



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

Anaxsandra da Costa Lima Duarte

**INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA MASSA CERÂMICA
PARA A FABRICAÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS: UMA ALTERNATIVA
PARA A DISPOSIÇÃO FINAL DO RESÍDUO**

**Natal
2008**

Anaxsandra da Costa Lima Duarte

**INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA MASSA CERÂMICA
PARA A FABRICAÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS: UMA ALTERNATIVA
PARA A DISPOSIÇÃO FINAL DO RESÍDUO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dra Maria Del Pilar Durante Ingunza

Co-orientador: Dr. Rubens Maribondo do Nascimento

Natal

2008

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila
Mamede

Duarte, Anaxsandra da Costa Lima.

Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final de resíduo / Anaxsandra da Costa Lima Duarte. – Natal, RN, 2008.

109 f.

Orientadora: Maria Del Pilar Durante Ingunza.

Co-orientador: Rubens Maribondo do Nascimento.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Lodo – Disposição final – Dissertação. 2. Lodo de esgoto – Dissertação. 3. Tijolo maciço – Dissertação. 4. Indústria cerâmica – Dissertação. I. Ingunza, Maria Del Pilar Durante. II. Nascimento, Rubens Maribondo do. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.356(043.3)

ANAXSANDRA DA COSTA LIMA DUARTE

**INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA MASSA CERÂMICA
PARA A FABRICAÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS: UMA ALTERNATIVA
PARA A DISPOSIÇÃO FINAL DO RESÍDUO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Maria Del Pilar Durante Ingunza - Orientador

Dr. Rubens Maribondo do Nascimento – Co-orientador

Dr. Cícero Onofre de Andrade Neto – Examinador UFRN

Dra. Paula Frassinetti Feitosa Cavalcanti – Examinador Externo UFCG

Natal, 22 de fevereiro de 2008

A Hugo: meu par, meu melhor amigo.

A Helena: exemplo de amor e dedicação.

A Filipe Eduardo: tão pequeno, tão importante.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, meu refúgio e baluarte, que me concedeu calma e sabedoria para realizar todos os meus sonhos.

Ao meu marido Hugo, por ter enxugado minhas lágrimas, suportado minhas crises e co-fabricado meus tijolos.

A minha família: meus pais Helena e Edson, meus irmãos Anaxandro e Anaxmandra, meus sogros Goureth e Sebastião e meus cunhados Kérgia, Louise e Marcos Júnior. A compreensão, o consolo, a confiança e o estímulo de vocês permitiram que eu chegasse tão longe.

Aos meus poucos e grandes amigos: Sânzia Alves, Beethoven Hortencio, Leonete Ferreira e Andressa Dantas, cujas presenças, em momentos e de formas distintas, contribuíram para minha realização pessoal e profissional.

A professora Pilar -mais do que minha orientadora – pela atenção, compreensão, correção e carinho desde o início da minha carreira acadêmica.

Ao professor Luis Pereira, pela confiança e pelos elogios, sempre motivadores.

Ao professor André Calado, pelas formidáveis aulas-extra, entre elas a de estatística.

Ao professor Rubens Maribondo e seu orientando Márcio Thompson, presentes nas horas mais difíceis e decisivas.

Aos funcionários Ban, Neto, Jair, Seu Chico e Seu Assis, pela ajuda fundamental nas árduas etapas da fabricação dos tijolos.

Aos proprietários e funcionários das cerâmicas em Goianinha, que tão gentilmente cederam matéria-prima, espaço e trabalho para a realização deste projeto.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela bolsa concedida.

À equipe do Laboratório de Materiais Cerâmicos Especiais pela colaboração nas análises de Granulometria por difração a laser

Ao Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural pela colaboração nas análises de Difração de Raios X.

Aos que de todas as formas contribuíram para este trabalho.

RESUMO

A disposição final adequada do lodo de esgoto constitui um problema crescente enfrentado pelos prestadores de serviços de saneamento. Por outro lado, devido às suas características de produção, a Indústria Cerâmica possui uma enorme capacidade para absorver estes resíduos como parte de sua matéria-prima. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de lodo de esgoto na Indústria Cerâmica como alternativa sustentável para a disposição final do resíduo. Além disso, busca avaliar a dosagem máxima de incorporação de lodo a qual resulte em tijolos maciços técnica e ambientalmente viáveis. Para determinar o percentual máximo de lodo de esgoto que pode ser incorporado à massa cerâmica, o experimento consistiu (1) na fabricação de tijolos cerâmicos em escala real contendo 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de lodo, com as dimensões de 220x105x45 mm, moldados em laboratório e queimados em forno industrial; e (2) na avaliação técnica e ambiental desses tijolos, de acordo com as normas pertinentes. A massa cerâmica foi constituída por duas argilas com características distintas, provenientes do pátio de sazonalidade de uma indústria de blocos cerâmicos, localizada no município de Goianinha/RN; e o lodo oriundo de uma empresa de caminhões limpa-fossa da cidade do Natal/RN. As avaliações técnicas permitiram concluir que a adição de lodo acarreta perda significativa da massa dos tijolos e que a absorção de água dos tijolos está significativa e diretamente ligada ao aumento da dosagem de lodo: os tijolos fabricados com lodo, em todas as dosagens, absorveram mais água do que o tijolo-testemunha. Destaca-se a dosagem de 25% que absorveu, em média, 160% de água a mais do que o tijolo-testemunha na sua etapa de fabricação. Por fim, a resistência à compressão foi significativamente diminuída com a adição de lodo: os tijolos com 5% de lodo perderam, em média, cerca de 45% da resistência obtida pelo tijolo-testemunha; os tijolos fabricados com 15 e 20% perderam na faixa de 70% da resistência máxima. As dosagens mais altas, de 25 e 30%, perderam cerca de 90% da resistência do tijolo-testemunha. Em relação aos critérios de periculosidade, foram analisadas as duas maiores dosagens que obtiveram aprovação técnica, ou seja, tijolos com dosagens de 15 e 20% de lodo; pode-se afirmar que não há risco de contaminação do meio-ambiente com a utilização destes tijolos. Desta forma, para as condições especificadas nesta pesquisa, pode-se concluir que a dosagem máxima de lodo que atende aos requisitos técnicos e ambientais é de 20%.

Palavras-chave: disposição final do lodo; lodo de esgoto; tijolo maciço, indústria cerâmica.

ABSTRACT

The disposal of sewage sludge is a growing problem face up to management of sanitary services. Otherwise, because its making process characteristic, the Ceramic Industry can tolerate the presence of this wastes as raw material. This study has as object to confirm the use of the sewage sludge in the Ceramic Industry like a sustainable alternative for its disposal. Furthermore, this study quests to evaluate the maximum proportion for incorporation of sludge wich result in technically and enviromentally suitable bricks. For found this proportion, the research consisted of (1) making of bricks in full scale, adde up 0%, 5%,10%, 15%, 20%, 25%,30%, 35% e 40% sludge, with size 220x105x45 mm, hand-molded by rammer and baked by industrial kiln; and (2) tecnicl and enviromental evaluation of this bricks, according to Brazilian norms. The raw material uses were two distinct clays come from Goianinha/RN and sewage comes from a septic system tank and pumped into tank vehicle, of Natal/RN. The technical evaluation allowed to conclude the addiotion of the sludge brings about signifcant lost of mass and the water absorption grew up according to increase of sludge: every sludge-amended clay bricks absorved more water than control group. Thus, the compressive strength was significantly decreased because the increase of sludge: bricks with 5% sludge added lost 45% of strength achieved at control group; the bricks made with 10 and 20% lost almost 70% of bigger strength. With up to 25% sludge added to the bricks, the streght decreased over 90%. Concerning heavy metal leaching, the two maximum proportion wich have tecnicl approval, it means bricks sludge added with 15 and 20%, can say there is no risk of enviromental contamination using those bricks. This way, in this work context, it can to conclude the maximum proportion atends the technical and enviromental criterion is 20%.

Keywords: sludge disposal, sewage sudge, clay brick, ceramic industry

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo da pesquisa.....	17
CAPÍTULO 2 A indústria cerâmica.....	18
2.1 Aspectos mercadológicos.....	18
2.2 A matéria-prima da indústria cerâmica.....	19
2.3 Estudo das características das argilas: a formulação.....	21
2.4 O processo industrial.....	25
2.4.1 Extração da matéria-prima.....	25
2.4.2 Conformação ou moldagem.....	26
2.4.3 Secagem.....	27
2.4.4 Cozedura ou queima.....	28
2.5 O produto cerâmico tijolo maciço.....	30
CAPÍTULO 3 O TRATAMENTO DO LODO.....	32
3.1 Introdução.....	32
3.2 Caracterização do lodo.....	32
3.3 Produção e gerenciamento do lodo.....	35
3.4 Etapas do tratamento do lodo.....	37
3.4.1 Decanto-digestores.....	40
3.4.2 Leitões de secagem.....	43
3.5 Alternativas para disposição final do lodo.....	47
CAPÍTULO 4 O USO DE LODO EM MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	49
4.1 Viabilidade técnica e mercantil do uso de lodo.....	49
4.2 Uso de lodos industriais em produtos cerâmicos.....	51
4.3 Uso de lodo de ETA.....	52
4.4 Uso de cinza de lodo.....	54
4.5 O uso de lodo de esgoto na fabricação de tijolo cerâmico.....	56
4.6 A legislação vigente.....	61
4.7 O futuro do uso do lodo.....	62
CAPÍTULO 5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
5.1 Coleta e preparação das matérias-primas.....	63
5.2 Caracterização das matérias-primas.....	65
5.2.1 Análise granulométrica.....	65

5.2.2	Densidade real.....	66
5.2.3	Limites de consistência.....	66
5.2.4	Caracterização química.....	67
5.2.5	Caracterização mineralógica.....	68
5.3	Escolha da formulação.....	68
5.4	Fabricação dos tijolos.....	69
5.5	Ensaio nos tijolos cerâmicos.....	71
5.5.1	Avaliação estética.....	71
5.5.2	Determinação das dimensões.....	72
5.5.3	Determinação do percentual da perda de massa.....	72
5.5.4	Determinação do percentual de absorção de água.....	73
5.5.5	Determinação da resistência à compressão.....	74
5.5.6	Determinação do risco ambiental.....	76
5.5.7	Análise estatística dos dados.....	77
CAPÍTULO 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		80
6.1	Caracterização das matérias-primas.....	80
6.1.1	Análise granulométrica.....	80
6.1.2	Limites de consistência.....	82
6.1.3	Caracterização química.....	83
6.1.4	Caracterização mineralógica.....	84
6.2	Determinação da formulação.....	85
6.3	Ensaio nos tijolos maciços fabricados com lodo.....	89
6.3.1	Avaliação técnica.....	89
6.3.1.1	Avaliação estética.....	89
6.3.1.2	Dimensões dos tijolos.....	91
6.3.1.3	Perda de massa dos tijolos.....	92
6.3.1.4	Absorção de água dos tijolos.....	94
6.3.1.5	Resistência à compressão dos tijolos.....	95
6.3.2	Avaliação ambiental.....	97
6.3.2.1	Ensaio de lixiviação.....	97
6.3.2.2	Ensaio de solubilização.....	99
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....		100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		102

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Diagrama de Winkler..... 23

Figura 2.2 - Configuração das Cerâmicas segundo o tipo de forno no RN..... 30

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Composição mineralógica do lodo por DRX..... 35

Figura 3.2 - Balanço de lodo gerado no País e sua atual destinação final..... 36

Figura 3.3 - Decanto-digestor de câmara única (corte longitudinal)..... 41

Figura 3.4 - Decanto-digestor de câmaras em série (corte longitudinal)..... 41

Figura 3.5 - Decanto-digestor de câmaras sobrepostas (corte transversal)..... 41

Figura 3.6 - Decanto-digestor com filtro acoplado (corte transversal)..... 42

Figura 3.7 – Desenho esquemático de um leito de secagem..... 43

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Pá-carregadeira retirando argila..... 64

Figura 5.2 – Leito de secagem ETE-Campus..... 64

Figura 5.3 – Destorroamento das argilas..... 64

Figura 5.4 – Moinho: destorroamento do lodo..... 64

Figura 5.5 – Máquina de abrasão Los Angeles. 65

Figura 5.6 – Peneiramento dos materiais. 65

Figura 5.7 – Pesagem do picnômetro vazio..... 66

Figura 5.8 – Aquecimento do picnômetro contendo solo e água destilada..... 66

Figura 5.9 - Esquema para a escolha da formulação para fabricação dos tijolos com lodo..... 68

Figura 5.10 – Betoneira para mistura da massa cerâmica..... 71

Figura 5.11 – Prensa manual para moldagem dos tijolos maciços..... 71

Figura 5.12 – Tijolos com 20% de lodo antes da queima..... 73

Figura 5.13– Tijolos com 20% de lodo depois da queima..... 73

Figura 5.14 – Tijolos no tanque de água..... 73

Figura 5.15 – Pesagem de tijolo úmido..... 73

Figura 5.16 – Equipamento para o ensaio..... 74

Figura 5.17 – Regularização das faces do prisma..... 74

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Ensaio de plasticidade do lodo de esgoto..... 83

Figura 6.2 – Tijolos fabricados com adição de lodo (1ª etapa de fabricação).....	89
Figura 6.3 – Tijolos fabricados com adição de lodo (2ª etapa de fabricação).....	90

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

Quadro 1.1 - Principais meios de destinação dos lodos de esgoto.....	15
--	----

CAPÍTULO 2

Quadro 2.1 - Dados do setor da Cerâmica Vermelha.....	18
Quadro 2.2 - Produção cerâmica mensal no Rio Grande do Norte.	19
Quadro 2.3 - Formulação das massas cerâmicas.....	22
Quadro 2.4 - Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha.....	22
Quadro 2.5 - Técnicas empregadas na caracterização das argilas.....	24
Quadro 2.6 - Estoque de matérias-primas nas cerâmicas.....	26
Quadro 2.7 - Processos de moldagem da cerâmica.....	27
Quadro 2.8 - A secagem nas cerâmicas do Rio Grande do Norte.....	28
Quadro 2.9 - Dimensões nominais (em mm) para tijolos comuns.....	31
Quadro 2.10 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria.....	31

CAPÍTULO 3

Quadro 3.1 - Características dos lodos de ETE.....	32
Quadro 3.2 - Caracterização de lodos de Natal/RN, Florianópolis e Joinville/S, respectivamente.....	33
Quadro 3.3 – Produção de lodo nos diversos tipos de tratamento.....	37
Quadro 3.4 – Principais tecnologias para o tratamento do lodo de ETE.....	39
Quadro 3.5 – Produção de lodo de tanques sépticos.....	40
Quadro 3.6 - Parâmetros para dimensionamento de leitos de secagem.....	44
Quadro 3.7 - Características do leito de secagem.....	44
Quadro 3.8 - Incremento de sólidos (%) para os oito tratamentos analisados.....	46
Quadro 3.9 - Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição de lodo...	47

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 – Desempenho dos tijolos maciços com adição de lodo de esgoto.....	56
Quadro 4.2 – Desempenho de tijolos maciços com cinza de lodo de esgoto.....	57
Quadro 4.3 - Resultados da pesquisa em escala industrial.....	58
Quadro 4.4 Resistência mecânica dos tijolos furados.....	59
Quadro 4.5- Consumos de energia para quatro tipos de alvenarias.....	60

CAPÍTULO 5

Quadro 5.1 - Quantidade de matéria-prima para fabricação de cerca de 12 tijolos.....	70
Quadro 5.2 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria.....	75
Quadro 5.3 - Número de aceitação e rejeição na inspeção por ensaio.....	75
Quadro 5.4 - Exemplo de resultado gerado pelo teste de Dunet.....	78
Quadro 5.5 - Exemplo de resultado gerado pelo teste de Tukey HSD.....	79

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 5

Equação 5.1 – Determinação do Índice de Plasticidade (IP).....	67
Equação 5.2 – Determinação do percentual da perda de massa.....	72
Equação 5.3 – Determinação do percentual de Absorção de Água.....	74
Equação 5.4 – Determinação da Resistência à compressão.....	75

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Limites de consistência e nomenclatura das argilas A e B.....	82
Tabela 6.2 - Composição química das argilas A e B e do lodo de esgoto em % de óxidos.....	83
Tabela 6.3 - Características estéticas dos tijolos de acordo com a dosagem de lodo.....	90
Tabela 6.4 - Variação dimensional dos tijolos.....	91

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 6

Gráfico 6.1 - Curva granulométrica das argilas A e B.....	80
Gráfico 6.2 - Curva granulométrica do lodo de esgoto.....	81
Gráfico 6.3 - Diagrama de Winkler com as características das matérias-primas....	82
Gráfico 6.4 - Composição mineralógica da Argila A.....	84
Gráfico 6.5 - Composição mineralógica da Argila B.....	84
Gráfico 6.6 - Composição mineralógica do lodo de esgoto.....	85
Gráfico 6.7 - Diagrama de Winkler com as características das quatro formulações propostas	86
Gráfico 6.8 – Gráfico de plasticidade com as características das quatro formulações propostas.....	87

Gráfico 6.9 – Variação de Absorção de Água dos tijolos fabricados com as formulações de melhor desempenho.....	88
Gráfico 6.10– Variação de Resistência à Compressão dos tijolos fabricados com as formulações de melhor desempenho.....	89
Gráfico 6.11 – Evolução da retração linear dos tijolos da 1ª etapa de fabricação...	92
Gráfico 6.12 – Evolução da retração linear dos tijolos da 2ª etapa de fabricação...	92
Gráfico 6.13 - Evolução do peso dos tijolos segundo a dosagem de lodo.....	93
Gráfico 6.14 - Evolução da perda de massa dos tijolos da 1ª etapa de fabricação.	93
Gráfico 6.15 - Evolução da perda de massa dos tijolos da 2ª etapa de fabricação.	93
Gráfico 6.16 - Evolução da absorção de água, segundo a dosagem de lodo.....	94
Gráfico 6.17 - Incremento da Absorção de Água de dos tijolos com lodo, em relação ao tijolo-testemunha.....	95
Gráfico 6.18 - Evolução da resistência à compressão, segundo a dosagem de lodo.....	96
Gráfico 6.19 – Diminuição da Resistência à Compressão de cada tijolo, em relação ao seu tijolo-testemunha.....	97
Gráfico 6.20 – Concentração de cádmio (mg/L) no extrato lixiviado.....	98
Gráfico 6.21 – Concentração de chumbo (mg/L) no extrato lixiviado.....	98
Gráfico 6.22 – Concentração de cromo (mg/L) no extrato lixiviado.....	98
Gráfico 6.23 – Concentração de prata (mg/L) no extrato lixiviado.....	98
Gráfico 6.24 – Concentração de cádmio (mg/L) no extrato solubilizado.....	99
Gráfico 6.25 – Concentração de chumbo (mg/L) no extrato solubilizado.....	99
Gráfico 6.26 – Concentração de ferro (mg/L) no extrato solubilizado.....	99
Gráfico 6.27 – Concentração de cromo (mg/L) no extrato solubilizado.....	99
Gráfico 6.28 - Concentração de cobre (mg/L) no extrato solubilizado.....	99
Gráfico 6.29 - Concentração de manganês (mg/L) no extrato solubilizado.....	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CTGÁS	Centro de Tecnologias do Gás
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DD-FAN	Decanto-digestor seguido de Filtro Anaeróbio
DFTE	Departamento de Física Teórica e Experimental
DNIT	Departamento Nacional De Infra-Estrutura de Transporte
DQO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DRX	Difração de Raios X
EAA	Consumo de Aquecimento Auxiliar
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FES	Fração de Economia Solar
FRX	Fluorescência de Raios X
LARHISA	Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
ME	Método de Ensaio
Mpa	Mega-pascal
NBR	Norma Brasileira
NEPGN	Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural
PEC	Pasta de eco-cimento
RN	Rio Grande do Norte
SC	Santa Catarina
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é o subproduto sólido gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico ou Industrial (ETE's), resultante da decantação dos sólidos contidos nos esgotos e dos sólidos gerados pela degradação biológica da matéria orgânica. Devido ao seu grande volume de produção, difícil tratamento e disposição final, o lodo de esgoto se constitui em um complexo problema enfrentado pela engenharia sanitária.

A relevância desta problemática motivou a incorporação do Capítulo 21, intitulado "Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos" à Agenda 21 global (UNCED, 1992), visto que o manejo dos resíduos se encontra entre as questões mais importantes para a manutenção da qualidade do meio ambiente.

Segundo o Anuário 2005 (SEMURB, 2005), na cidade do Natal 45.261 dos domicílios particulares (o que corresponde a 25,45% do total) contam com rede de coleta de esgotos, enquanto 82.534 dos domicílios (cerca de 46,42%) utilizam fossas sépticas, as quais raramente são construídas e/ou operadas de acordo com a NBR 13969 (ABNT, 1997).

