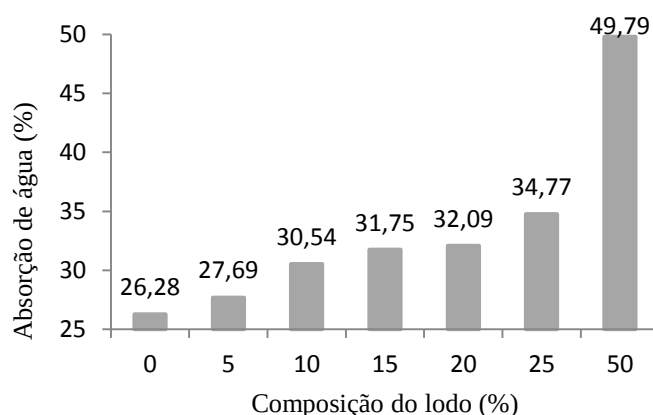
Tabela 4.12 – Variação da retração linear com a temperatura para as composições sinterizadas em forno mufla.

Temperatura de Sinterização (°C)	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	0,54	0,90	0,45	1,45	2,39	2,55	4,39
1000	2,79	3,53	3,82	4,07	5,88	5,19	5,33
1100	7,06	6,69	6,85	6,77	7,98	8,72	8,99
Média aprox.	3,46±3,3	3,70±2,8	3,70±3,20	4,09±2,6	5,41±2,8	5,48±3,1	6,23±2,4

Fonte: A autora.

Os resultados apresentados na Figura 4.28 mostram a absorção de água para composições sinterizadas na Cerâmica São Gerônimo. Observa-se que a absorção de água aumenta com o acréscimo da quantidade de lodo adicionado.

Figura 4.28 – Absorção de água das composições prensadas e sinterizadas a 1050°C no forno da Cerâmica São Gerônimo.



Fonte: A autora.

Comparando esses resultados com os valores encontrados para as amostras sinterizadas no laboratório (Figura 4.13), observa-se que a absorção de água apresenta resultados similares àsquelas sinterizadas a 1000°C. Esses valores apresentam-se superiores ao preconizado pela normalização.

Tabela 4.13 – Variação da absorção de água com a temperatura para as composições sinterizadas em forno mufla.

Temperatura de Sinterização (°C)	*C 1	*C 2	*C 3	*C 4	*C5	*C6	*C7
900	28,92	27,61	25,43	33,32	32,76	35,22	46,69
1000	23,68	23,89	26,25	31,64	27,08	29,15	48,10
1100	15,73	13,32	14,98	14,61	12,85	16,60	38,85
Média aprox.	22,77±6,64	21,60±7,4	22,22±6,2	26,52±10,3	24,23±10,2	26,99±3,1	44,54±4,9

Fonte: A autora.

Santos (1993, p. 208) sugere o valor máximo de absorção de água de até 28%, sendo que a composição com 5% de lodo adicionada a massa de argila atende a esse limite máximo.

Os resultados de absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura á flexão para as amostras extrudadas produzidas com as composições 3 e 4 sinterizadas na Cerâmica São Gerônimo são apresentados na Tabela 4.14. Para comparação, nessa Tabela também são

apresentados os resultados das mesmas composições sinterizadas em forno mufla no laboratório.

Tabela 4.14 – Resultados de absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão para as amostras extrudadas produzidas com as composições 4 e 5.

	Composição 4 (Forno mufla)	Composição 5 (Cerâmica São Gerônimo)	Composição 4 (Forno mufla)	Composição 5 (Cerâmica São Gerônimo)
Densidade aparente (%)	1,60	1,57	1,06	1,55
Absorção de água (%)	19,84	20,88	20,90	22,65
Porosidade aparente (%)	31,73	32,95	33,51	35,15
Tensão de ruptura a flexão (MPa)	11,65	9,11	10,28	7,28

Fonte: A autora

Observa-se que os valores alcançados na sinterização no forno mufla são um pouco diferentes daqueles sinterizados na Cerâmica São Gerônimo. As composições sinterizadas no forno mufla apresentaram valores menores de porosidade aparente e absorção de água e tensões de ruptura maiores que as composições sinterizadas na Cerâmica São Gerônimo, indicando que elas apresentaram uma densificação maior da massa cerâmica. Esses resultados sugerem que, provavelmente a temperatura do forno da Cerâmica São Gerônimo não está atingindo a temperatura de 1050°C.