Considerando a densidade média de 3,99 habitantes por domicílio, obtida neste anuário, pode-se calcular que 329.311 habitantes lançam seus dejetos nestas fossas. Adotando um valor médio de produção de lodo igual $0,65 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ (CASSINI *et al.*, 2003), estima-se que a cidade de Natal produza, diariamente, 214.052 L de lodo de fossa séptica. Considerando que este lodo, caso fosse desaguado em leitos de secagem, apresentaria 60% de teor de sólidos secos (FERREIRA *et al.*, 1999), a produção diária de lodo seco seria de aproximadamente 128.431 L.

É imprescindível ressaltar que em Natal ainda não há um controle sobre a produção, tratamento e o descarte do lodo de esgoto produzido, o que significa que os valores supracitados são apenas teóricos.

Com a busca pela universalização dos serviços de saneamento, a expectativa é de um aumento considerável no número de domicílios que disporão de sistema de coleta e tratamento de esgotos e conseqüentemente, grande aumento no volume de lodo produzido. Contudo, o sucesso de um sistema de esgotamento sanitário está

diretamente ligado ao destino final dado ao lodo: a negligência quanto a essa etapa da ETE pode ocasionar inúmeros problemas, sendo o mais grave a contaminação de corpos d'água devido à disposição dos resíduos em suas margens.

Segundo Ferreira *et al.* (1999), após o tratamento adequado – por digestão aeróbia ou anaeróbia - o lodo de esgoto pode ser enviado para aterros sanitários (exclusivos ou comuns), para áreas de *landfarming*, para incineração ou para reciclagem agrícola. A disposição oceânica foi descartada, visto que, em países com maior avanço nas tecnologias de disposição de lodo, ela é uma prática totalmente proibida. (DEFRA, 1998).

A escolha por qualquer uma das alternativas de disposição final do lodo é produto da situação local de tecnologia e recursos disponíveis. O Quadro 1.1 apresenta os principais meios de destinação dos lodos em países de realidades distintas.

Quadro 1.1. Principais meios de destinação dos lodos de esgoto.

País	Método de disposição (como % do total produzido)			
	Aterros	Agricultura	Incineração	Outros
França ⁽¹⁾	50	50	0	0
Alemanha ⁽¹⁾	25	63	12	0
Itália ⁽¹⁾	34	55	11	0
Portugal ⁽¹⁾	80	13	0	7
Espanha ⁽¹⁾	10	50	10	30
Japão ⁽²⁾	6	14	80	0
EUA ⁽²⁾	30	20	30	20
Brasil ⁽²⁾	80	5	0	15

Fonte: (1) Chang *et al.*, 2001; (2) Geyer, 2001

Descrevendo as implicações destas alternativas, Andreoli (1999) afirma que a disposição em aterros sanitários, além de um custo financeiro para a empresa geradora do resíduo, se apresenta como uma solução muito onerosa para a sociedade: a área exigida é muito grande. Em relação à técnica de *landfarming*, apesar de ser uma alternativa de menor custo, também exige grande disponibilidade de área, à semelhança dos aterros. A incineração é uma alternativa que apresenta

elevado custo por tonelada tratada e problemas secundários de poluição atmosférica; requer, ainda, a destinação das cinzas.

Entre as já citadas, a reciclagem agrícola se mostra como uma alternativa que utiliza os nutrientes do lodo e que alia baixo custo com impacto ambiental positivo, quando realizada dentro de critérios seguros. Num país como o Brasil, tal destinação soluciona o problema de empobrecimento do solo – causado pelo intenso intemperismo - através da reposição do estoque de matéria orgânica. Contudo, a presença de certas substâncias no lodo (compostos orgânicos persistentes e organismos patogênicos) e o manejo inadequado (excesso de nitrogênio pode acarretar em contaminação, por nitrato, da água subterrânea) podem inviabilizar esta opção.

A medida em que crescem os custos econômicos e ambientais da disposição de lodos em aterros sanitários, o uso deste resíduo como matéria-prima se torna mais vantajoso. Uma pesquisa de Ângulo *et al.* (2001) no âmbito da construção civil (incluindo o uso de materiais cerâmicos) afirma a necessidade do uso destes resíduos, ressaltando três benefícios provenientes desta prática:

1. Redução do consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
2. Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem;
3. Redução da poluição, como no caso da indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico, utilizando escória de alto forno em substituição ao cimento Portland.

Devido às suas características de produção, a Indústria Cerâmica possui uma enorme capacidade para absorver os resíduos industriais e urbanos (MENEZES *et al.*, 2002). Desta forma, o uso de lodo de esgoto como matéria-prima surge como uma possibilidade de destinação que se contrapõe à idéia de que ele apenas constitui uma matéria inútil a ser confinada. Pelo contrário, o lodo possui características que, caso não melhorem o produto, podem, no mínimo, entrar como substituto de parte da matéria-prima convencional, significando em redução de custos (SANTOS, 2003).

1.1 Objetivo da pesquisa

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de lodo de esgoto na Indústria Cerâmica como alternativa sustentável para sua disposição final. Além disso, busca avaliar a dosagem máxima de incorporação de lodo que resulte em tijolos maciços técnica e ambientalmente viáveis.

Como objetivos específicos podem-se destacar:

- Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas;
- Determinação da melhor formulação de massa entre as argilas;
- Elaboração de procedimento metodológico que utilize técnicas e equipamentos usuais em laboratórios de construção civil;
- Fabricação de tijolos com oito dosagens diferentes de lodo, além dos exemplares sem lodo, os quais servirão de testemunhas;
- Verificação da influência das dosagens nos desempenho técnico dos tijolos;
- Caracterização dos resíduos segundo critérios de periculosidade.

2 A INDÚSTRIA CERÂMICA

2.1 Aspectos mercadológicos

A cerâmica vermelha abrange um grupo constituído por tijolos, telhas, tubos, lajotas, vasos ornamentais, agregados leves de argila expandida, etc., geralmente fabricados próximos dos centros consumidores, utilizando matérias-primas locais. As matérias-primas são argilas e siltes argilosos, com alto teor de impurezas, entre as quais se destacam minerais de ferro, responsáveis pela cor vermelha típica dos produtos. (CARVALHO *et al.*, 2000).

Segundo os dados da ABCERAM (2003), no Brasil existem aproximadamente 7.000 empresas no ramo da Indústria Cerâmica, cujas características de produção estão apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Dados do setor da Cerâmica Vermelha.

Produção anual	Quantidade
Número de Peças (bloco)	25.224.000
Número de Peças (telha)	4.644.000
Quantidade Produzida (em ton)	64.164.000
Matéria-Prima (argila, em ton)	82.260.000

Fonte: ABCERAM, 2003

Com um faturamento anual de R\$ 4,2 bilhões, a Indústria Cerâmica é um setor de extrema importância econômica para o Brasil, ressaltando ainda que é responsável pela geração de 214 mil empregos diretos. (ABCERAM, 2003).

Apesar disto, Soares *et al.* (2002) ressaltam que a indústria brasileira é um setor marcado por uma competição desigual entre custo e qualidade. Não só o empresariado se esmera na busca pela redução dos custos de produção – por vezes até em detrimento da qualidade do produto, capacitação da mão-de-obra, falta de assistência pós-venda – mas também os consumidores se mostram demasiadamente interessados em receber mercadorias que supram apenas suas necessidades de menor preço.

Em um estudo realizado por Carvalho *et al.* (2000), no Rio Grande do Norte, o setor é constituído predominantemente por microempresas, de gestão familiar ou associativa, com baixa demanda tecnológica. Estas características tornam este segmento muito importante para a economia do estado, porque geram empregos nas regiões mais carentes, contribuindo significativamente para fixar o homem ao campo, evitando a sua migração para as grandes cidades.

Nesse mesmo estudo os autores cadastraram 206 indústrias, das quais 159 estão em atividade, com um consumo mensal de argila de 173.925 toneladas, que após o processamento, resultam numa produção líquida de 134.514 toneladas de produtos cerâmicos. No cadastro não foram incluídas as Cerâmicas produtoras de tijolos maciços, visto serem quase todas informais. Os dados da produção mensal da indústria potiguar estão representados pelo Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Produção cerâmica mensal no Rio Grande do Norte.

Produto	Produção (peças/mês)
Telhas	50.172.000
Tijolos	29.364.000
Lajotas	2.831.000
Outros	432.000
Total	82.799.000

Fonte: Carvalho *et al.*, 2000

2.2 A matéria-prima da Indústria Cerâmica

As argilas são materiais terrosos naturais, de granulação final, as quais adquirem alta plasticidade quando adicionadas de certa quantidade de água. Quimicamente as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio; são constituídas por partículas cristalinas de pequenas dimensões, formadas por argilominerais, (silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio) (VERÇOSA, 1994).

Além dos argilominerais, as argilas contêm outros elementos e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não-cristalinos ou amorfos. (SOUZA SANTOS, 1989).

A argila é a principal matéria-prima utilizada na fabricação de uma série de produtos cerâmicos. As razões para isto são (VIEIRA *et al.*, 2000):

- a. Apresenta plasticidade;
- b. Apresenta resistência mecânica após queima adequada para uma série de aplicações;
- c. Possibilita a aplicação de técnicas de processamento simples;
- d. É disponível em grandes quantidades.

Motta *et al.* (2004) classificam as argilas em dois grupos principais, com base na cor de queima (principal característica) e na mineralogia (característica secundária), destacando o vínculo com a cor nos setores de aplicação industrial, a saber:

- a. Argilas de queima avermelhada: matéria-prima para cerâmica vermelha, placas cerâmicas de revestimentos (inclui principalmente os produtos da via seca e, secundariamente, pisos extrudados avermelhados e via úmida), agregado leve, vasos, potes e outras peças utilitárias e de decoração, de corpo avermelhado;
- b. Argilas cauliniticas de queima clara (argilas plásticas e caulim para cerâmica branca): matérias primas utilizadas em cerâmica sanitária, placas cerâmicas via úmida, porcelana técnica e artística.

Em uma classificação dos produtos cerâmicos quanto às matérias-primas, Souza Santos (1989) definiu que a argila plástica caulinito-ilítica ou em camadas mistas com matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, é a mais indicada para a fabricação de blocos e tijolos maciços. As argilas com estas características são geralmente encontradas em margens de rios, lagos ou várzeas, a exemplo do que acontece no estado do Rio Grande do Norte (CARVALHO *et al.*, 2000).

Para Motta *et al.* (2001) as jazidas das argilas empregadas devem, necessariamente, estar situadas nas proximidades das cerâmicas, o que implica que a localização das cerâmicas deve ser controlada pela ocorrência dos depósitos desta matéria-prima.

Esta situação já havia sido abordada por Carvalho *et al.* (2000), que detectaram a grande variação no preço da argila, desde R\$ 1,50 até R\$ 10,00/m³. Os autores confirmam que os custos mais baixos com a aquisição da matéria-prima ocorrem nos locais onde as empresas estão muito próximas às jazidas.

2.3 Estudo das características das argilas: a formulação

De acordo com Motta *et al.* (2001) a preparação da massa cerâmica é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica. Contudo esta mistura não pode ser feita aleatoriamente, fazendo-se necessária uma etapa de estudo das matérias-primas, anterior à fabricação do produto, conhecida por formulação.

Na formulação da massa cerâmica se busca uma proporção ótima entre as argilas a qual confere um equilíbrio ideal entre plasticidade e fusibilidade, a fim de propiciar trabalhabilidade e resistência mecânica pós-queima. (MOTTA *et al.*, 2001).

Dutra *et al.* (2006b) afirmam que a formulação é função do produto que se deseja fabricar: em produtos que exigem maior resistência mecânica (blocos estruturais e telhas) é aconselhável argilas com maior quantidade de minerais argilosos; em materiais com função de preenchimento estrutural (blocos de vedação) não há necessidade de alta resistência mecânica, podendo-se utilizar maior quantidade de argilas não-plásticas.

Os autores desenvolveram uma pesquisa cujo objetivo foi encontrar a formulação de massas, conforme mostra o Quadro 2.3, onde foram utilizadas seis matérias-primas procedentes de três indústrias de cerâmica do estado do Rio Grande do Norte.

Foram avaliadas sete formulações a partir destas matérias-primas, através de parâmetros como absorção de água, porosidade aparente, massa específica e resistência à flexão. Os autores concluíram que cada indústria, dependendo do tipo de produto a ser fabricado e das características das argilas utilizadas, requer uma formulação específica. Neste caso, as formulações ideais foram as de número 4, 1 e 3, para as indústrias I-1; I-2 e I-3, respectivamente.

Quadro 2.3 - Formulação das massas cerâmicas.

Indústrias	Argilas	Formulações	Formulação (n°)% em peso						
			1	2	3	4	5	6	7
I - 1	A - 1	F - A	100,0	75,0	66,5	50,0	33,5	25,0	0,0
	A - 2		0,0	25,0	33,5	50,0	66,5	75,0	100,0
I - 2	A - 3	F - B	100,0	75,0	66,5	50,0	33,5	25,0	0,0
	A - 4		0,0	25,0	33,5	50,0	66,5	75,0	100,0
I - 3	A - 5	F - C	100,0	75,0	66,5	50,0	33,5	25,0	0,0
	A - 6		0,0	25,0	33,5	50,0	66,5	75,0	100,0

Fonte: Dutra *et al.*, 2006b

Pracidelli & Melchiades (1997) já alertavam para a importância da composição granulométrica para a definição da formulação das massas para a cerâmica vermelha. Os autores observaram que as argilas de granulometria muito fina apresentam boa plasticidade e alta resistência mecânica, mas precisam de uma quantidade considerável de água para desenvolver esta plasticidade; as argilas pouco plásticas reduzem a necessidade de água, proporcionando uma redução do ciclo de secagem.

Como orientação para o estudo da composição granulométrica mais adequada, os autores sugerem o diagrama de Winkler, apresentado na Figura 2.1. Este diagrama mostra as regiões onde se situam os tipos de produtos da cerâmica vermelha e pode ser expresso também através do Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha.

Regiões	Composição granulométrica (%)		
	2 μm	2 a 20 μm	20 μm
Tipos de produto			
A. Materiais com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B. Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C. Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D. Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Pracidelli & Melchiades, 1997

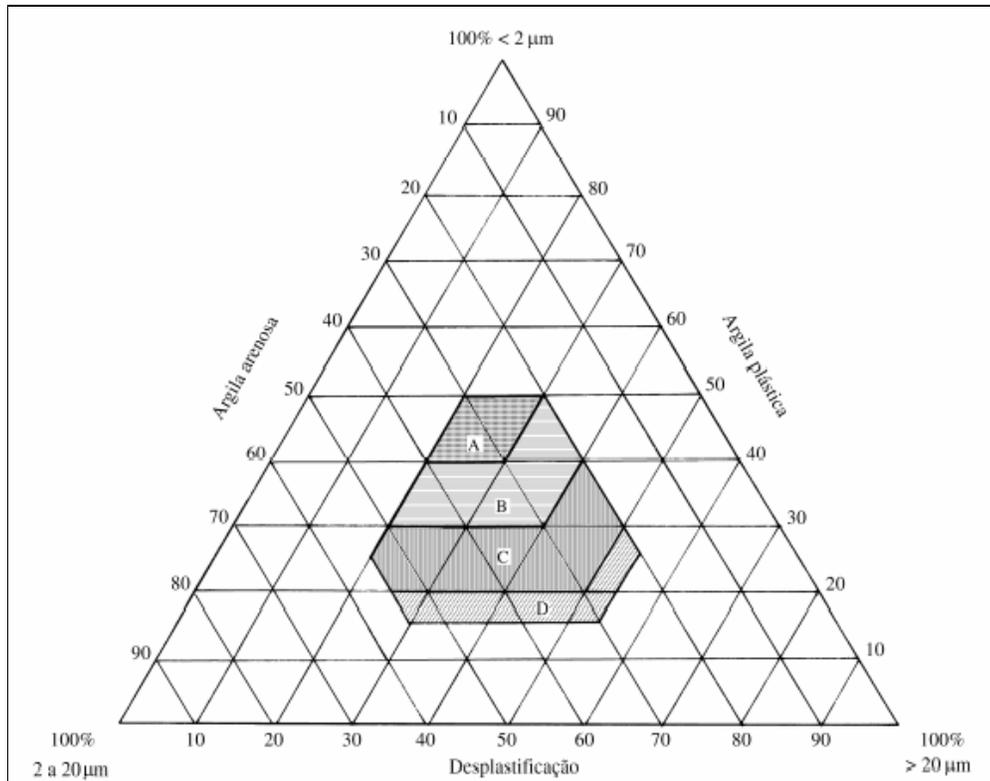


Figura 2.1. Diagrama de Winkler
 Fonte: Pracidelli & Melchiades, 1997

Para determinar a posição que uma determinada formulação se encontra no diagrama acima é preciso dividir sua composição granulométrica em três frações, a saber, argila plástica (porcentagem inferior a $2\mu\text{m}$), argila arenosa (porcentagem entre 2 e $20\mu\text{m}$) e a desplastificação (porcentagem da fração superior a $20\mu\text{m}$). O encontro das paralelas traçadas a partir de cada um dos três lados do triângulo determina a referida posição.

Observa-se que, na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência do cerâmico prático, o que dificulta a padronização e a formalização dos conhecimentos da área.

Souza Santos (1989) conceitua a caracterização das argilas como o conhecimento da variabilidade de suas propriedades, e afirma que isto não é um problema simples, visto que necessita não só do emprego de técnicas comuns (como medir propriedades físico-mecânicas) como também de trabalhosas (como a análise química e troca de cátions) ou até sofisticadas, como as de microscopia eletrônica

de varredura (para determinar a textura de agregados naturais dos argilominerais antes ou após tratamento industrial, como prensagem).

Para a identificação dos argilominerais, o autor sugere o método da difração dos raios X (DRX), destacando como vantagem o grande número de picos gerados pelo procedimento, fator que facilita a identificação, principalmente no caso de misturas, onde pode haver superposição de alguns picos, mas nunca de todos. Porém, ele alerta que o método é falho na identificação de substâncias amorfas, como alofano, cliaquita ou matéria-orgânica, sendo necessários outros métodos.

Ainda no âmbito da busca pela formulação mais adequada das argilas, Dutra *et al.* (2006a) avaliaram a potencialidade de doze amostras de argilas provenientes de diferentes localidades no Rio Grande do Norte, identificadas de A1 até A12. Todas as amostras foram submetidas às mesmas técnicas de caracterização, conforme a Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Técnicas empregadas na caracterização das argilas.

Parâmetro	Técnica/equipamento
Distribuição de tamanho de partículas	Difração de laser (CILAS 920 L)
Limites de Consistência - Atterberg	Limite de Liquidez e Plasticidade
Análise química	Espectrometria de raios X (Shimadzu, EDX 700)
Análise mineralógica	Difração de raios X
Identificação das fases minerais	Software MIDS e cartas-padrão JCPDS

Fonte: Dutra *et al.* 2006a

Os autores afirmam que as técnicas utilizadas neste trabalho foram eficientes, porquanto permitiram:

- a. Diferenciação entre as argilas plásticas e não-plásticas;
- b. Previsão do comportamento dos produtos cerâmicos pós-queima, em relação à coloração;

- c. Identificação das argilas quanto a características especiais, como a utilização na cerâmica de revestimento e de porcelanas.

2.4 O Processo industrial

Cada tipo de cerâmica requer uma matéria-prima própria: a escolha deve ser feita em função da peça a ser produzida, na observância ao teor de argila, composição granulométrica, profundidade e localização da jazida, umidade, entre outros.

A obtenção de produtos de cerâmica estrutural ocorre por meio de quatro fases seqüenciais bem definidas: extração e preparação da matéria-prima, conformação ou moldagem da massa cerâmica, secagem e cozedura ou queima.

Cada uma destas etapas será concisamente explicitada, de acordo com o que sugere Verçosa (1994), com os adendos de Carvalho *et al.* (2000), imprescindíveis para a compreensão da realidade da Indústria Cerâmica no Rio Grande do Norte.

2.4.1 Extração da matéria-prima

A argila é extraída a céu aberto, utilizando retro-escavadeiras ou equipamentos semelhantes. Devido à economia no transporte, a jazida normalmente está nas proximidades das cerâmicas. Após a extração, a preparação da matéria-prima pode ocorrer de várias formas ou etapas:

1. Seleção de lotes de argilas com a mesma qualidade (composição granulométrica, plasticidade);
2. Apodrecimento ou sazonalidade: as argilas seguem para depósitos ao ar livre, onde são revolvidas e passam por um período de descanso. Esta etapa visa à fermentação das partículas orgânicas, aumentando a plasticidade; e visa à correção do efeito das pressões sobre as argilas;
3. Maceração ou destorroamento: pode ser feito por processos rudimentares, com o revolvimento da argila através de pás e picaretas; em processos mais modernos podem ser empregados britadores, moinhos desintegradores e pulverizados, gerando materiais com granulometria cada vez mais finas. A

obtenção de menores partículas confere maior plasticidade e melhor contato entre os componentes;

4. Correção: é feita para dar à argila a formulação ou constituição adequada à fabricação do produto final;
5. Amassamento: objetiva tornar a matéria-prima, adicionada com água, um pasta homogênea. Pode ser feito por processos manuais ou mecânicos.

Segundo Carvalho *et al.* (2000), durante a época de seca, os principais açudes potiguares fornecedores de argila para a região da bacia do Seridó são o de Cruzeta, o Caldeirão, em Parelhas; o Gargalheiras, em Acari; o Itans, em Caicó; o Zangarelhas, em Jardim do Seridó; e o açude Santa Luzia, em Santa Luzia no estado da Paraíba. As demais cerâmicas do Estado consomem argila de pequenos açudes, rios ou riachos existentes nas proximidades das empresas.

As argilas são extraídas e fornecidas por terceiros em 74,8% das cerâmicas. Em 18,9% dos casos, a própria cerâmica extrai e transporta a matéria-prima; em 6,3% das unidades pesquisadas, a empresa tanto extrai como compra de terceiros. As modalidades de estoque das argilas no Rio Grande do Norte estão no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Estoque de matérias-primas nas cerâmicas.

Estoques	Empresas	
	Quantidade	%
Em pilhas separadas	50	31,4
Em camadas misturadas	100	62,9
Não fazem	09	5,7
Total	159	100,0

Fonte: Carvalho *et al.*, 2000

2.4.2 Conformação ou moldagem

É a operação que confere a forma desejada à pasta cerâmica. Há quatro processos básicos para moldagem, apresentados nos Quadros 2.7 e 2.8, cuja seleção depende

do tipo e características da matéria-prima, do formato e constituição do produto final e do tipo de forno a ser empregado.

Quadro 2.7 - Processos de moldagem da cerâmica.

Tipo de moldagem		Umidade (%)	Aplicação	Descrição do processo
a	A seco ou semi-seco	4 – 10	Azulejos, refratários.	Prensagem de 5-100 MPa.
b	Com pasta plástica consistente	2 – 35	Tijolos, tubos cerâmicos, telhas.	Extrusão e corte com guilhotina.
c	Com pasta plástica mole	25 – 40	Vasos, pratos, xícaras.	Moldes de madeira ou torno de oleiro.
d	Com pasta fluida	30 – 50	Porcelanas, louças sanitárias.	A argila é dissolvida em água e vertida em moldes porosos de gesso

Fonte: Verçosa, 1994

2.4.3 Secagem

A secagem permite a eliminação da água utilizada na conformação das peças. A umidade de extrusão dos produtos cerâmicos normalmente oscila entre 20 e 30% e, após a secagem, esta umidade residual deve estar abaixo de 5%. Os dispositivos de secagem utilizados pelas cerâmicas do Estado são apresentados pelo Quadro 2.8 (CARVALHO *et al.*, 2000).

Esta etapa reduz a porosidade e o aparecimento das tensões internas; conseqüentemente reduz o fendilhamento resultante da saída abrupta e desuniforme da umidade do interior da massa. Há quatro processos básicos de secagem (VERÇOSA, 1994):

- a. Natural: consiste na disposição das peças cerâmicas em telheiros com ou sem cobertura; mais comum e demorada, exige grandes superfícies;

- b. Por ar quente úmido: as peças são colocadas em secadores e recebem ar quente com muita umidade, para retirar a água absorvida; daí recebe somente ar quente para retirar a água de capilaridade;
- c. De túnel: as peças atravessam lentamente, sob vagonetas, túneis extensos alimentados com o calor residual dos fornos (40 a 150°C);
- d. Por radiação infravermelha: pouco usada devido ao alto custo.

Quadro 2.8 - A secagem nas cerâmicas do Rio Grande do Norte.

Número de Empresas	Secagem Natural			Secagem Artificial		
	Ao ar livre	Em galpões	Ao ar livre e em galpões	Secador fechado	Secador Túnel	Secador aberto
	21	66	72	05	07	01
Total	159			13		

Fonte: Carvalho *et al.*, 2000

A análise do Quadro 2.9 mostra que todas as cerâmicas usam secagem natural, e que 13 dentre elas, o que corresponde a 8,2%, também usam secagem artificial.

2.4.4 Cozedura ou queima

É a etapa na qual ocorrem as reações químicas de oxidação da matéria orgânica e desidratação química (a partir de 600°C); calcinação; e vitrificação (a partir de 950°C).

A queima é feita em fornos contínuos ou em fornos intermitentes. Estes podem ser de calor ascendente ou descendente, enquanto aqueles podem ter móveis ou a carga de peças ou a zona de fogo.

De acordo com Carvalho (2000) os tipos de fornos usualmente empregados no Rio Grande do Norte e suas respectivas características estão listados abaixo.

- **Fornos de baixo rendimento**

- a. *Fornos de chama direta tipo Caipira*

Consiste em quatro paredes de forma retangular, sem cobertura. Este forno tem consumo elevado de combustível. Há grande perda de produtos pelo excesso de queima das primeiras camadas enquanto a última permanece crua.

b. A caieira

É um forno feito com os próprios tijolos que serão queimados. Tem perdas enormes na produção e um alto consumo de lenha; os produtos não são sinterizados e por isso apresentam baixa qualidade.

- **Fornos de bom rendimento**

- a. Fornos de chama reversível*

Existe uma grande variedade de modelos, entre eles o forno Abóbada (com seção horizontal circular), o forno Corujinha (seção retangular) e o forno Igreja (com duas seções retangulares geminadas).

- **Fornos de alto rendimento**

- a. Fornos contínuos do tipo Hoffmann*

Forno de queima contínua, o qual permite que, enquanto algumas câmaras estejam sendo carregadas ou descarregadas, outras estejam queimando ou resfriando. São encontrados em cerâmicas da Grande Natal e de Mossoró.

- b. Fornos contínuos do tipo túnel*

Também opera com queima contínua, onde as peças são aquecidas, queimadas e resfriadas progressivamente. Este tipo de forno é o equipamento mais eficiente da atualidade para queima de cerâmica vermelha.

O tipo de forno remete, por fim, ao grau tecnológico da indústria cerâmica. No contexto do estado do Rio Grande do Norte, a distribuição dos fornos nas cerâmicas está apresentada na Figura 2.2.

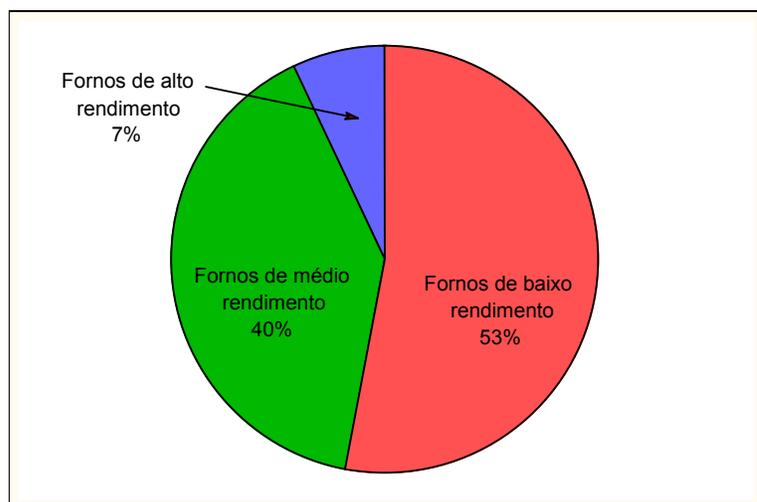


Figura 2.2 - Configuração das Cerâmicas segundo o tipo de forno no RN.
Fonte: Modificado de Carvalho *et al*, 2000

2.5 O produto cerâmico tijolo maciço

A fabricação dos tijolos comuns é feita pelos processos mais econômicos possíveis, a saber, moldagem com pasta plástica consistente, em máquinas de fiação (pequena compressão) ou podem ser tijolos com moldagem manual, utilizando moldes de madeira e pasta plástica; a secagem é feita em grandes telheiros e a queima em temperatura da ordem de 1000° C (VERÇOSA, 1994).

A NBR 7170 (ABNT, 1983b) define que o tijolo maciço cerâmico é aquele que possui todas as faces plenas de material, podendo apresentar rebaixas de fabricação em uma das faces de maior área; deve ser fabricado com argila, conformado por extrusão ou prensagem e queimado à temperatura que permita ao produto final atender às características visuais e mecânicas exigidas.

A mesma Norma especifica que os tijolos comuns devem possuir a forma de um paralelepípedo-retângulo, e recomenda suas dimensões nominais, conforme o Quadro 2.9. A tolerância máxima de variação deve ser de 3 mm, para mais ou para menos, em cada uma das três dimensões.

Quadro 2.9 - Dimensões nominais (em mm) para tijolos comuns.

Comprimento	Largura	Altura
190	90	57
190	90	90

Fonte: ABNT (1983b)

Os tijolos maciços também devem obedecer a condições específicas de resistência à compressão, de acordo com a categoria em que se encontra, como apresentado pelo Quadro 2.10.

Quadro 2.10 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria

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

Fonte: ABNT (1983b)

13 O TRATAMENTO DO LODO

3.1 Introdução

De acordo com Metcalf & Eddy (1995), entre os produtos resultantes do tratamento de esgoto, o lodo tem o maior volume e requer difícil tratamento e disposição final, e por isso se constitui em um problema complexo que o engenheiro sanitário enfrenta. Os problemas derivados do manejo do lodo são complexos devido a:

- 1) O lodo é formado, principalmente, pelas substâncias responsáveis pelo caráter desagradável das águas residuais não tratadas;
- 2) A fração do lodo a ser disposta, gerada no tratamento biológico da água residual, está composta principalmente pela matéria orgânica presente naquela, mesmo que em forma diferente da original, a qual também está sujeita a processos de decomposição que pode ser indesejável;
- 3) Só uma pequena parte do lodo é composta por matéria sólida.

3.2 Caracterização do lodo

As diversas etapas do tratamento dos esgotos produzem lodos com características peculiares, conforme apresenta o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características dos lodos de ETE.

Tipo de resíduo	Características
Resíduos retidos nas grades	Sólidos grosseiros; pedaços de madeira, papel.
Sedimentos de caixa de areia	Material mineral: solo, partículas orgânicas ligadas aos minerais.
Escuma	Material sobrenadante de decantadores ou de alguns reatores, rico em óleos e graxas. Não

	deve ser misturado ao lodo (uso em agricultura).
Lodo primário	Lodo obtido por sedimentação do esgoto no decantador primário. Normalmente é cinza e tem odor ofensivo. Pode ser facilmente digerido por via anaeróbia.
Lodo secundário (processos lodos ativados)	Aparência floculada e tons marrons; coloração mais escura indica condições anaeróbias do meio. Tende à decomposição anaeróbia devido ao excesso de matéria orgânica. Pode ser digerido sozinho ou mistura com lodo primário.
Lodo digerido aeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura e aparência floculada, odor ofensivo. É facilmente drenado.
Lodo digerido anaeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura ou preta. Se for bem digerido não apresenta odor ofensivo. Também é fácil de ser drenado.

Fonte: Fernandes, 1999

Para o tratamento e disposição adequada de cada tipo de lodo é necessário o conhecimento de algumas características importantes. O Quadro 3.2 apresenta a caracterização físico-química de lodos provenientes do descarte de caminhões limpa-fossa nas cidades de Natal/RN, Florianópolis e Joinville/SC. Os efluentes são oriundos de unidades tipo tanque séptico, sumidouro, fossa absorvente, caixa de gordura, entre outras.

Quadro 3.2 - Caracterização de lodos de Natal/RN, Florianópolis e Joinville/SC, respectivamente.

Parâmetros	Unidade	Média		
		(1)	(2)	(3)
Temperatura	°C	30,0	-	24,0

pH	-	6,9	6,7	7,1
Cor	uH	4813	-	-
Turbidez	uT	7677	-	-
Condutividade	µS/cm	1550	-	-
Sólidos Totais	mg/L	12880	9550	1631
Sólidos Totais Fixos	mg/L	2824	-	984
Sólidos Totais Voláteis	mg/L	5436	6172	736
Sólidos Suspensos	mg/L	7091	6896	492
Sólidos Suspensos Fixos	mg/L	1575	-	-
Sólidos Suspensos Voláteis	mg/L	3471	5019	-
Sólidos Dissolvidos	mg/L	5789	-	-
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg/L	1249	-	-
Sólidos Dissolvidos Voláteis	mg/L	1966	-	-
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	266	-	184
Cloreto	mg/L	254	-	-
Acidez	mg/L	205	-	-
Alcalinidade total	mg/L	498	994	1982
Sulfito	mg/L	-	-	726,02
Sulfeto	mg/L	-	-	16,78
Fósforo	mg P/L	18	45	111
Nitrogênio total	mg N/L	117	-	770
Nitrogênio orgânico	mg N/L	35	-	1,2
Nitrogênio amoniacal	mg N/L	80	116	769
Nitrito	mg N/L	0,00	-	0,02
Nitrato	mg N/L	1,9	-	1,8
Óleos e graxas	mg/L	861	1588	970
DBO	mg/L	2434	2808	2829
DQO	mg/L	6893	10383	7911
Coliformes Termotolerantes	UFC/100 mL	3,16 X 10 ⁷	-	-
Helminhos	Ovos/L	224,50	-	-

Fonte: (1) Meneses, 2001; (2) Belli Filho et al., 2004; (3) Rocha & Sant'Anna, 2005

A identificação dos argilominerais é outro parâmetro importante no estudo das características do lodo. Fontes (2003), através da difração de raios X (DRX) de um lodo de ETE do Rio de Janeiro, percebeu que devido aos picos de pequena intensidade, o material pode ser caracterizado como mal cristalizado; os principais compostos identificados foram o quartzo, a caulinita, a muscovita e a goetita.

Medeiros *et al.* (2006) obtiveram a composição mineralógica para o lodo de tanques sépticos da cidade do Natal (Figura 3.1). Pode-se perceber a predominância do quartzo e da caulinita, que são argilominerais constituintes das nas argilas.

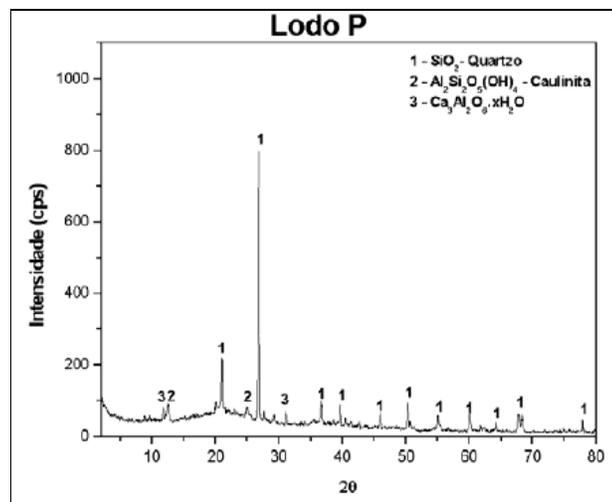


Figura 3.1 - Composição mineralógica do lodo por DRX.
Fonte: Medeiros *et al.*, 2006

3.3 Produção e gerenciamento do lodo

O gerenciamento do lodo de esgoto é uma atividade de grande complexidade e alto custo que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados do sistema de tratamento (ANDREOLI *et al.*, 2001).

De acordo com Cassini *et al.* (2003) os sistemas de tratamento de esgotos geram impactos positivos, como o aumento da qualidade de vida da população, mas é fundamental para essa avaliação promissora a inclusão da gestão adequada dos resíduos gerados na estação.

Os sistemas individuais de tratamento (decanto-digestores, popularmente conhecidos por taques sépticos) também produzem sólidos que precisam ser dispostos adequadamente. No Brasil, de maneira geral, estes sólidos são retirados pelos caminhões limpa-fossa, acabam sendo lançados, sem nenhum controle, em terrenos nos limites da cidade ou nas redes coletoras de esgotos ou águas pluviais, causando impactos nos cursos d'água.

Estima-se que o país gere, por dia, 10.200 toneladas de lodo de decanto-digestores. A situação da disposição destes sólidos, em massa seca, pode ser retratada conforme a Figura 3.2.

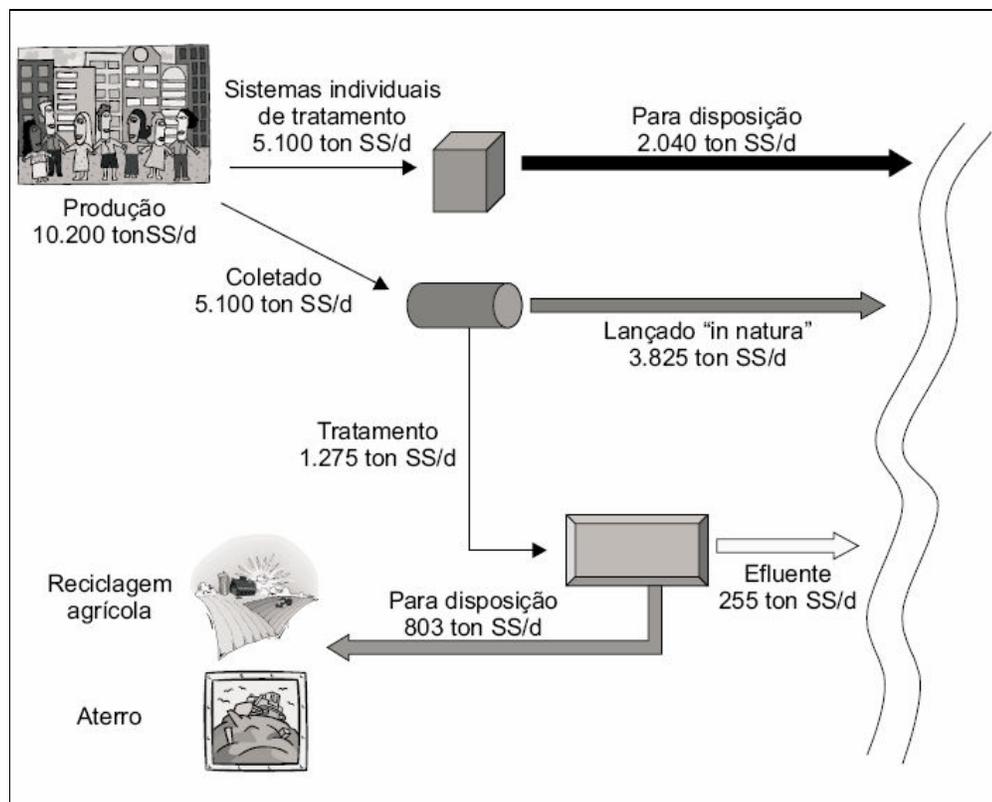


Figura 3.2 - Balanço de lodo gerado no País e sua atual destinação final.
Fonte: Cassini *et al.*, 2003

A quantidade e qualidade do lodo produzido por um sistema de tratamento dependem da vazão e das características do esgoto tratado, do tipo de tratamento e da operação do sistema. O Quadro 3.3 apresenta os valores típicos da produção de lodo em várias modalidades de tratamento.

Quadro 3.3 – Produção de lodo nos diversos tipos de tratamento.

Tipo de tratamento	Quantidade de lodo produzido (m³.hab⁻¹.ano⁻¹)
Lagoa anaeróbia-lagoa facultativa	0,01 a 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 a 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 a 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 a 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 a 1,5
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,07 a 0,1
Fossa séptica – filtro anaeróbio	0,07 a 0,1

Fonte: Ferreira *et al.*, 1999

3.4 Etapas do tratamento do lodo

Os processos de tratamento de esgotos, em sua etapa final, produzem dois tipos de subprodutos: água residuária tratada e resíduos sólidos. Enquanto a primeira pode tanto retornar aos rios quanto ser reutilizada, os sólidos retirados precisam ser estabilizados e dispostos de forma a não causar impactos significativos ao meio ambiente ou à saúde da população (Cassini, 2003).

O tratamento do lodo de esgoto visa corrigir três características indesejáveis do resíduo (AISSE *et al.*, 1999):

- a. Instabilidade biológica: o método mais comum para reduzir o teor de material orgânico biodegradável (presente lodo primário e no lodo aeróbio) é a digestão anaeróbia, sendo também utilizada a digestão aeróbia.
- b. Baixa qualidade higiênica: no esgoto sanitário há grande variedade de vírus, bactérias, protozoários, ovos de nematóides e helmintos;
- c. Grande volume: como a concentração de sólidos no lodo é baixa, seu volume é grande, tornando necessária uma etapa de redução de teor de água.

As etapas do tratamento do lodo e seus principais objetivos são: (ANDREOLI *et al.*, 2001):

1. Adensamento: visa à remoção de umidade (diminuição do volume). É mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores.
2. Estabilização: remoção da matéria orgânica, inibindo o potencial de putrefação do lodo e, conseqüentemente, seu potencial de produção de odores; visa também à redução de microrganismos patogênicos.
3. Condicionamento: preparação para desidratação (principalmente mecânica).
4. Desaguamento: remoção da umidade (diminuição do volume). Os principais objetivos são: redução do custo de transporte para o local de disposição final; melhoria nas condições de manejo do lodo, já que o lodo desaguado é mais facilmente transportado; aumento do poder calorífico do lodo por meio da redução da umidade com vistas à preparação para incineração.
5. Higienização: remoção de organismo patogênico. É uma etapa imprescindível na reciclagem agrícola
6. Disposição final: destinação final dos subprodutos.