Sabe-se que no processamento a verde, as diferenças na distribuição granulométrica e no comportamento plástico entre a argila e o resíduo podem acarretar mudanças no processo de conformação dos corpos cerâmicos e eventuais dificuldades de fabricação, além de alterar o produto final obtido. Para essas composições que foram conformadas por extrusão, observou-se que a quantidade de lodo adicionada não dificultou o processo de conformação e as propriedades físicas do produto sinterizado foram satisfatórias. Adições de lodo, principalmente em teores elevados, sempre terão consequências no processamento cerâmico, seja ele na conformação dos corpos a verde ou durante a sinterização.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir:

1. Os resultados evidenciam a grande importância dos ensaios de caracterização dos resíduos e matérias-primas para a produção de blocos cerâmicos, permitindo estimar o comportamento das peças a serem produzidas a partir da adição de resíduos. Indicam também que se deve ter cautela ao recomendar a porcentagem de adição de um resíduo como adequada para produção de materiais cerâmicos, sem conhecer o ciclo de queima a ser utilizado na olaria, já que a comparação com indicações da literatura não leva em consideração que as características de processamento na empresa e no laboratório podem ser distintas. O que ressalta ainda mais a importância da caracterização das matérias-primas para o total entendimento do comportamento de queima e evolução microestrutural da peça produzida.
2. Os corpos de prova com o aumento de adição do lodo em porcentagem sofreram aumento progressivo na retração linear com todas as temperaturas de sinterização em forno mufla e no forno da Cerâmica São Gerônimo.
3. O aumento da quantidade de lodo na massa cerâmica provoca um aumento de absorção de água e porosidade aparentes para as temperaturas de sinterização de até 1050°C.
4. Os corpos de prova da composição 7 (50% de lodo) extrapolaram todos os valores fixados pela normalização.
5. Na sinterização em forno mufla a 1100°C, o lodo pode ser adicionado até 20% à massa cerâmica.
6. O óxido de cálcio, proveniente do lodo reage formando compostos cálcicos o que evite o problema de hidratação do CaO.

Como sugestões para trabalhos futuros:

1. Estudar a incorporação de uma argila com baixa plasticidade, para tentar evitar os efeitos nocivos do excesso de plasticidade;
2. Estudar a composição do lodo higienizado com outro material, diferente da cal, para amenizar a retração linear dos corpos de prova durante a sinterização.

6 REFERÊNCIAS

AISSE, M. M. Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, 192p.

ALBARO, J.L.A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem. Revista Cerâmica Industrial, cidade, p. maio/jun. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6454:** Determinação do Limite de Liquidez, Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457:** Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:** Determinação do Limite de Plasticidade, Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10005:** Lixiviação de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10006:** Solubilização de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15270-1:** Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15270-2:** Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural — Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15270-3:** Componentes cerâmicos. Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural — Métodos de ensaio Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BARBA, A.; BELTRÁN, V.; FEH, C.; GARCIA, J; GOMES, F.; SANZ, V. **Matérias primas para la fabricaión de soportes de baldosas cerâmicas**. 1. ED. Instituto de Tecnologia Cerámica, Casteilón, 1997, 291 p.

BOSCHI , M, L. F. B.; A expansão térmica de materiais cerâmicos – Parte III: Efeitos da Adição de Calcita – **Cerâmica Industrial**, 3, p. 18-23, 1998.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002, 305 p.

BRASIL. Lei Estadual n. 12.493, de 22 de janeiro de 1999. Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, visando controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e adota outras providências. Diário Oficial , Curitiba, 05 fev.1999. p. 9

BRASIL. Lei 12.651/2012. Institui o novo Código Florestal. Brasília, Presidência da República, 2012.

BRASIL. Lei 12.305/2010. Institui Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, Presidência da República, 2010.

BNDS. Cerâmica para revestimentos. Informe Setorial, Rio de Janeiro. n. 15. agos. de 2000. Disponível em: <[http// www.bnds.gov.com.br](http://www.bnds.gov.com.br) >. Acesso em 01 de julho de 2012.