As principais tecnologias disponíveis para cada uma das etapas do tratamento do lodo estão esquematizadas no Quadro 3.4.

De acordo com Cassini (2003) a digestão anaeróbia apresenta vantagens significativas em relação a alternativas para a estabilização da matéria orgânica e remoção do nível de patogenicidade do lodo:

- Menor custo de operação;
- Menor custo de implantação;
- Geração de biogás, podendo ser utilizado como fonte de energia;
- Maior facilidade operacional.

Quadro 3.4 – Principais tecnologias para o tratamento do lodo de ETE.

ADENSAMENTO	→	ESTABILIZAÇÃO	→	CONDICIONAMENTO	→	DESIDRATAÇÃO	→	HIGIENIZAÇÃO	→	DISPOSIÇÃO FINAL
• Adensamento por gravidade		• Digestão anaeróbia		• Condicionamento químico		• Leitões de secagem		• Adição de cal (caleação)		• Reciclagem agrícola
• Flotação		• Digestão aeróbia		• Condicionamento térmico		• Lagoas de lodo		• Tratamento térmico		• Recuperação de áreas degradadas
• Centrífuga		• Tratamento térmico				• Filtro prensa		• Compostagem		• Landfarming (disposição no solo)
• Filtro prensa de esteiras		• Estabilização química				• Centrífuga		• Oxidação úmida		• Uso não agrícola (fabricação de materiais cerâmicos, combustíveis)
						• Filtro prensa de esteiras		• Outros (radiação gama, solarização, etc.)		• Incineração
						• Filtro a vácuo				• Oxidação úmida
						• Secagem térmica				• Aterro sanitário

FONTE: Andreoli et al., 2001

3.4.1 Decanto-digestores

Decanto-digestores são tanques simples ou divididos em compartimentos (horizontais ou verticais) nos quais ocorrem, simultaneamente (ANDRADE NETO *et al.*, 1999):

- a) Decantação, sedimentação e flotação dos sólidos dos esgotos;
- b) Desagregação e digestão dos sólidos sedimentados (lodo) e do material flutuante (escuma).

Segundo os autores, o largo emprego destas unidades de tratamento de esgoto se deve a fatores como facilidade de construção -sem a necessidade de projetos ou equipamentos especiais - e operação simplificada. O Quadro 3.5 apresenta as características de produção de lodo dos tanques sépticos.

Quadro 3.5 – Produção de lodo de tanques sépticos.

Sistema	Lodo removido da fase líquida			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (g SS.hab ⁻¹ .d ⁻¹)	Volume de lodo (L.hab ⁻¹ .d ⁻¹)
Tanque séptico	0,20 a 0,30	3 a 6	20 a 30	0,3 a 1,0
Tanque séptico + filtro	0,27 a 0,39	1,4 a 5,4	27 a 39	0,5 a 2,8

Fonte: Cassini *et al.*, 2003

Para Andrade Neto *et al.* (1999) os decanto-digestores, como outros processos anaeróbios, não apresentam alta eficiência, principalmente na remoção de organismos patogênicos; contudo produzem um efluente de qualidade razoável, que pode ser mais facilmente encaminhado a um pós-tratamento ou ao destino final.

A eficiência desses reatores está na faixa de 40 a 70% na remoção de DBO ou DQO e de 50 a 80% na remoção dos sólidos suspensos.

Existem basicamente três configurações de decanto-digestores, funcionalmente distintas entre si, as quais estão esquematizadas nas Figuras 3.3 a 3.5.

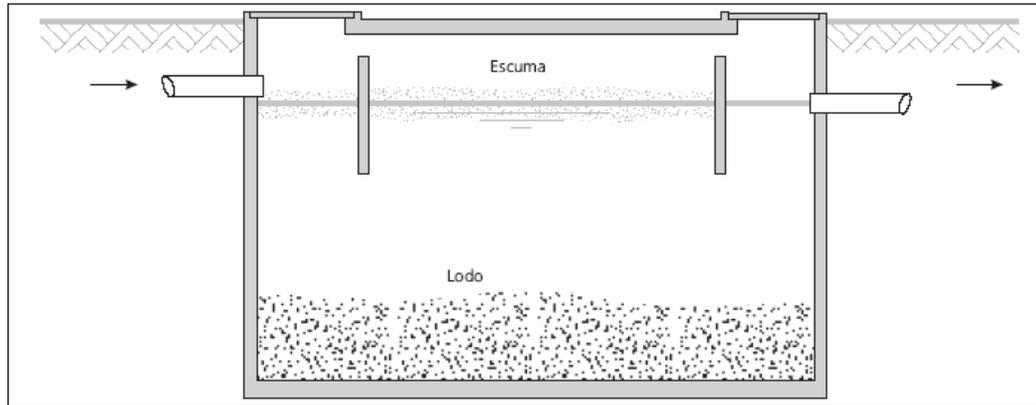


Figura 3.3 - Decanto-digestor de câmara única (corte longitudinal).
 Fonte: Andrade Neto et al., 1999

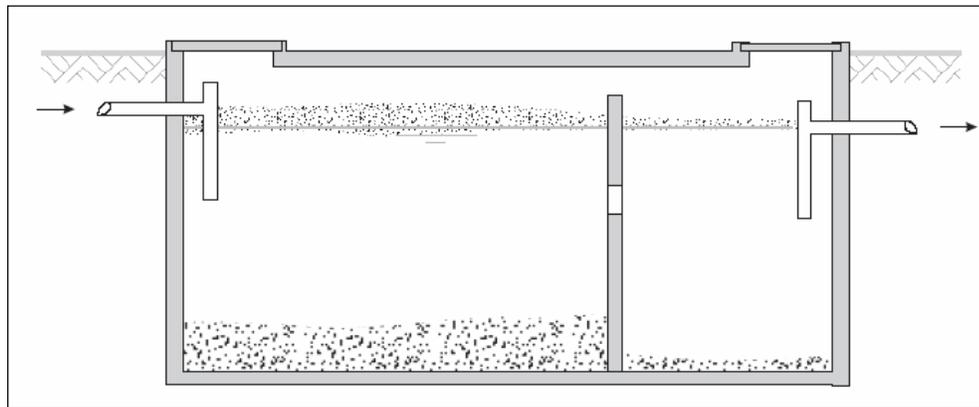


Figura 3.4 - Decanto-digestor de câmaras em série (corte longitudinal).
 Fonte: Andrade Neto et al., 1999

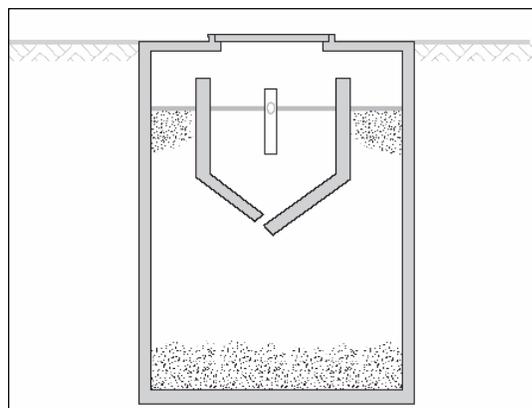


Figura 3.5 - Decanto-digestor de câmaras sobrepostas (corte transversal).
 Fonte: Andrade Neto et al., 1999

Dentre os modelos apresentados, Andrade Neto *et al.*, (1999) afirmam que os decanto-digestores de câmara em série propiciam maior eficiência que os de câmara única, com as mesmas facilidades de construção e operação. Em relação aos de

câmaras sobrepostas, além da maior simplicidade construtiva, os decanto-digestores em série apresentam a vantagem de requerer menor profundidade.

Com o intuito de aumentar a eficiência, Andrade Neto (1997) apresentou um projeto de Decanto-digestor seguido por filtros anaeróbios (DD-FAN), como mostra a Figura 3.6. Este sistema é composto por um tanque prismático retangular com duas câmaras em série, separadas por uma parede janelada, que inclui ainda, um último compartimento: filtro de britas nº 4 de fluxo ascendente. Dois filtros anaeróbios descendentes, afogados, ladeiam o tanque.

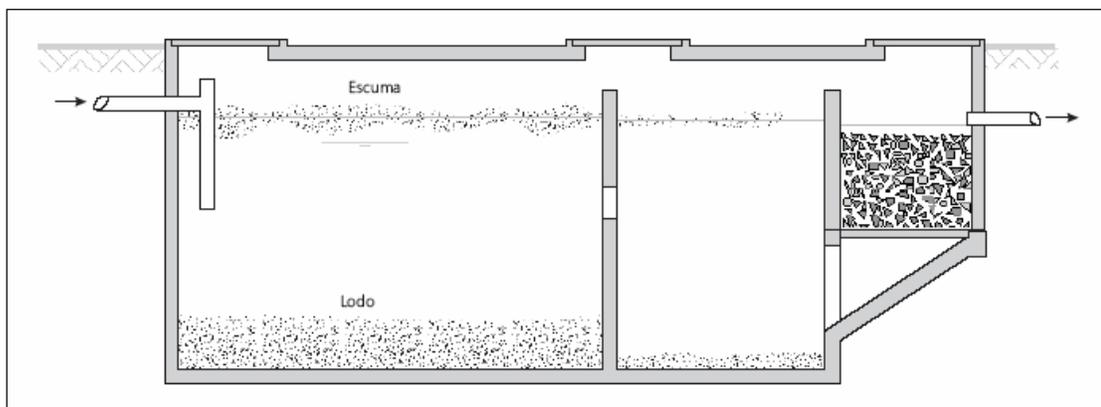


Figura 3.6 - Decanto-digestor com filtro acoplado (corte transversal).
Fonte: Andrade Neto, 1997

Segundo Andrade Neto *et al.* (1999) quando não for previsto um dispositivo próprio, o lodo pode ser removido do tanque séptico através de bombeamento, sucção ou sifonamento; em seguida deve ser conduzido ao local adequado.

Uma alternativa é a utilização de caminhões limpa-fossa, que dispõem de um sistema de sucção a vácuo com tubulação flexível que remove o lodo e o transporta para o compartimento de armazenamento dos próprios caminhões.

Para Gonçalves (2000) esta solução remove o lodo com alto teor de umidade, requerendo grande número de viagens para transportá-lo da ETE até o local de disposição e um custo adicional na operação. Apesar disto, é muito vantajosa devido ao fato de reunir remoção e transporte na mesma operação, além do que os caminhões são facilmente alugados em cidades de médio e grande porte.

Rocha & Sant'Anna (2005) alertam que o recebimento destes despejos deve ser encarado como uma prestação de serviços, que requer garantia da qualidade,

atendimento às exigências legais e satisfação do cliente. Para tanto é necessário o comprometimento das partes envolvidas (concessionárias, prefeitura, empresas limpa-fossa), no sentido de controlar a origem das cargas dos caminhões e evitar que eventuais borras químicas tóxicas atinjam o tratamento biológico.

3.4.2 Leitos de secagem

Os leitos de secagem caracterizam-se por um tanque geralmente retangular com paredes de alvenaria ou concreto e fundo de concreto. A Figura 3.7 apresenta os elementos constituintes de um leito de secagem, descritos em seguida.

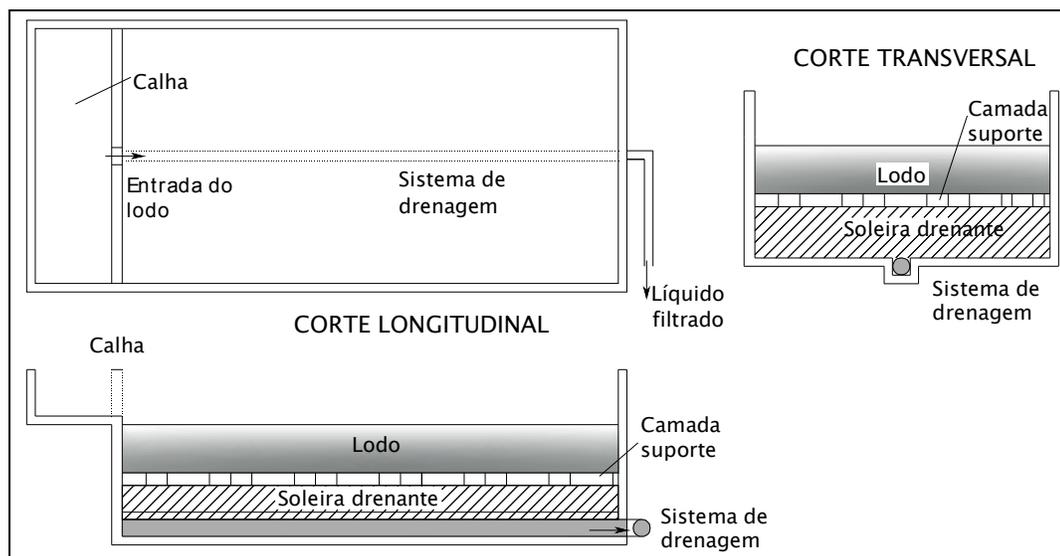


Figura 3.7 – Desenho esquemático de um leito de secagem.
Fonte: ABNT, 1990

- Soleira drenante: permite que o líquido presente no lodo percole por camadas sucessivas de areia e pedregulho com diferentes granulometrias, com aproximadamente 0,50 m de espessura. As camadas são dispostas com grãos de tamanho crescente de cima para baixo, variando de 0,3 mm na parte superior até 76 mm (brita nº 4) na parte inferior.
- Camada suporte: composta de tijolos recozidos ou outros elementos de material resistente à operação de remoção do lodo seco; dispostos normalmente e assentados com areia grossa com juntas de 2 a 3 cm. Tem a

finalidade de possibilitar uma melhor distribuição do lodo, impedir a colmatação e garantir que a retirada do solo seja realizada sem o revolvimento das camadas superficiais da soleira drenante.

- Sistema de drenagem: é constituído de tubos perfurados ou assentados com juntas abertas, com diâmetro mínimo de 100 mm, colocados no fundo do tanque, e que recolhem todo o líquido percolado da soleira drenante. Pode-se instalar, também, o sistema fora do tanque para facilitar a manutenção das canalizações. Neste caso, o fundo do tanque deverá ser bastante inclinado para possibilitar o escoamento do líquido através de orifícios feitos ao longo da parede lateral do tanque.

O leito de secagem é indicado para ETE de pequeno e médio porte. Segundo Ferreira *et al.* (1999) o lodo, ao final do período de secagem, apresenta teor de sólidos de 40 a 75%, de acordo com o clima e período de secagem. No dimensionamento devem-se observar os parâmetros descritos no Quadro 3.6. Algumas vantagens e desvantagem da utilização de um sistema de leito de secagem são apresentadas no Quadro 3.7.

Quadro 3.6 - Parâmetros para dimensionamento de leitos de secagem.

Tipo de lodo	Taxa de aplicação (kg ST/m².ano)	Área (m²/1.000 hab. equiv.)
Anaeróbio primário	120-200	90-140
Anaeróbio primário + ativado	60-100	160-275

Fonte: Gonçalves et al., 2001

Quadro 3.7 - Características do leito de secagem.

Vantagens	Desvantagens
Baixo valor de investimento	Elevada área requerida
Simplicidade operacional	Necessidade de estabilização prévia do lodo (anaeróbio)
Baixo nível de atenção exigido	Influência significativa do clima no desempenho operacional do processo

Necessidade de operador com baixo nível de qualificação	Lenta remoção da torta seca
Baixo ou inexistente consumo de energia elétrica e produtos químicos	Necessidade de elevada mão-obra para retirada da torta seca
Baixa sensibilidade a variações nas características do lodo	Elevado risco de liberação de odores desagradáveis e de proliferação de moscas
Torta com alto teor de sólidos	Risco de contaminação de lençol freático, caso o fundo dos leitos e o sistema de drenagem não sejam bem executados.

Fonte: Andreoli et al., 2001

O processo de leito de secagem pode ser controlado com o objetivo de maximizar a velocidade de secagem por meio de práticas como cobertura do leito, injeção de calor no sistema, elevação da temperatura e renovação do ar (úmido por seco), movimentação do ar e exposição da superfície mais úmida (fundo) por meio do revolvimento. (GONÇALVES *et al.*, 2001).

Gutierrez *et al.* (2006) realizaram uma pesquisa que comparou o teor de umidade do lodo disposto em leito de secagem descoberto e com uma cobertura de telha cerâmica (à semelhança de um telhado residencial). Foi possível concluir que para projeto e operação de leitos de secagem instalados no Município de Belém (clima quente e úmido):

- a. É dispensável este tipo de cobertura dos leitos de secagem utilizados no desaguamento de lodo de tanques sépticos;
- b. É possível utilizar altura da camada inicial de lodo maior do que a normalmente recomendada na literatura técnica (0,30 m), sendo que a altura testada no experimento (0,45 m) permitiu bons resultados no desaguamento de lodo nos leitos de secagem coberto e descoberto;
- c. O volume de sólidos sedimentáveis é um importante parâmetro para o dimensionamento de leitos de secagem, apesar de não ser considerado na NBR 12209/1990;
- d. As precipitações pluviométricas não tiveram grande influência no primeiro ciclo de desaguamento de lodo, o que pode ser explicado pela rápida

percolação das águas pluviais através rachaduras na torta de lodo, logo nos primeiros dias do experimento.

Andreoli *et al.* (2000) realizaram uma pesquisa com o objetivo de analisar algumas alternativas de controle das condições naturais dos leitos de secagem. Estas alternativas consistiam nos seguintes tratamentos: leito de secagem sem intervenção (testemunha), estufa com altura média de 2 m utilizando filme transparente de 100 UV, estufa com queima de biogás e leito coberto com filme plástico transparente diretamente sobre a camada do lodo, constituindo o tratamento de solarização.

Cada um desses tratamentos foi avaliado com e sem revolvimento do lodo, totalizando oito tratamentos. O Quadro 3.8 apresenta as médias de incremento de sólidos para os oito tipos de variações de leito de secagem.

Quadro 3.8 - Incremento de sólidos (%) para os oito tratamentos analisados.

Tratamento	Leito de secagem		Estufa		Estufa com biogás		Solarização	
	sim	não	sim	não	sim	não	sim	não
(%) sólidos	42,0	39,5	55,0	61,0	70,3	64,2	20,9	23,9

Fonte: Andreoli *et al.*, 2000

A partir deste quadro pode-se concluir que, dos tratamentos utilizados, a estufa com emprego de biogás foi a que demonstrou melhores resultados no processo de secagem e incremento de sólidos no lodo de esgoto. Além disso, a utilização do biogás criou um diferencial na secagem quando comparada aos tratamentos que empregaram apenas estufa plástica.

Os autores do referido trabalho afirmam que o processo de solarização tornou a secagem extremamente ineficiente. Este fenômeno, possivelmente, se deve à ação do filme plástico sobre o lodo, pois o plástico diretamente sobre a camada de lodo não permite a perda de água, por intermédio da evaporação, para a atmosfera.

3.5 Alternativas para disposição final do lodo

Para Gonçalves *et al.* (2001), o destino final adequado do lodo é fundamental para o sucesso de um sistema de esgotamento sanitário; no entanto, este assunto tem sido comumente negligenciado, tanto na concepção quanto na operação das ETE's.

O que fazer com o lodo é uma questão que deve ser levantada bem antes da operação da ETE, haja vista que as características do lodo são consequência do tipo de sistema adotado no tratamento do esgoto, e que estas características determinarão as opções de destinação.

Existem inúmeras possibilidades de destinação adequada para o lodo, desde as alternativas que o consideram apenas como um resíduo a ser confinado até as opções que primam pela introdução do seu uso na geração de novos produtos. A escolha por uma ou alternativa deve ser alicerçada sobre as características do sistema, desde os pontos de vista tecnológico, econômico e ambiental.

O Quadro 3.9 apresenta algumas das principais tecnologias comumente adotadas para a disposição final do lodo, tecendo comentários sobre suas características.

Quadro 3.9 - Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição de lodo.

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Descarga oceânica	Baixo custo	Poluição das águas, flora e fauna oceânica
Incineração	Redução drástica de volume	Custos elevados
		Disposição das cinzas
		Poluição atmosférica
		Necessidade de grandes áreas
	Esterelização	Localização próxima a centros urbanos
		Características especiais de solo
		Isolamento ambiental
		Produção de gases e percolado
		Dificuldade de reintegração da área após desativação

"Landfarming"	Degradação microbiana de baixo custo	Acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo
	Disposição de grandes volumes por unidade de área	Possibilidade de contaminação do lençol freático
		Liberação de odores e atração de vetores
		Dificuldade de reintegração da área após desativação
Recuperação de área degradadas	Taxas elevadas de aplicação	Odores
	Resultados positivos sobre a reconstrução do solo e flora	Limitações de composição e uso
		Contaminação do lençol freático, fauna e flora
	Grande disponibilidade de áreas	Limitações referentes a composição e taxas de aplicação
	Efeitos positivos sobre o solo	Contaminação do solo com metais
Reciclagem agrícola	Solução a longo prazo	Contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos
	Potencial como fertilizante	
	Resposta positiva das culturas ao uso	Odores

Fonte: Andreoli *et al.*, 2001

4 O USO DE LODO EM MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 Viabilidade técnica e mercantil do uso de lodo

A utilização de resíduos tem se mostrado uma possibilidade tecnicamente promissora como material constituinte na fabricação de produtos do setor da construção civil. Durante-Ingunza *et al.* (2006) defendem o uso dos resíduos como uma prática ambientalmente correta, tendo em vista a diminuição do consumo de recursos naturais - tanto na forma de matéria-prima quanto na forma de energia - e a redução dos custos e danos ambientais decorrentes das formas inadequadas de disposição final deles.

Com o intuito de investigar as opções para gestão dos resíduos de tratamento de esgoto, Santos (2003) fez uma análise comparativa dos aspectos de mercado os quais estão envolvidos em cada sistema de reciclagem tecnicamente viável. Nesta análise foram avaliadas as seguintes categorias:

- Concorrência com outros produtos;
- Inovações tecnológicas;
- Incentivos aos produtos/sistemas de reciclagem;
- Demanda para o produto reciclado;
- Aspectos do sistema produtivo.

Conforme o resultado obtido, o mercado mais favorável para o uso das tortas de lodo de esgotos foi o da Indústria Cerâmica, seguido pelo mercado da Construção Civil (agregado leve) e por último, o mercado do cimento.

Esta constatação havia sido prevista em um artigo intitulado “O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas”. Nele Menezes *et al.*, (2002) afirmam que a Indústria Cerâmica possui uma enorme capacidade para absorver os resíduos industriais e urbanos devido as suas características de produção:

- a. Natureza heterogênea da matéria-prima;
- b. Possui elevado volume de produção que possibilita o consumo de grande quantidade de resíduos;

Além disso, por ser um resíduo combustível, o lodo de ETE se destaca entre os resíduos citados por Menezes *et al.* (2002) por ser capaz de propiciar economia energética da ordem de 45%.

A respeito da incorporação do lodo como uma solução para a disposição do resíduo, Okuno & Yamada (2000) afirmam que o produto final deve apresentar três características:

1. Ter menor volume do que o resíduo;
2. Não lixiviar metais pesados;
3. A disposição ou venda do produto deve ser contínua a médio e longo prazo.

Existem várias formas de tratamento e disposição dos resíduos sólidos para a obtenção de um produto com estas características, entre elas, a solidificação/estabilização. A solidificação consiste em encapsular resíduos perigosos dentro de uma matriz sólida de grande integridade estrutural; e a estabilização consiste em estabilizar os resíduos perigosos e transformá-los em materiais menos poluente. (HEREK *et al.*, 2005).

Baseando-se nas proposições supracitadas, pode-se extrapolar - para lodos de ETE's - a conclusão que Sabbag & Morita (2003) obtiveram sobre lodos de ETA's, a qual afirma que os benefícios na utilização de lodos na indústria cerâmica são:

- a. Possível aumento da vida útil da jazida e redução dos custos de recomposição de áreas com vegetação nativa, favorecendo aos ceramistas;
- b. Solução definitiva, para a concessionária de serviços de saneamento, da disposição do lodo;
- c. Conservação do meio ambiente pela redução da supressão da vegetação devido à atividade extrativa, e pela redução da poluição aquática causada pelo lançamento de lodos nos corpos d'água.

Weng *et al.* (2003), com base em resultados obtidos em escala industrial, afirmam que os benefícios provenientes da utilização de lodo ou cinzas de lodo como aditivo em tijolos ou telhas incluem:

- a. A imobilização de metais pesados na matriz cerâmica pós-queima;
- b. À oxidação da matéria orgânica;
- c. Destruição de qualquer patógeno durante o processo de queima.

4.2 Uso de lodos industriais em produtos cerâmicos

Herek *et al.* (2005) analisaram blocos cerâmicos de um tijolo de seis furos, em escala reduzida, confeccionados com lodo seco oriundo de uma ETE de indústria têxtil. O trabalho demonstrou que a fabricação dos blocos pode ser uma alternativa viável, uma vez que a presença de fibras têxteis no lodo deve ter contribuído para o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova fabricados com 10% de lodo; embora tenha havido dificuldade em manter a homogeneidade da massa cerâmica quando se trabalhou com 20% de lodo.

Ainda neste trabalho, os resultados do teste de lixiviação e solubilização mostraram que o processo de solidificação/estabilização, devido à matriz cerâmica, levou a uma excelente retenção dos metais avaliados.

Balasubramanian *et al.* (2006) também estudaram o uso de lodo de indústria têxtil através de uma avaliação do comportamento físico de vários materiais de construção, entre eles o tijolo maciço. Os autores explicam que a presença de cálcio e magnésio, provenientes da coagulação utilizada nesta indústria, confere, ao lodo, características úteis aos materiais de construção. Neste trabalho os tijolos com 10% de lodo apresentaram resistência à compressão maior do que a requerida pela legislação da Índia, o que comprova a adequação do lodo na indústria cerâmica.

Outro setor cujo uso de lodo em cerâmica está despontando é a indústria de papel e celulose. De acordo com Campregher (2006), através de prensagem mecânica, dosagem de 5% de lodo em base seca e utilizando temperaturas de 950°C, foram obtidos corpos-de-prova que atendem à legislação brasileira nos quesitos absorção, porosidade e resistência à compressão.

A possibilidade de adição de resíduos das indústrias de mármore e granito na fabricação de produtos cerâmicos também se destaca no campo da disposição final do lodo. A adição do lodo de indústrias de mármore e granito, em proporções superiores a 50%, pode ser utilizada em materiais argilosos, sem diminuição de suas propriedades mecânicas. (ACCHAR *et al.*, 2006).

Romano Neto *et al.* (2005) realizaram uma pesquisa visando à aplicação industrial do lodo proveniente do tratamento dos efluentes de drenagem ácida de minas, misturado com as argilas utilizadas pela indústria cerâmica do sul de Santa Catarina. Em relação aos blocos cerâmicos compostos por argilas de queima vermelha e lodo,

os resultados mostram que não há mudanças significativas nos parâmetros de queima absorção d'água e retração. Já em termos de resistência à compressão, houve um acréscimo, da ordem de 14%, nos corpos de prova moldados com 15 % de lodo. No entanto, os blocos com argila de queima branca e lodo apresentaram a formação de coração-negro.

Alves & Holanda (2005) avaliaram a incorporação do resíduo borra oleosa *in natura*, proveniente do processamento primário dos fluidos na exploração e produção de petróleo e constataram que até o teor de 20% em peso, não houve comprometimento das características essenciais de qualidade do bloco cerâmico, nem risco à saúde humana bem como não houve prejuízo ao meio ambiente. Com adição de um teor até 10% em peso verificou-se um aumento da resistência mecânica.

Os autores observaram que houve formação de eflorescência nos blocos para todos os níveis de incorporação e por isso alertam para a necessidade de avaliação do teor total de sais solúveis na discussão da incorporação de resíduos em artefatos cerâmicos.

Em um trabalho voltado ao estudo da avaliação ambiental da incorporação de resíduos de siderurgia, Oliveira & Holanda (2004) concluíram, através dos ensaios de lixiviação/ solubilização e emissão de gases, que a preparação de produtos da indústria cerâmica vermelha contendo até 3% do resíduo não oferece nenhum risco direto ao meio ambiente.

4.3 Uso de lodo de ETA

Nuvuolari & Figueiredo (2004) avaliaram a opção pelos produtos cerâmicos em uma pesquisa com a incorporação de lodo de ETA na fabricação de tijolos maciços. Através do trabalho concluíram que os valores de concentração de radioatividade no lodo são inferiores aos valores obtidos para o solo, porquanto não haveria problema quanto a sua utilização como material de construção civil.

Neste mesmo trabalho, os autores avaliaram a resistência à compressão dos tijolos, e verificaram que, de acordo com a NBR-6460 (ABNT, 1983a), os tijolos moldados com a adição de 10% de lodo podem ser enquadrados na Categoria B (2,5 MPa), já

os tijolos aditivados com 20%, 30% e 40%, podem ser enquadrados na Categoria A (1,5 MPa).

Os resultados do trabalho de Teixeira *et al.* (2006) mostram que o lodo de ETA pode ser incorporado em massa cerâmica usada para produzir tijolos e telhas, porém esta incorporação dos lodos, em geral, piora as propriedades físicas e tecnológicas do material cerâmico. Além disso, os autores afirmam que as características físicas e cerâmicas do lodo e da argila irão definir a possibilidade ou não de incorporação e a dosagem, para cada temperatura de queima.

Durante a pesquisa, a empresa responsável pela ETA utilizou dois tipos de flocculantes: (A) sulfato de alumínio e (B) cloreto férrico. Em uma comparação do desempenho, os resultados indicam que os corpos-de-prova moldados com o lodo da ETA-A foram sempre piores que os com ETA-B. Foi observado que é possível adicionar até 10% do lodo ETA-A e 20% do lodo ETA-B, para temperaturas de queima a partir de 950°C.

Com o intuito de propor uma solução para a contaminação dos mananciais - causada pelas altas concentrações de metais, principalmente alumínio - Prim *et al.* (2006) propuseram o uso deste lodo como cobertura de aterro sanitário. Do trabalho de Prim *et al.* (2006) pode-se concluir que a utilização proposta é viável, necessitando apenas de 5% de estabilizante.

Souza (2006), em um estudo que avaliou a eco-eficiência de argamassas fabricadas com lodo de ETA, concluiu que, em termos de resistência à compressão axial, a adição de até 4% de lodo, substituindo o agregado miúdo natural, possibilitou a obtenção de concretos com características similares às dos concretos convencionais.

Hoppen *et al.* (2005) também constataram que a adição do lodo de ETA em matrizes de concreto é uma alternativa viável uma vez que promove reduções significativas no consumo de agregados naturais e, principalmente, de cimento.

Estes autores concluíram que os traços com até 5% de lodo podem ser aplicados na fabricação de peças de concreto (tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para equipamentos) e até na construção de pavimentos rígidos de cimento Portland. Em relação às misturas com teores acima de 5%, a sua utilização é restrita a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial, como contrapisos, calçadas e pavimentos residenciais.

4.4 Uso de cinza de lodo

Cheeseman & Viridi (2005) realizaram um estudo com o intuito de obter materiais alternativos aos agregados naturais, cuja extração gerava impactos ambientais negativos e havia sido taxada pelo governo do Reino Unido. Os resultados obtidos por estes autores indicam que os pellets fabricados com cinza de lodo de esgoto podem ser produzidos com as propriedades fundamentais (densidade, absorção de água e resistência à compressão) similares ou superiores aos agregados comerciais, utilizando métodos usuais como peletização e temperatura de sinterização relativamente baixa.

Este tipo de uso também foi observado por Okuno & Yamada (2000), que realizaram uma avaliação de processos industriais implementados com cinza de lodo, na cidade de Tóquio. Com esta pesquisa os autores concluíram que os processos de fabricação de agregado artificial leve, de escória e de tijolo são tecnicamente viáveis e comercializáveis.

Okuno *et al.*, (2004) avaliaram, em relação à viabilidade econômica e risco ambiental, quatro processos de solidificação térmica. Os itens de comparação foram:

1. Custo de produção e preço de venda;
2. Contabilização do montante de dióxido de carbono emitido na vida útil do projeto.

Sobre este item, os autores puderam observar que o maior emissor de CO₂ é a fabricação de tijolos e o menor, a fabricação de escória. No que concerne ao primeiro item, os custos de fabricação foram 148,55; 1,94; e 6,86% maiores do que os custos de venda da escória, do tijolo e do agregado, respectivamente. Ainda nesta pesquisa, os autores indicaram que o uso de cinza de lodo na indústria de cimento Portland surge como uma opção mais atrativa.

No Brasil, esta opção foi estudada por Geyer (2001) e Fontes (2003), que concluíram que o concreto é uma alternativa benéfica do ponto de vista ambiental e técnico para dispor este tipo de resíduo: os poluentes considerados perigosos foram encapsulados na matriz cimentícia e as propriedades físicas e mecânicas foram melhoradas, com uma redução no consumo de cimento Portland nas misturas.

Segundo Geyer (2001) as possibilidades de utilização das cinzas em concretos se mostram restritas a concretos de baixa resistência. Para Fontes (2003), a redução na resistência à compressão é pequena para uma substituição de até 30% de lodo, em relação à mistura feita apenas com cimento Portland; além disso, a capacidade de absorção dos corpos-de-prova aditivados com lodo foi reduzida, resultando numa estrutura mais durável. Tal fenômeno é explicado pela granulometria do lodo ser mais fina do que a do cimento.

Lin & Lin (2004) realizaram uma pesquisa comparando cimentos (pastas de eco-cimento - PEC) fabricados com quatro composições distintas: o primeiro sem adição de cinza e os demais com adições, em diferentes dosagens, de cinza de lodo de ETE e ETA. O estudo concluiu que a maioria dos componentes do PEC foi encontrada nos outros três cimentos e que entre estes, o PEC-A (6,49% cinza ETE; 10,33% cinza ETA; 1,93% ferrato e 81,25% calcário) obteve desempenho similar ao PEC em termos de composição química e resistência à compressão. Contudo, a presença de metais pesados no cimento pode gerar reações adversas com os aditivos comuns usados no concreto.

Sayed *et al.* (1995) observaram que as cinzas de lodo de ETE de Lodos Ativados podem ser utilizadas como substituto parcial (5%) do filler em misturas de concreto asfáltico. Todos os padrões locais foram satisfeitos com esta adição ótima e, apesar um decréscimo na estabilidade Marshall dos corpos-de-prova testados em temperaturas elevadas (70 e 80°C), a substituição é recomendada para ambientes quentes, similares ao local de estudo (Golfo da Arábia).

Nesta mesma linha de estudo Medeiros (2006) concluiu que a substituição de filler por lodo calcinado (parcela do material que passou na peneira nº 200 e que permaneceu em forno mufla por três horas em 900°C) resultou em misturas asfálticas mais estáveis e mais resistentes à tração.

Lin *et al.* (2005) confirmaram a viabilidade da adição de cinza de ETE na fabricação de telhas. Os benefícios desta adição são: menor fissuração na queima, leveza da peça após a queima e abrasão satisfatória. Além disso, há um aumento, diretamente proporcional à temperatura de ignição do lodo, na estabilização dos metais pesados. As desvantagens são menor resistência à flexão e maior absorção de água.

Em relação à melhoria de solos, Lin *et al.* (2007) analisaram cinco dosagens de uma mistura de cinza de lodo de esgoto e cal hidratada (4:1) com solo coesivo e

concluíram que a dosagem de 8% da mistura com o solo pode melhorar ou estabilizar as características de um solo pobre.

4.5 O uso de lodo de esgoto na fabricação de tijolo cerâmico

Liew *et al.* (2004a) em estudos realizados na Malásia adições de lodo de ETE em matriz cerâmica para fabricação de tijolos maciços, concluíram que a dosagem de 20% de lodo de ETE em base seca é tecnicamente viável, no que diz respeito à absorção e à resistência à compressão. Para dosagens acima de 30%, os tijolos se tornam frágeis e quebradiços. Em todas as proporções observou-se a diminuição do acabamento da superfície, o que torna inviável a utilização destes tijolos em alvenarias aparentes.

Liew *et al.* (2004b), abordando parâmetros ambientalmente relevantes, ou seja, lixiviação e solubilização, concluíram que a adição de até 40% de lodo não resulta em tijolos com presença detectável de elementos tóxicos. Além disso, nenhum dos tijolos fabricados com lodo apresentou diferença de odor em relação aos tijolos convencionais.

Outros autores também relatam suas pesquisas com tijolos fabricados com lodo e/ou cinza de lodo de esgoto, como mostram os Quadros 4.1 e 4.2.

Quadro 4.1 – Desempenho dos tijolos maciços com adição de lodo seco de esgoto.

% lodo	Absorção de água (%)							
	(1)	(2)		(3) temperatura °C				(4)
		LD1	LD2	880	920	960	1000	
0	0,03	9,9	9,9	16,8	20,7	10,5	4,9	23,6
10	0,74	8,2	8,6	22,3	20,7	14,8	5,6	26,7
20	1,37	9,7	7,1	28,2	26,6	20,5	11,8	29,0
30	2,58	10,8	6,0	37,7	32,0	27,6	18,8	33,1
40	3,63	-	-	45,3	44,0	36,8	26,2	37,0
% lodo	Resistência à compressão (MPa)							
0	87,2	4,38	4,38	13,5	15,0	19,6	21,2	15,8

10	59,9	3,39	2,68	10,4	12,0	16,2	21,8	8,9
20	45,9	2,49	2,02	4,9	9,0	9,7	19,9	5,4
30	39,5	1,52	1,17	2,6	5,3	6,5	11,8	3,1
40	37,9	-	-	1,7	2,2	3,8	5,4	2,0
(1) tijolos reduzidos, conformação por extrusão e temperatura de queima superior a 1000°C;								
(2) tijolos reduzidos, moldados manualmente com formas de madeira e queima a 950°C. LD1 - lodos ativados; LD2 – reator anaeróbio de fluxo ascendente.								
(3) Massa mistura em máquina de vácuo e conformada em moldes com 23x11x6cm								
(4) Tamanho real, mistura e conformação manual, compactação por soquete; queima a 985°C.								

Fonte: (1) Tay, 1987; (2) Nuvuolari, 2002; (3) Weng *et al.*, 2003; (4) Liew *et al.*, 2004a

Quadro 4.2 – Desempenho de tijolos maciços com cinza de lodo de esgoto.

% lodo	Absorção de água (%)				Resistência à compressão (MPa)			
	(1)	(2)	(3)		(1)	(2)	(3)	
			LD1	LD2			LD1	LD2
0	0,03	-	4,4	4,4	87,2	-	9,9	9,9
10	0,07		3,2	3,2	85,7	-	13,6	13,1
20	0,11	-	4,1	2,7	80,0	-	15,4	15,0
30	1,39	-	4,0	3,3	70,7	-	17,6	16,6
40	1,52	-	3,0	3,0	70,5	-	21,3	18,2
50	1,70	-	-	-	69,4	-	-	-
100	-	2-12	-	-	-	>100	-	-
(1) tijolos reduzidos, conformação por extrusão e temperatura de queima superior a 1000°C;								
(2) escala real, conformação por alta pressão e queima a 1000°C.								
(3) tijolos reduzidos, moldados manualmente com formas de madeira e queima a 950°C. LD1 - lodos ativados; LD2 – reator anaeróbio de fluxo ascendente.								

Fonte: (1) Tay, 1987; (2) Okuno & Yamada, 2000; (3) Nuvuolari, 2002.

Em uma revisão dos resultados apresentados por pesquisas anteriores, Nuvuolari (2002) percebeu que foram utilizados métodos diferentes de conformação, diferentes temperaturas de queima, além de, logicamente, de materiais argilosos e lodos com composições distintas. Os valores de resistência à compressão, cujo valor mínimo,

pela norma brasileira, é de 1,5 MPa (ABNT, 1983b) está muito aquém dos resultados apresentados.

Tal fato torna difícil a comparação entre as pesquisas citadas, o que motivou o autor a propor uma metodologia padronizada. No seu estudo intitulado “Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos maciços: aspectos tecnológicos e ambientais” Nuvuolari (2002) utiliza lodos e cinzas de lodo provenientes de duas ETE’s: uma com lodos ativados e outra de um RAFA.

Este estudo concluiu que para as massas cerâmicas aditivadas com lodo seco a 105°C, proveniente das duas ETE’s, apenas a dosagem de 10% atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão. Para as massas fabricadas com as cinzas de lodo, a dosagem de até 40% apresentou-se como tecnicamente viável, além de resultarem em tijolos que podem ser classificados como um resíduo não perigoso, apesar de não-inerte.

Justificada por limitações técnicas, a metodologia adotada por Nuvuolari (2002) prevê a moldagem de tijolos maciços com dimensões reduzidas, a saber, 10x5x2,5 cm. Isto pode, a semelhança dos outros autores, inviabilizar a comparação, já que os resultados nem sempre podem ser extrapolados para a escala real.

Alleman & Berman (1984) analisaram tijolos furados, conformados por extrusão, nas escala industrial e de bancada, utilizando o lodo com baixa umidade e sem indícios de metais pesados.

Na escala de bancada foi constatado que o odor dos tijolos com lodo é semelhante ao dos tijolos sem lodo; a densidade e a resistência à compressão diminuíram com o acréscimo de lodo na dosagem; e a absorção de água é diretamente proporcional ao aumento da dosagem. O Quadro 4.3 apresenta um resumo dos resultados.

Quadro 4.3 - Resultados da pesquisa em escala industrial.

Dosagem de lodo (%)	Aparência	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água quente 5 h de imersão (%)
0	Excelente	60,53	5,1
15	Excelente	45,77	-
30	Excelente	43,19	11,5
50	Excelente	44,02	9,3

Fonte: Alleman & Berman, 1984

Aplicando os critérios da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a saber, resistência à compressão mínima de 20,7 MPa e absorção de água menor que 17%, os resultados mostraram que o limite da adição de lodo é está na faixa de 25 a 30% em volume.