CALLISTER W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução. Sergio Murilo S. Soares. Rio de Janeiro. LTC Editora. 5º edição. 2002.

COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS (COBRAPE). Estudo de Concepção e Projeto de Engenharia para Ampliação do Sistema de Esgotos Sanitários de Ponta Grossa-PR. Curitiba, 1998.

COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS (COBRAPE). Estudo de Concepção e Projeto de Engenharia para Ampliação do Sistema de Esgotos Sanitários de Ponta Grossa-PR. Curitiba, 1998.

CORREIA FILHO. F. L. Projeto Avaliação de Depósitos Minerais para a Construção Civil PI/MA. Teresina: CPRM, 1997. v.1.

FAMEPAR – PMPG – Instituto de Assistência aos Municípios do Estado do Paraná e Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. Plantas planialtimétricas do espaço urbano de Ponta Grossa. Escala 1:2.000, Curitiba, Engefoto, 1995.

GOOGLE EARTH. Disponível em:<<http://www.googleearth.com>> Acesso em: 01/07/2012.

JORDÃO, E.P. e PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n], 2005. 932p.

KOPEZINSKI, I. Mineração x Meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000.

Legislação Ambiental Estadual, disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br>> Acesso em: 14/07/2012.

Legislação Ambiental Federal, disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br>> Acesso em: 14/07/2012.

MACHADO FILHO, J. G. Comunicação pessoal. SANEPAR - Unidade Regional de Ponta Grossa (URPG), Operação de esgoto. Ponta Grossa, maio de 2012.

MÁS, E. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha. 1. ed. Porto Alegre. Ed. Polo Produções Ltda, 2003. 52p.

MENEZES, R. R.; MARQUES, L. N.; SANTANA, L. N. L.; KIMINAMI R. H. G. A., NEVES G. A.; FERREIRA, H. S. Uso de resíduo da produção de alumina eletrofundida na produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, São Paulo, v.56, n. 339, jul. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132010000300006&lang=pt>. Acesso em: 19 jun. 2012.

MORAIS, M. L. V. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento de caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007.164f Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do norte, Natal.

MINEROPAR, Minerais do Paraná S/A., Programa de Levantamento das potencialidades minerais dos municípios: Foz do Iguaçu-PR, Curitiba, Foz do Iguaçu, PR (1990) 83 p.

NORTON, F. H. – Introdução à Tecnologia Cerâmica, São Paulo, Edgar Blucher Ltda, (1973). (APUD DA TESE)

OLIVEIRA, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K., PIZETE, J., CASAGRANDE, M., Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: Características e Influência sobre as Propriedades do Produto Final. *Cerâmica*, n. 10, pp. 57-65, 2000 a

PADILHA, A. F. Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades. 1ed. Hemus. São Paulo: 2007.

PAIXÃO, L. C. C. **Aproveitamento do lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha**. 2005. 129f. (Mestrado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Minas Gerais.

Resoluções CONAMA, disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>> Acesso em: 14/07/2012.

SANTOS, P. Souza, **Ciência e Tecnologia de Argilas**, 3ª Ed., Vol. 1, Edgard Blücher, S. Paulo, SP (1993) 4.

SEDU. Base Cartográfica Digital do Serviço Autônomo Paraná - Cidade. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano (SEDU-PR), 2009.

SILVA, A.G.P.; ALVES JUNIOR, C. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. *Cerâmica*, São Paulo, v.44, n. 290 nov./dec. 1998. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69131998000600004&script=sci_arttext. Acesso em: 04 de fevereiro de 2014.

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

SILVA, V. M. Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água. 2011, 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Autarquia Associada à Universidade de

São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte II: Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v.57, n. 344, oc /dec. 2011. Disponível em:<http://www.scielo.br.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000400003&lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2012.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. DE; SOUZA, N. R. DE; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 323, jul/set. 2006. Disponível em:<http://www.scielo.br.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132006000300016&lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2011.

THOMAS, H., PEER, G., “Mineral raw materials in the brick and tile industry-important parametres in the daily practice of the geoscientist”, Part 2, J. ZI, 12 (2001) 20-26.