Tay & Show (1997) realizaram uma revisão dos avanços das pesquisas em lodo em período de dez anos (1987-1997) na área de utilização de lodo como tijolo, como agregado leve e como componente do cimento. A pesquisa concluiu que os quatro principais estudos com tijolos obtiveram resultados de resistência à compressão bem discrepantes, e atribui este fato à diferença entre os métodos de teste, ao material argiloso e ao tamanho dos tijolos usados como corpo-de-prova nos estudos; concluiu ainda que o lodo e a cinza do lodo podem ser adicionados à massa cerâmica em uma dosagem máxima, em peso seco, de 40% a 50%, respectivamente.

O Quadro 4.4 mostra os valores, em média, da resistência mecânica dos tijolos. Com exceção dos tijolos queimados na própria indústria e da ETE (P) a 850°C, valores superiores aos tijolos testemunhas. Todos os tijolos estão em conformidade com a NBR 7171/92 (mínimo = 1 MPa).

Quadro 4.4 - Resistência mecânica dos tijolos furados.

Descrição dos tijolos		Resistência à compressão	
		Cerâmica A	Cerâmica B
Testemunhas		1,35	3,11
Queimados a 1050°C	ETE (U)	1,53	2,35
	ETE (P)	2,02	2,82
Queimados a 950°C	ETE (U)	1,39	2,31
	ETE (P)	1,43	2,85
Queimados a 850°C	ETE (U)	1,38	2,36
	ETE (P)	1,18	2,71
Queimados à lenha	ETE (U)	1,25	1,60
	ETE (P)	1,16	2,09

Fonte: Durante-Ingunza *et al.*, 2006

Neste estudo pode-se observar que, quando era formada uma massa cerâmica com pouca umidade, o tijolo se tornava quebradiço, podendo obstruir a extrusora; quando a umidade era elevada, resultava em tijolos sem consistência. A umidade ideal para extrusão da massa cerâmica utilizada na confecção de tijolos está entre 10 e 30%

Jórdan *et al.* (2005) analisaram as propriedades tecnológicas de corpos-de-prova de 5x5cm e detectaram que não há uma relação entre os valores de retração linear e a porcentagem de lodo. Já os parâmetros de absorção de água e resistência à flexão estão linearmente relacionados à quantidade de lodo: o primeiro é diretamente e o segundo, inversamente proporcional à dosagem de lodo na massa cerâmica.

Apesar de a resistência ser um dos parâmetros primordiais no controle da qualidade, outros fatores são relevantes na introdução do lodo como componente da indústria cerâmica. O isolamento térmico das construções, conferido pelos materiais cerâmicos, podem promover uma economia de energia para adequação da temperatura, pois dificultam a troca de calor do ambiente interno com o externo.

Esta característica foi o que incentivou a pesquisa de Cusidó *et al.* (1996), a qual consistiu na produção de tijolos cerâmicos de baixa densidade, formados a partir de misturas de argila, serragem e lodo de ETE, denominados Ecobrick®. Como a fração orgânica é volatilizada a altas temperaturas, surgem vazios no interior dos tijolos, tornando-os porosos e conseqüentemente, favorecendo o isolamento térmico. O resultado deste estudo está contido Quadro 4.5, que apresenta uma comparação do consumo teórico de energia para casas construídas com quatro tipos diferentes de alvenarias.

Quadro 4.5 - Consumos de energia para quatro tipos de alvenarias.

Projeto da alvenaria	FES	% CAA
Somente tijolo (espessura = 30 cm)	26,6	100
Tijolo (e = 15 cm) + Ecobrick® (e = 15 cm)	30,2	83
Parede de isolamento multicamadas (e = 15 cm)	35,6	64
Ecobrick® (e = 29 cm)	40,6	51

FES = Fração de Economia Solar (Ganho útil de calor do sol / perdas térmicas)

CAA = Consumo de Aquecimento Auxiliar para manter a temperatura de 21°C.

Fonte: Cusidó *et al.* (1996)

Os autores constataram que a casa construída com paredes de Ecobrick® obteve um melhor aproveitamento da energia solar e consumiu de menos energia elétrica para manter a temperatura do ambiente aquecida.

4.6 A Legislação vigente

Não existe, no Brasil, uma legislação que regulamente o uso do lodo como material da construção civil. Contudo, a NBR 10004 (ABNT, 2004a) pode fornecer os parâmetros para a análise do risco ambiental deste tipo de destinação, considerando que os materiais de construção, após seu uso e conseqüente demolição, se constituem em um resíduo.

A NBR 10004 (ABNT, 2004a) estabelece os critérios de classificação dos resíduos de acordo com sua periculosidade. Esta característica é uma função das propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas do resíduo, e resultar em:

- Risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- Riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Segundo a NBR 10004 os resíduos são classificados em:

- Resíduos classe I - Perigosos;

São aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das características seguintes, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Um resíduo é caracterizado como tóxico se uma amostra representativa dele contém contaminantes, obtidos pelo teste de lixiviação (ABNT, 2004b), em concentrações superiores aos valores constantes no anexo F.

Os resíduos gerados nas estações de tratamento de esgotos domésticos e os resíduos sólidos domiciliares, excetuando-se os originados na assistência à saúde da pessoa ou animal, não serão classificados segundo os critérios de patogenicidade.

- Resíduos classe II – Não perigosos;

Os resíduos não perigosos podem ser divididos em:

- 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.

Aqueles resíduos que, conforme o ensaio preconizado pela NBR 10006 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

4.7 O futuro do uso do lodo

Ângulo *et al.* (2001) ressaltaram a necessidade de marcas de qualidade ambiental como uma ferramenta de marketing, como existe em outros países. Todavia, os autores alertam para o risco de o consumidor leigo associar o produto reciclado a um produto de baixa qualidade; e ressaltam que a generalização deste tipo de uso só ocorrerá mediante uma forte ênfase na educação ambiental da população.

Desta forma, o poder público deve estar inteiramente envolvido nessa nova concepção de destinação do lodo, já que tem o papel decisivo na reutilização de rejeitos, através da imposição de normas severas e fiscalização rígida que impeçam a poluição do meio ambiente (MENEZES *et al.*, 2002).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar o percentual máximo de lodo de esgoto que pode ser incorporado à massa cerâmica, o presente experimento consistiu na fabricação de tijolos cerâmicos em escala real e na avaliação técnica e ambiental dos mesmos, observando às normas pertinentes.

Os tijolos maciços, contendo 0%, 5%,10%, 15%, 20%, 25%,30%, 35% e 40% de lodo, com as dimensões de 220x105x45 mm (ABNT, 1983b), foram moldados, com prensa manual, em laboratório e queimados em forno industrial. A fabricação deles obedeceu à rotina usual de uma indústria cerâmica – com algumas inserções que visam maximizar a qualidade do produto final, além de garantir o rigor científico necessário – e foi dividida em cinco partes, as quais serão descritas a seguir, ressaltando as normas e os métodos empregados.

5.1 Coleta e preparação das matérias-primas

Neste trabalho foram utilizadas duas argilas com características distintas, provenientes do pátio de sazonalidade de uma indústria de blocos cerâmicos, localizada no município de Goianinha/RN; e o lodo oriundo de uma empresa de caminhões limpa-fossa da cidade do Natal/RN.

As argilas foram retiradas pelos funcionários da indústria, empregando-se pá-carregadeira e pá manual, sendo posteriormente acondicionadas em sacos plásticos identificados, como mostram as Figuras 5.1.

O lodo foi desaguado no leito de secagem da ETE do Campus da UFRN (Figura 5.2) e retirado quando apresentou forma de torrões secos. Em seguida, o lodo também foi acondicionado em sacos plásticos identificados.



Figura 5.1 - Pá-carregadeira retirando argila.



Figura 5.2 – Leito de secagem ETE-Campus.

Para o ensaio de granulometria conjunta por peneiramento e sedimentação, bem como para a determinação dos limites de consistência, os materiais foram secos ao ar e destorroados manualmente (Figura 5.3).

Devido à dificuldade de se obter a finura requerida para os ensaios de Granulometria por Difração a Laser, Difratomia de Raios X e Fluorescência de Raios X, o lodo foi destorroado no moinho de bolas por uma hora (Figura 5.4).

Para o primeiro ensaio, a alíquota de material passou pela peneira com abertura de malha igual a 0,42mm (# nº 40), enquanto para os dois últimos ensaios, pela peneira com abertura de malha igual a 0,0375mm (# nº 300).



Figura 5.3 – Destorroamento das argilas.

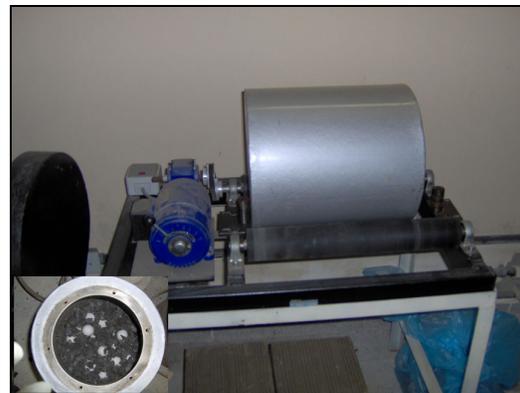


Figura 5.4 – Moinho: destorroamento do lodo.

Para a fabricação dos tijolos, as matérias-primas foram secas em estufa a 105°C por 24 horas. Por ser desnecessária a obtenção de partículas muito finas e por haver demanda de grandes quantidades, as argilas foram destorroadas com o auxílio da

Máquina de abrasão Los Angeles (Figura 5.5). O lodo, devido ao risco de contaminação da máquina, foi destorroado manualmente. Em seguida os materiais passaram por uma peneira com abertura de malha de 5 mm, sendo descartado o que nela ficou retido (Figura 5.6).



Figura 5.5 – Máquina de abrasão Los Angeles.



Figura 5.6 – Peneiramento dos materiais.

5.2 Caracterização das matérias-primas

5.2.1 Análise Granulométrica

Representada graficamente pela Curva Granulométrica, esta análise resulta na determinação da distribuição de tamanho de partículas da amostra e das proporções relativas em que elas se encontram.

O ensaio padronizado pela NBR 7181 (ABNT, 1984c) é dividido em três partes:

1. Peneiramento da granulometria grossa: consiste em pesar o material retido em cada uma das peneiras com abertura de malha superior a 2 mm.
2. Sedimentação: consiste em medir, em diferentes intervalos de tempo, a densidade de uma solução composta pelo defloculante e pelo solo que passa na peneira de 2 mm. Para a realização desta fase é necessária a determinação da densidade real, explicitada no item 5.2.2.
3. Peneiramento da granulometria fina: consiste em pesar o solo proveniente da sedimentação, após secagem, nas peneiras com abertura de malha entre 1,2 e 0,074 mm.

O lodo, devido a sua putrescibilidade, não foi analisado conforme a norma estabelecida. O método de ensaio foi substituído pela difração a laser, com a amostra dispersa em água destilada e detergente neutro sob agitação mecânica, realizada no laboratório de Materiais Cerâmicos Especiais, do Departamento de Física Teórica e Experimental (DFTE/UFRN).

5.2.2 Densidade real

Foi utilizado o método do picnômetro aquecido, estabelecido pela ME 093 (DNIT, 1999). A técnica consiste em medir os pesos do picnômetro vazio (Figura 5.7) e do picnômetro com outros conteúdos, como água destilada, amostra de solo e amostra de solo + água (Figura 5.8).



Figura 5.7 – Pesagem do picnômetro vazio.

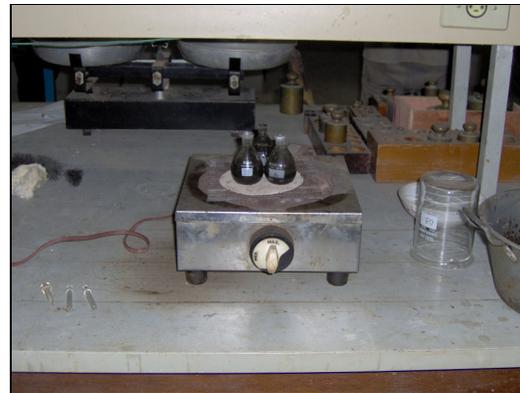


Figura 5.8 – Aquecimento do picnômetro contendo solo e água destilada.

5.2.3 Limites de consistência

Sabe-se que para as partículas finas, a análise granulométrica não é suficiente para a caracterização do solo, pois os argilominerais em contato com a água conferem características distintas do material seco. Desta forma, é preciso o estudo dos limites de consistência para um melhor prognóstico do comportamento das argilas.

- Limite de liquidez (LL)

A determinação do Limite de Liquidez é feita com o aparelho de Casagrande. Com os valores obtidos (números de golpes para fechar o sulco da amostra, feito

com um cinzel, e as umidades correspondentes) traça-se a linha de escoamento do material.

A técnica do ensaio é preconizada pela NBR 6459 (ABNT, 1984a). Por definição, o Limite de Liquidez do solo é o teor de umidade pelo qual o sulco se fecha com 25 golpes.

- Limite de Plasticidade (LP)

O Limite de Plasticidade é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade na qual o solo começa a fraturar, quando se tenta moldar com ele um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento.

Apesar da ausência de mecanização satisfatória, o ensaio é normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 1984 b).

- Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade define a zona em que o material se acha no estado plástico e é obtido através da diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, conforme mostra a Equação 5.1.

$$IP = LL - LP \qquad \text{Equação 5.1}$$

Segundo suas características e propriedades físicas mais importantes, os solos finos podem ser divididos em oito grupos: argilas inorgânicas de alta, média e baixa plasticidade; solos siltosos inorgânicos de alta, média e baixa compressibilidade; argilas orgânicas e siltes orgânicos. A classificação de uma amostra em um destes grupos pode ser feita através do gráfico de plasticidade de Casagrande (CAPUTO, 1988).

5.2.4 Caracterização química

A fluorescência de raios X (FRX) permite determinar a composição química e os metais em baixas concentrações (poluentes). Utilizou-se espectrômetro de raios X por energia dispersiva modelo Ray-ny EDX-800, marca *Shimadzu*. Os resultados de análises químicas foram expressos em base de óxidos.

As análises foram realizadas no Laboratório de Meio Ambiente do Centro de Tecnologias do Gás – Ctgás.

5.2.5 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica de cada matéria-prima consistiu na análise dos seus respectivos difratogramas de raios X (DRX). Estes gráficos foram gerados pelo Difratômetro de raios-X, modelo XRD-6000, marca Shimadzu, com varredura de 2°/min com 2θ de 0° a 60°. Os picos identificados através do software *Xpert High Score*. O equipamento de DRX pertence ao Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural (NEPGN/UFRN).

5.3 Escolha da formulação

Como já foi explicitada no Capítulo 2, a formulação é uma etapa de estudo das matérias-primas, anterior à fabricação do produto, cujo objetivo é encontrar uma proporção ótima entre as argilas, a qual confere trabalhabilidade à massa, bem como confere resistência mecânica ao produto final.

Para a escolha da formulação foram agrupadas duas metodologias já utilizadas por outros pesquisadores, conforme apresentado no Capítulo 2, com as adaptações necessárias, como apresenta um fluxograma da Figura 5.9.

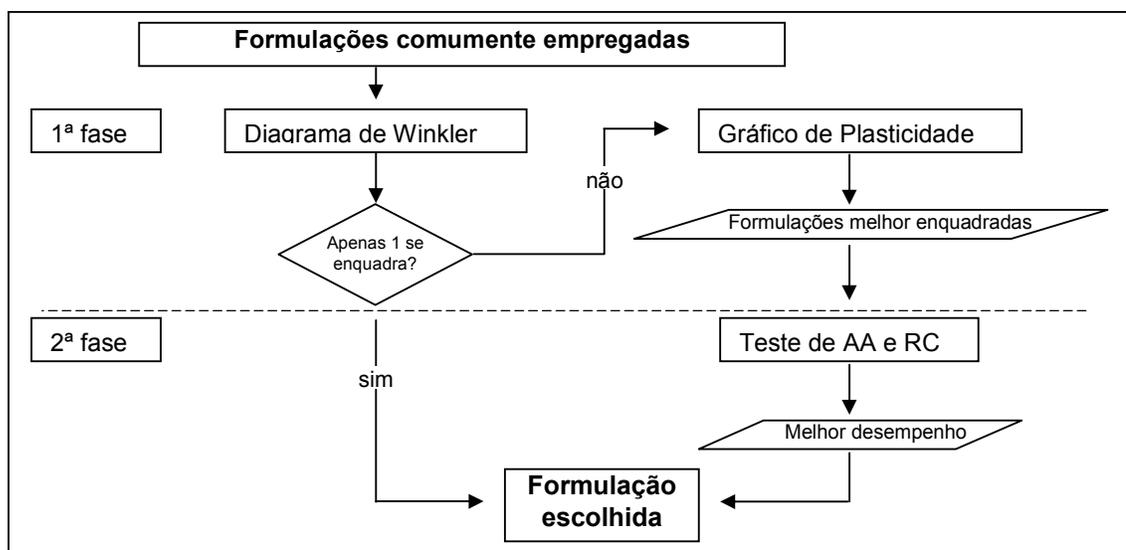


Figura 5.9 - Esquema para a escolha da formulação para fabricação dos tijolos com lodo.

Em uma primeira fase foram analisadas as formulações empíricas mais comumente utilizadas pelas indústrias do Rio Grande do Norte (DURANTE-INGUNZA *et al*, 2006), empregando o Diagrama de Winkler com as faixas granulométricas ideais para a fabricação de produtos cerâmicos (PRACIDELLI & MELCHIADES, 1997). Esta fase consiste em inserir cada uma das quatro formulações, a saber, 3:1; 2:1, 3:2 e 1:1 (argila plástica: argila não-plástica) no diagrama e observar a posição destas em relação às áreas hachuradas.

Com estas duas formulações pré-selecionadas, segue-se para a segunda fase, com base na metodologia de seleção de formulações adotada por Dutra *et al*. (2006b). Esta metodologia avalia os produtos finais (neste caso, tijolos maciços) fabricados com as formulações propostas.

Deste modo, a mais adequada é aquela formulação que resulta em produtos cerâmicos com melhor desempenho. Para este trabalho serão avaliados apenas os parâmetros de Absorção de água e Resistência à compressão; o melhor desempenho será do tijolo que obtiver menor absorção e maior resistência.

5.4 Fabricação dos tijolos

Definida a formulação, foram fabricados tijolos maciços com oito dosagens de lodo, além do tijolo sem adição de lodo (tijolo-testemunha). Por motivos operacionais (disponibilidade de equipe para fabricação, laboratório para análises e forno industrial para queima à cerca de 1000°C), a fabricação ocorreu em duas etapas, cada uma com um grupo de tijolos-testemunha, os quais estarão submetidos às mesmas condições dos tijolos com lodo.

Na primeira etapa foram fabricados tijolos com dosagens de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de lodo. Na segunda etapa foram fabricados os tijolos com dosagens de 0%, 5%, 15%, 25% e 35% de lodo, de modo que em ambas as etapas houvesse produtos com baixas e altas dosagens.

Devido à dificuldade para a fabricação das peças (por ser em escala real há necessidade de grandes quantidades de matéria-prima e esforço braçal) para cada dosagem foram fabricados, em média, doze tijolos.

A fabricação dos tijolos observou a seguinte marcha de procedimentos:

1. Destorroamento das matérias-primas: conforme explicitado no item 5.1.

2. Determinação das quantidades de matérias-primas

Todos os materiais foram pesados em balança digital com resolução de 0,005 g. Dada uma formulação de 3:2, o Quadro 5.1 apresenta as quantidades necessárias de matéria-prima para a fabricação de cerca de 12 tijolos.

Quadro 5.1 - Quantidade de matéria-prima para fabricação de cerca de 12 tijolos.

Tijolo com % de lodo	Quantidade de matéria-prima (kg)			Umidade (%)
	Argila A	Argila B	Lodo	
Testemunha 1ª fabricação	15,0	10,0	0,00	30,46
Testemunha 2ª fabricação	15,0	10,0	0,00	33,01
5%	14,25	9,50	1,25	23,59
10%	13,50	9,0	2,5	30,77
15%	12,75	8,50	3,75	28,28
20%	12,00	8,00	5,00	30,52
25%	11,25	7,50	6,25	25,94
30%	10,50	7,00	7,50	30,72
35%	9,75	6,50	8,75	34,71
40%	9,00	6,00	10,00	31,17

3. Moldagem dos tijolos

As argilas e o lodo, nas quantidades determinadas para cada dosagem, foram misturados à água com o auxílio de uma betoneira com capacidade de 150 L (Figura 5.10). Em testes preliminares constatou-se que a umidade ideal da massa, em relação ao tipo de moldagem do produto, estava na faixa de 20 a 35%.

Os tijolos foram moldados em uma prensa manual (Figura 5.11) e secaram por quatro dias ao ar livre, em pátio coberto na UFRN, sobre estrados de madeira e por 24 horas em estufa a 105°C (ver item 5.5.2). Em seguida os tijolos foram transportados para o pátio da indústria, onde secaram por mais dois dias, e queimados em forno tipo igreja. O resfriamento se deu no interior do próprio forno, por cerca de 24 horas.



Figura 5.10 – Betoneira para mistura da massa cerâmica.



Figura 5.11 – Prensa manual para moldagem dos tijolos maciços.

5.5 Ensaios nos tijolos cerâmicos

Considera-se que cada tijolo é um corpo-de-prova. Assim, dentre os tijolos fabricados foram escolhidos, aleatoriamente, oito exemplares para os ensaios seguintes, considerando ser este o número mínimo para composição da amostragem, prevista pela NBR 7170 (ABNT, 1983b).

5.5.1 Avaliação estética

Quanto aos aspectos visuais, a NBR 7170 (ABNT, 1983b) recomenda que os tijolos não devem apresentar defeitos sistemáticos tais como trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e desuniformidade na cor.

Nos quesitos cor e odor os exemplares com lodo foram comparados aos tijolos-testemunha, segundo a sua respectiva etapa de fabricação.

De uma forma mais explícita, Petrucci (1998) endossa as recomendações da norma, ressaltando que os tijolos maciços de qualidade devem apresentar as seguintes características:

- Regularidade de forma e igualdade de dimensões, garantindo uniformidade no assentamento;
- Arestas vivas e cantos resistentes;

- Homogeneidade da massa, com ausência de fendas, trincas, cavidades e corpos estranhos;
- Cozimento uniforme, o qual produz som metálico quando percutido com martelo;
- Facilidade de corte, apresentando fratura de partículas finas, homogêneas e de cor uniforme.

5.5.2 Determinação das dimensões

Em consequência do tipo de moldagem adotado, será considerado que os tijolos devem ter as dimensões ideais de 220x105x45 mm. Para se obter a dimensão média real, oito tijolos foram colocados lado a lado e, através de trena metálica, medidos nas três dimensões. Posteriormente, os valores obtidos em cada um dos casos foram divididos por oito.

A NBR 7170 (ABNT, 1983b) adverte que as tolerâncias máximas de variação devem ser de 3 mm para mais ou para menos, nas três dimensões.

5.5.3 Determinação do percentual da Perda de Massa

Não há normatização para a avaliação deste parâmetro, contudo ele se mostra como um importante indicador do efeito que a incorporação de matéria orgânica na matriz cerâmica.

No ensaio os tijolos foram secos em estufa a 105°C por 24 horas e pesados em balança digital com resolução de 0,005g em dois momentos: antes e depois da queima, como apresentam as Figuras 5.12 e 5.13, respectivamente.

O percentual de perda de massa (PM) é dado pela Equação 5.2:

$$PM = \frac{M_{aq} - M_{dp}}{M_{dp}} \times 100 \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde M_{aq} é a massa do corpo-de-prova antes da queima e o M_{dp} é a massa do corpo-de-prova depois da queima.



Figura 5.12 – Tijolos com 20% de lodo antes da queima.



Figura 5.13– Tijolos com 20% de lodo depois da queima.

5.5.4 Determinação do percentual de Absorção de Água

Não existe uma norma específica para o ensaio de Absorção de Água em tijolos maciços, ao contrário dos outros materiais cerâmicos. Neste caso, a metodologia adotada consistiu em pesar os tijolos, já queimados, em dois momentos: secos em estufa a 105°C e após 24 horas de imersão em tanque de água fria e limpa. Neste segundo momento, foi retirado apenas o excesso de água dos tijolos.

A Figura 5.14 mostra alguns tijolos no tanque de imersão, enquanto na Figura 5.15 pode-se observar o momento da pesagem de um corpo-de-prova úmido.



Figura 5.14 – Tijolos no tanque de água.



Figura 5.15 – Pesagem de tijolo úmido.

Petrucci (1998) recomenda que a Absorção de Água esteja compreendida entre 10 e 18%. Valores superiores implicam em porosidade e permeabilidade do produto.

Valores muito baixos indicam dificuldades para aderência das argamassas de recobrimento.

Através da Equação 5.3 foi obtido percentual de Absorção de Água. Nesta equação, $M_{úmido}$ é a massa do corpo-de-prova após 24 horas de imersão em água fria e o M_{seco} é a massa do CDP após 24 horas de secagem em estufa a 105°C.

$$AA = \frac{M_{úmido} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100 \quad \text{Equação 5.3}$$

5.5.5 Determinação da Resistência à Compressão

O ensaio para a obtenção da resistência a compressão em tijolos maciços é estabelecido pela NBR 6064 (ABNT, 1983a). Consiste em comprimir um prisma cerâmico (Figura 5.16, lado esquerdo) e anotar a força requerida para levá-lo ao rompimento (Figura 5.16, lado direito).

O prisma cerâmico foi fabricado com o próprio tijolo maciço. Primeiro o tijolo foi serrado ao meio, com auxílio de uma serra circular manual; depois suas duas partes foram ligadas com uma camada fina de pasta de cimento. Após 24 horas uma das faces do prisma foi recoberta com a pasta de cimento de 2 a 3 mm (Figura 5.17), de forma obter uma superfície regularizada; logo após o endurecimento da pasta a outra face foi regularizada.



Figura 5.16 – Equipamento para o ensaio.



Figura 5.17 – Regularização das faces do prisma.

Após o endurecimento das camadas de pasta, as faces dos corpos-de-prova foram medidas e eles foram imersos tanque de água fria por 24 horas. Pouco antes do ensaio, os corpos-de-prova foram retirados do tanque e superficialmente enxugados.

A Resistência à compressão, em MPa, é dada pela Equação 5.4, onde a F é a Força observada no equipamento para o rompimento do prisma, em Kgf, e \bar{A}_p é a média das áreas das duas faces do prisma cerâmico, em centímetro quadrado.

$$RC = \frac{F}{A_p} \times 10 \quad \text{Equação 5.4}$$

Para este trabalho admitiu-se que os tijolos deverão atender aos requisitos da categoria A, ou seja, a resistência mínima será de 1,5 MPa (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria.

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

FONTE: ABNT (1983b)

Conforme apresentado pelo Quadro 5.3, a dosagem de lodo será considerada como tecnicamente aceitável se apenas um dos seus oito corpos-de-prova for reprovado, ou seja, obtiver resistência inferior a 1,5 MPa.

Quadro 5.3 - Número de aceitação e rejeição na inspeção por ensaio

Lote	Amostragem		Unidades defeituosas			
			1ª amostragem		1ª + 2ª amostragem	
	1ª	2ª	Nº de aceitação	Nº de rejeição	Nº de aceitação	Nº de rejeição
De 1000 a 3000	8	8	1	4	4	5
De 3001 a 35000	13	13	2	5	6	7
De 35001 a 500000	20	20	3	7	8	9

FONTE: ABNT (1983b)

Para que a dosagem seja rejeitada, quatro dos seus oito corpos-de-prova devem ser reprovados. Se o número de tijolos reprovados estiver neste intervalo (ou seja, 2 ou 3 tijolos), o lote deverá ser inspecionado através de uma segunda amostragem.

Como neste trabalho a possibilidade de uma segunda amostragem é nula (foram fabricados, em média, 10 tijolos de cada dosagem), o lote será considerado rejeitado se dois ou mais corpos-de-prova forem reprovados.

5.5.6 Determinação do Risco Ambiental

Como já foi dito no Capítulo 4, a NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos em resíduos classe I – Perigosos e resíduos classe II – Não perigosos. Esta última classe pode ser subdividida em resíduos classe II A – Não inertes e resíduos classe II B – Inertes.

A preparação dos extratos lixiviados e solubilizados foi realizada nas dependências do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - LARHISA/UFRN. A determinação das concentrações dos componentes desses extratos, com base nos métodos prescritos pela APHA (1992) será feita no Laboratório de Análises de Águas e Alimentos - CEFET/RN, através da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica. A descrição dos ensaios supracitados será feita a seguir.

- Lixiviação

O ensaio de lixiviação avalia o potencial de liberação dos componentes constituintes dos resíduos para o meio ambiente e, portanto, seu impacto potencial nos solos e nas águas subterrâneas.

O ensaio padronizado pela NBR 10005 (ABNT, 2004b) consistiu em deixar uma mistura composta por amostra do resíduo (neste caso, 100 g de tijolos desintegrados, com diâmetro inferior a 9,5 mm) e por uma solução de líquido extrator, sob agitação durante um período de 18 (± 2) horas.

Posteriormente a mistura foi filtrada em membrana de fibra de vidro de 0,45 μm de porosidade. O filtrado obtido desta mistura é chamado extrato lixiviado.

- Solubilização

O ensaio de solubilização NBR 10006(ABNT, 2004c) avalia o potencial dos resíduos de liberar seus componentes constituintes para a água pura, comparativamente ao padrão de potabilidade. Consistiu na mistura de 250 g do resíduo a 1.000 mL de água deionizada. Esta mistura ficou em repouso, tampada, por sete dias. Após esse período, foi filtrada em membrana de fibra de vidro de 0,45 μm de porosidade. O filtrado obtido desta mistura é chamado extrato solubilizado.

5.6 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos nos ensaios apresentados no item 5.5 foram submetidos, através do *software Statistic for Windows 6.0*, à Análise de Regressão e à Análise de Variância (ANOVA).

A análise de Regressão é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre ou mais variáveis (MONTGOMERY & RUNGER, 1999) e foi utilizada nesta pesquisa para avaliar a importância da dosagem do lodo nas características dos tijolos maciços fabricados com adição deste elemento.

O Diagrama de dispersão é um gráfico no qual cada par (x_i, y_i) é representado com um ponto plotado em um sistema bidimensional de coordenadas. A inspeção deste gráfico indica que, embora nenhuma curva simples passe exatamente através de todos os pontos há uma forte indicação que os pontos repousam aleatoriamente dispersos em torno de uma linha reta.

Contudo o modelo de linha reta pode não ser o mais adequado, ou ainda embora possa haver um efeito linear de uma variável x , os melhores resultados poderiam ser obtidos com a adição de termos polinomiais de maiores ordens em y (ou vice-versa).

Para medir a associação linear entre variáveis foi utilizada a medida da correlação (r). Para quaisquer duas variáveis, o valor da correlação está entre -1 e +1. Quanto mais próximo o valor está dos limites mais intensamente as variáveis estão correlacionadas.

O coeficiente de determinação (r^2) é a medida de quão bem os dados se ajustam à reta de regressão. O r^2 varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de um estiver, maior

o ajuste do modelo; por outro lado, pode-se afirmar que duas variáveis são independentes se o valor de r^2 é zero.

A partir destes conceitos, a análise estatística consistiu, em uma primeira fase, em verificar, através do diagrama de dispersão se dados obedeciam ao modelo de linha reta. Em caso negativo, buscar-se-ia um modelo que possa representar os valores dos parâmetros, através de testes com termos polinomiais maiores do x, adotando o teste com maiores valores de r e r^2 .

Definido o modelo, para variáveis com r^2 diferente de zero, procedeu-se a Análise de Variância (ANOVA), para descobrir se há diferença estatística significativa entre as amostra.

O teste de Dunet permite avaliar se os grupos são distintos de um grupo padrão. Neste caso, se os tijolos com lodo são distinto dos tijolos testemunha. Esta constatação é feita através da tabela gerada pelo teste, com os valores p. Se p for maior que 5%, os grupos são iguais, se for menor do que 5%, os grupos são estatisticamente distintos do grupo de controle.

Pelo exemplo dado pelo Quadro 5.4 pode-se observar que o grupo 2 é estatisticamente diferente do grupo de controle, enquanto os grupos 1 e 3 são estatisticamente semelhantes ao grupo de controle.

Quadro 5.4 - Exemplo de resultado gerado pelo teste de Dunet.

Variável	p(controle)
Controle	
Grupo 1	0,234676
Grupo 2	0,007553
Grupo 3	0,849374

Através do teste de Tukey HSD pode-se observar se há diferença significativa entre todos os grupos (dosagens) entre si. Esta análise é através da tabela gerada pelo teste (Quadro 5.5), a qual indica que para os valores de p inferiores a 5%, os grupos são estatisticamente distintos entre si.

Quadro 5.5 - Exemplo de resultado gerado pelo teste de Tukey HSD.

Variável	p(controle)	p(Grupo 1)	p(Grupo 2)	p(Grupo 3)
Controle		0,336410	0,013236	0,911050
Grupo 1	0,336410		0,251373	0,125971
Grupo 2	0,013236	0,251373		0,004336
Grupo 3	0,911050	0,125971	0,004336	

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo consiste na apresentação e discussão dos resultados obtidos durante a pesquisa, seguindo a seqüência da metodologia proposta no capítulo anterior.

A apresentação dos resultados está dividida em três, sendo elas: caracterização das matérias-primas, determinação da formulação das argilas e ensaios no produto final.

6.1 Caracterização das matérias-primas

6.1.1 Análise granulométrica

O Gráfico 6.1 apresenta a curva granulométrica das duas argilas utilizadas na pesquisa. Pode-se observar que a argila A, com densidade real de 2,11, apresenta 42% de partículas argilosas, enquanto a argila B, com densidade real de 2,33 apresenta teores na faixa de 8% de argila.

Esta diferença pode justificar a nomenclatura dada na indústria cerâmica fornecedora das matérias-primas (“argila gorda” e “argila magra” para as argilas A e B, respectivamente) visto que a os grãos argilosos são responsáveis pela plasticidade do solo.

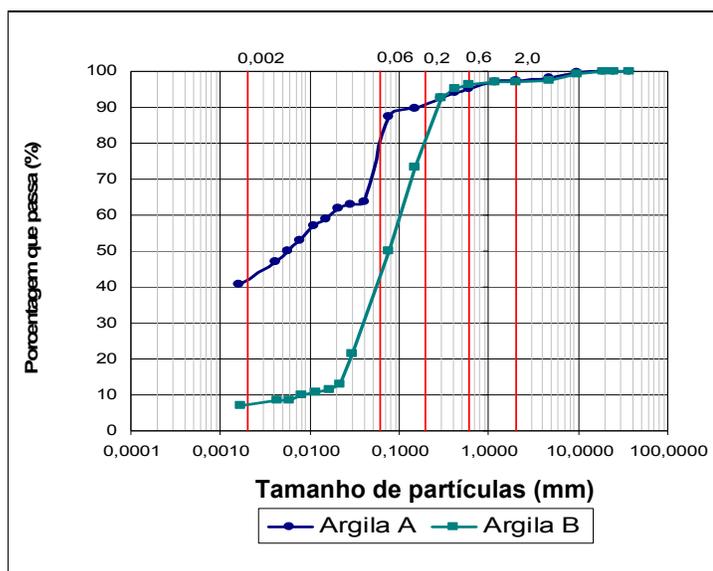


Gráfico 6.1 - Curva granulométrica das argilas A e B.

Pela observação do gráfico acima se pode afirmar que a argila apresenta a maioria das suas partículas concentrados em uma pequena faixa de dimensões, o que resultaria em uma massa cerâmica com muitos vazios e com grande retração pós-queima.

Já a argila B apresenta uniformidade de distribuição, o indica que este material tem menor número de vazios, pois os grãos de menores dimensões preenchem os espaços existentes entre os grãos de maiores dimensões. Tal fenômeno acarretaria na diminuição da retração da massa cerâmica fabricada com esta matéria-prima.

A curva granulométrica do lodo de esgoto está representada pelo Gráfico 6.2. A densidade real do lodo é igual a 1,411, definindo o material como agregado leve (densidade < 2).

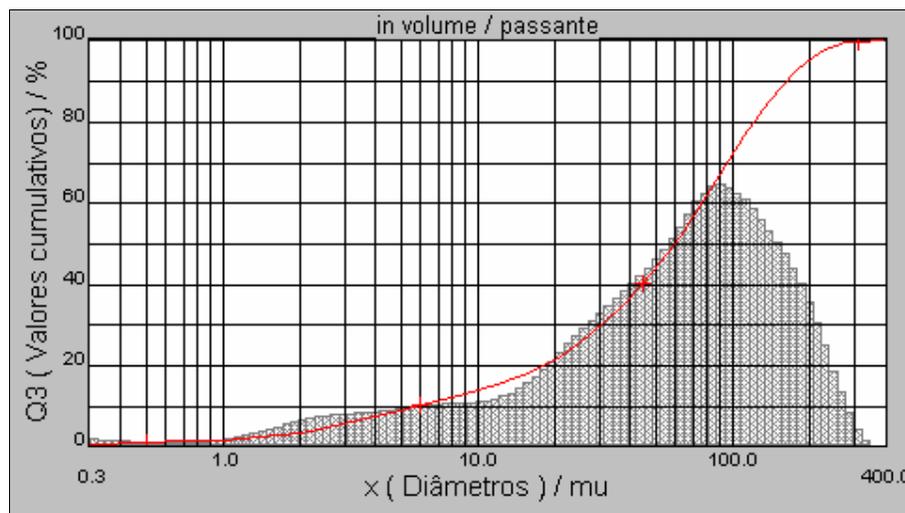


Gráfico 6.2 - Curva granulométrica do lodo de esgoto.

A Gráfico 6.3 apresenta o Diagrama de Winkler para a composição granulométrica ideal dos produtos cerâmicos, com o resumo das características granulométricas das argilas A e B e do lodo.

Pode-se observar que a argila B e o lodo de esgoto se encontram fora de qualquer uma das quatro faixas granulométricas estabelecidas para a fabricação de produtos cerâmicos. Isto se deve ao fato de que estes dois materiais contêm teores muito baixos de partículas argilosas (7,33% e 4,30%, para a argila B e o lodo, respectivamente).

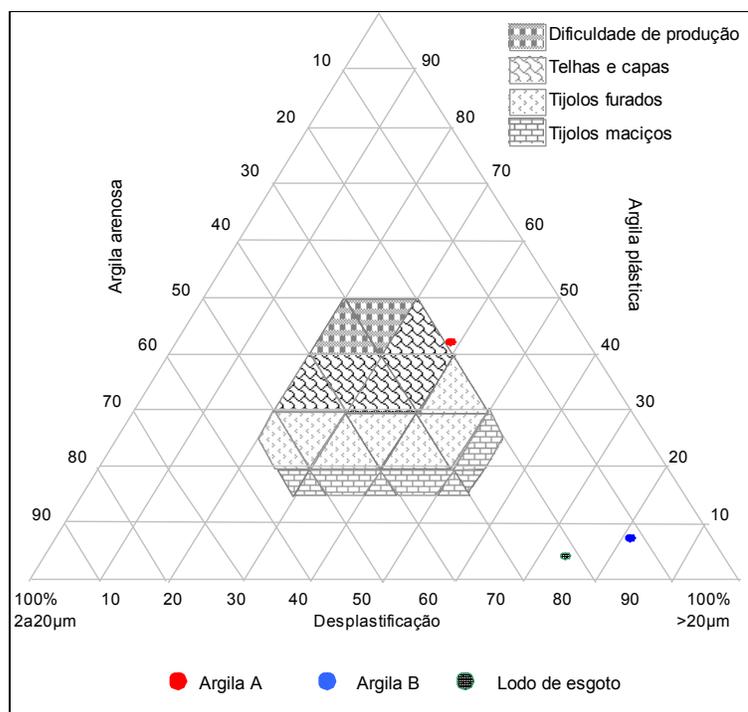


Gráfico 6.3 – Diagrama de Winkler com as características das matérias-primas.

A argila A apresenta características granulométricas muito próximas às indicadas para a fabricação de telhas de capas. Para este trabalho, isto implica em dificuldade de fabricação, já que o processo utilizado para a fabricação de tijolos maciços (compressão manual) é completamente distinto do processo para a fabricação de telhas e capas (extrusão).

6.1.2 Limites de Consistência

A Tabela 6.1 apresenta os valores obtidos nos ensaios para a determinação dos Limites de Liquidez e Plasticidade dos materiais, além das suas nomenclaturas.

Tabela 6.1 – Limites de consistência e nomenclatura das argilas A e B.

Material	Limites de Consistência		Nomenclatura*
	Limite de Liquidez	Índice de Plasticidade	
Argila A	52,25	20,14	Argila inorgânica de alta plasticidade
Argila B	20,35	1,69	Argila inorgânica de baixa plasticidade

*Classificação pelo gráfico de plasticidade de Casagrande (CAPUTO, 1988).

A Figura 6.1 apresenta o lodo de esgoto durante o ensaio de determinação do limite de plasticidade. Como o material não apresentou plasticidade, considera-se o índice de plasticidade nulo.



Figura 6.1 – Ensaio de plasticidade do lodo de esgoto.

6.1.3 Caracterização Química

A Tabela 6.2 apresenta os resultados da composição química das matérias-primas, expressas em porcentagem de óxidos. Pode-se observar que argila A, a argila B e o lodo são constituídos, basicamente, por Al_2O_3 , Fe_2O_3 , e SiO_2 , cujos teores correspondem a 94,823%, 83,272% e 63,032%, respectivamente.

Tabela 6.2 - Composição química das argilas A e B e do lodo de esgoto, em % de óxidos.

Elemento	Argila A	Argila B	Lodo esgoto
SiO_2	68,685	55,320	33,893
Al_2O_3	23,017	20,471	16,242
Fe_2O_3	3,121	7,481	12,897
K_2O	2,422	5,827	1,509
CaO	0,993	5,548	14,567
TiO_2	0,971	0,784	2,876
Outros	0,396	3,404	16,592

Nos três materiais os teores de Fe_2O_3 acima de 3% indicam coloração avermelhada nos tijolos pós-queima. Devido à alta concentração deste óxido no lodo, estima-se que não haja alteração na coloração dos tijolos, mesmo com altas dosagens de lodo.

6.1.4 Caracterização Mineralógica

Os Gráficos 6.4, 6.5 e 6.6 mostram os difratogramas de Raios-X das matérias-primas utilizadas na pesquisa.

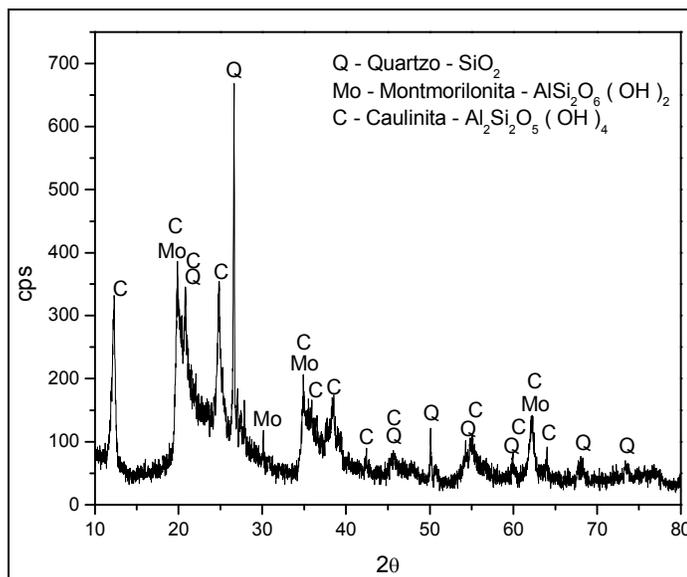


Gráfico 6.4 - Composição mineralógica da Argila A.

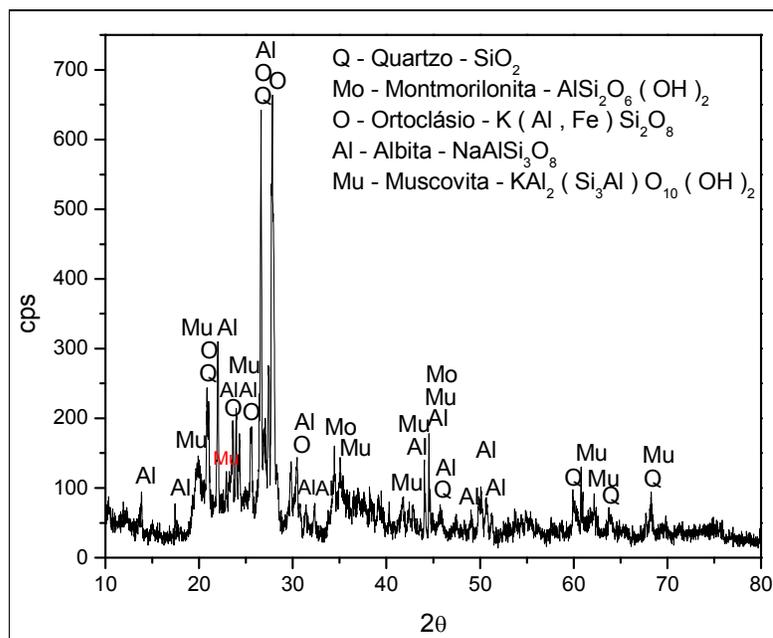


Gráfico 6.5 - Composição mineralógica da Argila B.

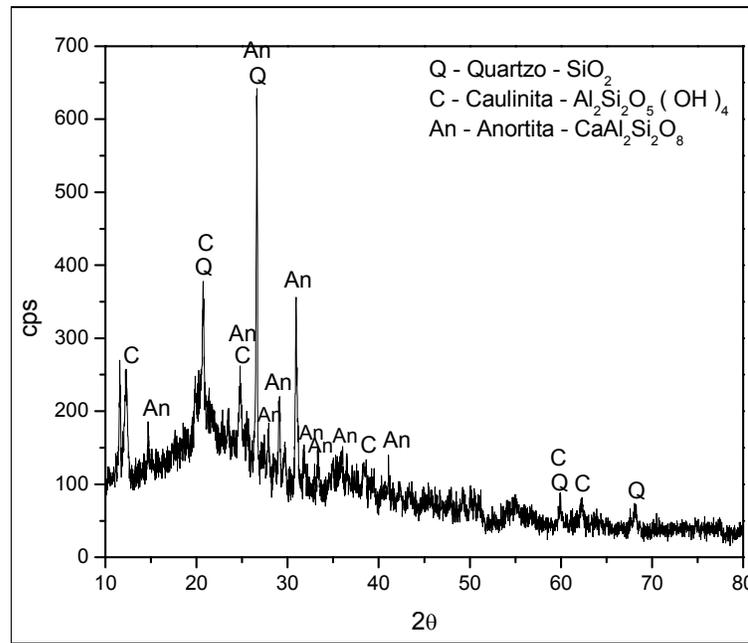


Gráfico 6.6 - Composição mineralógica do lodo de esgoto.

O Gráfico 6.4 confirma a grande plasticidade da argila A, através da predominância de caulinite e montmorilonita. Pelos Gráficos 6.5 e 6.6 estima-se que a presença de ortoclásio, de albita e de anortita resultará em uma massa cerâmica com boa fusibilidade. A presença de quartzo nas três matérias-primas, observada nos gráficos acima, indica que o produto fabricado terá grande estabilidade dimensional.

6.2 Determinação da formulação

A determinação da formulação mais adequada para a fabricação dos tijolos consistiu na adaptação dos métodos propostos por Pracidelli & Melchiades (1997) e por Dutra *et al.* (2006b), anteriormente expostos.

No Gráfico 6.7, com base no método de Pracidelli & Melchiades (1997), foram inseridas no Diagrama de Winkler as quatro possibilidades de formulação de argilas.

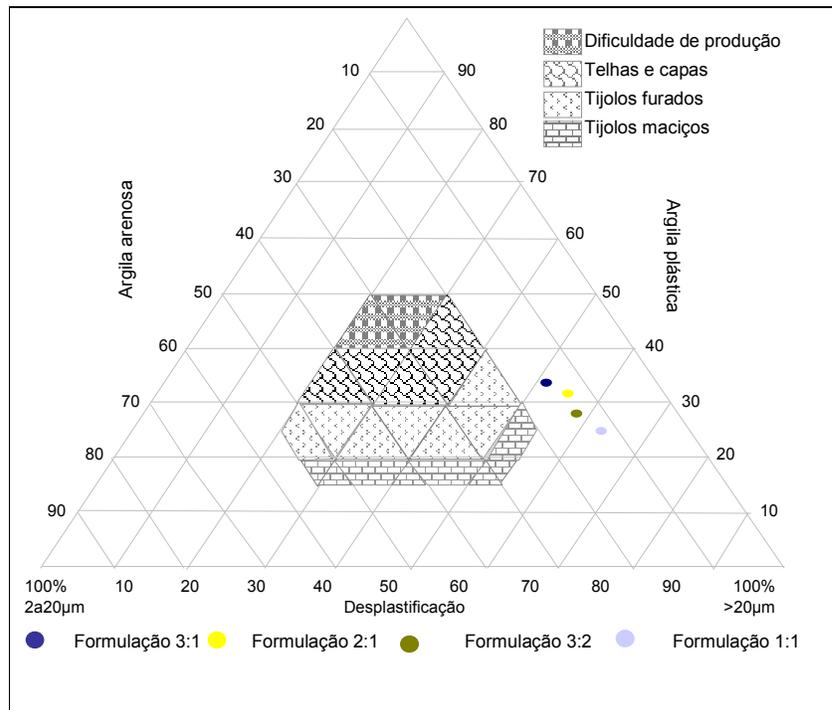


Gráfico 6.7 – Diagrama de Winkler com as características das quatro formulações propostas.

Observa-se que as formulações 3:1 e 2:1 apresentam teores de finos (<2μm) superiores a faixa ideal para fabricação de tijolos maciços, mais adequados à fabricação de tijolos furados. Em relação à fração de arenosa (2 a 20μm), estas formulações se encontram fora de quaisquer das áreas hachuradas do gráfico. Apenas o teor de desplastificantes se enquadraria na faixa ideal para fabricação de tijolos maciços.

As formulações 3:2 e 1:1 apresentam teores de finos (<2μm) e de desplastificantes (>20μm) dentro da faixa ideal para a fabricação de tijolos maciços, contudo a fração arenosa (2 a 20μm) está abaixo do ideal pretendido.

Pode-se concluir por este Gráfico que nenhuma das formulações se enquadra na faixa ideal de composição granulométrica, contudo, as formulações 3:2 e 1:1 são as mais próximas. Pode-se estimar, devido fração arenosa (2 a 20μm) do lodo igual a 22,15%, que a trabalhabilidade da massa adicionada de lodo seja melhorada.

O Gráfico 6.8 mostra o gráfico de plasticidade de Casagrande com as quatro formulações propostas. Os solos constituídos pelas formulações 3:1, 2:1 e 1:1 podem ser classificados como siltes inorgânicos de alta compressibilidade. Sabe-se

que quando mais compressível a matéria-prima, mais frágil e deformável é a massa cerâmica resultante.

A formulação 3:2 pode ser classificada como argila inorgânica de plasticidade mediana. Sabe-se que quanto mais plástica, mas compressível é o solo, assim sendo, esta é a formulação menos compressível.

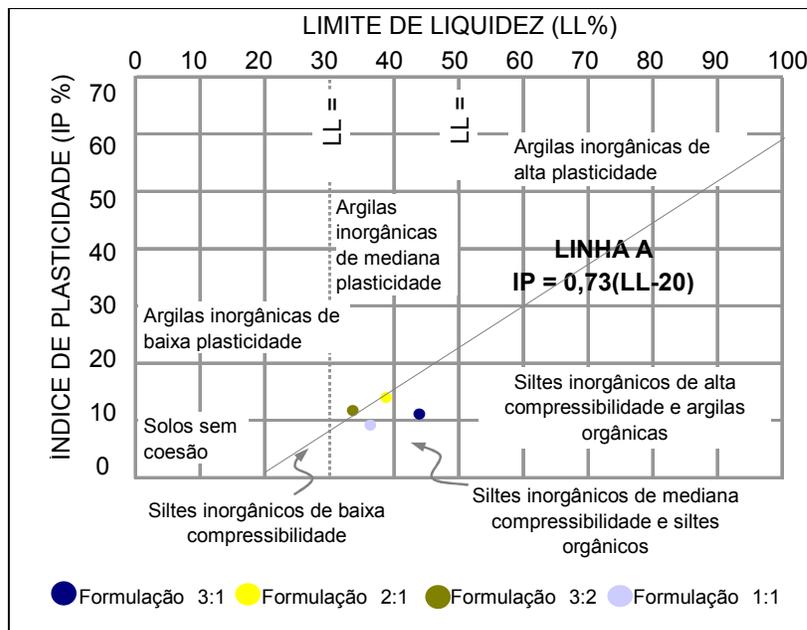


Gráfico 6.8 – Gráfico de plasticidade com as características das quatro formulações propostas.

Somando as constatações obtidas destas duas Gráficos, pode-se afirmar que as formulações mais próximas à formulação ideal para a fabricação de tijolos cerâmicos são as 3:2 e 1:1.

Desta forma, elas serão avaliadas segundo uma adaptação da metodologia de Dutra *et al.* (2006b), analisando somente a Absorção de Água e a Resistência à Compressão dos tijolos fabricados com estas duas formulações.

O Gráfico 6.9 apresenta os valores de Absorção de Água, em porcentagem, obtidos em 16 tijolos, sendo oito deles fabricados com a formulação 3:2 e os outros oito, com a formulação de 1:1.

Observa-se um ponto extremo, em cada uma das curvas do gráfico, possivelmente resultantes do próprio processo, artesanal, de fabricação dos tijolos. Apesar disto, as

curvas mostram clara tendência a um valor médio de Absorção de Água igual a 13,69% e 16,89%, para as formulações 3:2 e 1:1, respectivamente.

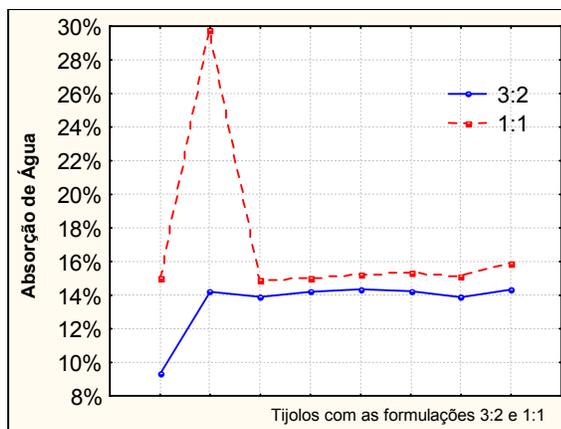


Gráfico 6.9 – Variação de Absorção de Água dos tijolos fabricados com as formulações de melhor desempenho.

O Gráfico 6.10 mostra os valores de Resistência à Compressão, obtidos no ensaio dos mesmos 16 tijolos, sendo oito deles fabricados com a formulação 3:2 e os outros oito, com a formulação de 1:1. Os tijolos da primeira formulação apresentam valores superiores aos da segunda, com valores médios de 7,15 MPa e 5,92%, respectivamente.

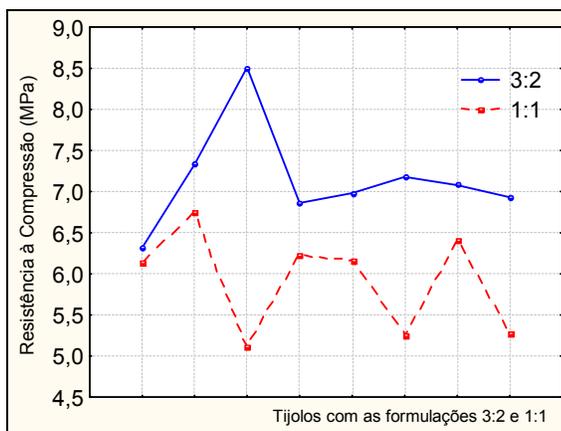


Gráfico 6.10 – Variação de Resistência à Compressão dos tijolos fabricados com as formulações de melhor desempenho.

A partir destes dois gráficos pode-se afirmar que os tijolos fabricados com a formulação 3:2 apresentaram valores menores de Absorção de Água e valores

maiores de Resistência à Compressão, em relação aos tijolos fabricados com a formulação 1:1.

Desta forma - proporcionando um maior rigor científico à pesquisa, já que a qualidade dos tijolos maciços foi assegurada desde a matriz inicial - a formulação escolhida como mais adequada para a fabricação dos tijolos maciços com incorporação de lodo foi a 3:2.

6.3 Ensaios nos tijolos maciços fabricados com lodo

6.3.1 Avaliação técnica

6.3.1.1 Avaliação estética

A fabricação dos tijolos, com a formulação escolhida e com as dosagens de lodo pré-definidas, ocorreu em duas etapas. As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam, em cada uma das etapas, um tijolo representativo de cada dosagem, com o respectivo tijolo-testemunha.

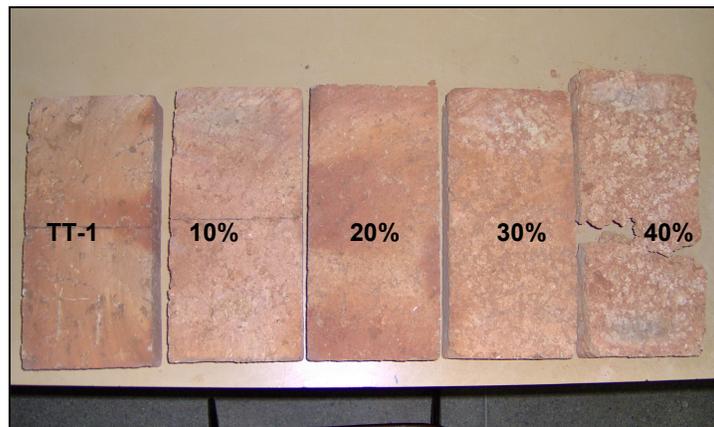


Figura 6.2 – Tijolos fabricados com adição de lodo (1ª etapa de fabricação).

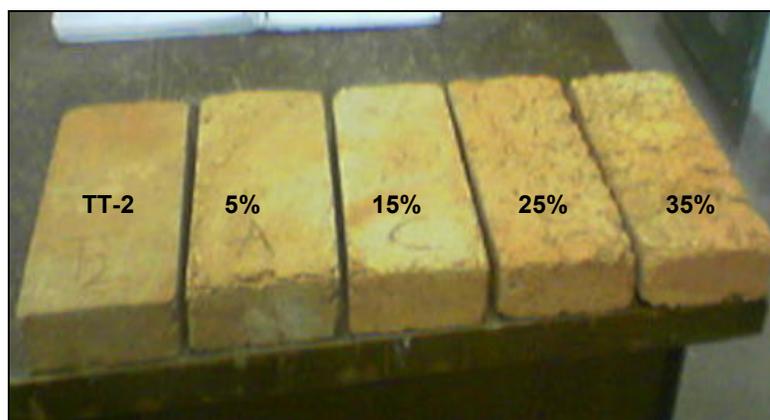


Figura 6.3 – Tijolos fabricados com adição de lodo (2ª etapa de fabricação).

A Tabela 6.3 apresenta um resumo das características estéticas avaliadas, em relação ao respectivo tijolo-testemunha.

Tabela 6.3 - Características estéticas dos tijolos de acordo com a dosagem de lodo.

Característica*	Tijolo (em dosagem de lodo)							
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Coloração	1	1	1	1	1	1	1	1
Odor	1	1	1	1	1	1	1	1
Regularidade de forma	1	1	2	2	3	3	4	4
Arestas vivas e cantos	1	1	1	1	2	2	4	4
Homogeneidade da massa	1	1	1	1	2	2	4	4
Cozimento parelho	1	1	1	2	2	3	4	4
Facilidade de corte	1	1	1	1	2	2	4	4

* 1 = semelhante ao TT; 2 = pequena alteração; 3 = grande alteração; 4 = deformação completa.

Como esperado pelo resultado da composição mineralógica, devido à semelhança entre as matérias-primas, dos teores de hematita, não houve alteração significativa na coloração dos tijolos. Também não houve qualquer alteração no odor dos tijolos.

Por outro lado o acabamento estético foi visivelmente afetado pelo aumento da dosagem de lodo. Apenas os tijolos fabricados com dosagens de 5% e 10% não tiveram variação de tamanho significativa, ou seja, mantiveram a regularidade de forma. Para as dosagens de 15% e 20%, os tijolos tiveram uma variação de tamanho de cerca de 4%.

A partir da dosagem de 25% de lodo, os tijolos apresentaram fissuras, cantos frágeis e falhas nas arestas. Os tijolos fabricados com a dosagem de 35% ficaram muito quebradiços, sem qualquer resistência mecânica e os tijolos com dosagem de 40% se fragmentaram durante a retirada do forno. Desta forma, estas duas últimas dosagens serão descartadas das avaliações seguintes.

6.3.1.2 Dimensões dos tijolos

A Tabela 6.4 apresenta as médias das variações dimensionais dos tijolos, considerando que o tamanho ideal é 220x105x45 mm. Em destaque estão os valores que extrapolaram a variação máxima permitida pela NBR 7170 (ABNT, 1983b), a saber, 3 mm para mais ou para menos.

Tabela 6.4 - Variação dimensional dos tijolos.

Tijolo	Δ Comprimento (mm)	Δ Largura (mm)	Δ altura (mm)
Testemunha 1	-3	-4	-7
Testemunha 2	1	0	-1
5%	2	1	-1
10%	-3	-3	-5
15%	0	0	1
20%	-3	-1	-3
25%	4	2	2
30%	-1	-1	3

Neste quesito foram reprovados os tijolos-testemunha da 1ª etapa de fabricação, as dosagens de 10% e 25%, tendo em vista que os elementos apresentaram variações dimensionais superiores ao limite permitido pela Norma.

A análise dos valores de r e r^2 (respectivamente, -0,4675 e 0,2186 para os tijolos da 1ª etapa e -0,3952 e 0,1562 para os da 2ª etapa) indica que a dosagem de lodo tem uma influência pouco significativa na variação dimensional dos tijolos.

O Gráfico 6.11 mostra que os valores de retração linear dos tijolos da 1ª etapa de fabricação tiveram pequena dispersão, variando de 12 a 17%, exceto os tijolos com 30% de lodo, cujos valores variaram de 2,5 a 14,5%. Pelo teste de Tukey HSD pode-se observar dois comportamentos: a) os tijolos com 0 10 e 20% de lodo apresentaram valores semelhantes de retração; b) os tijolos com 30% de lodo têm, possivelmente devido à dispersão dos seus valores, comportamento distinto dos demais.

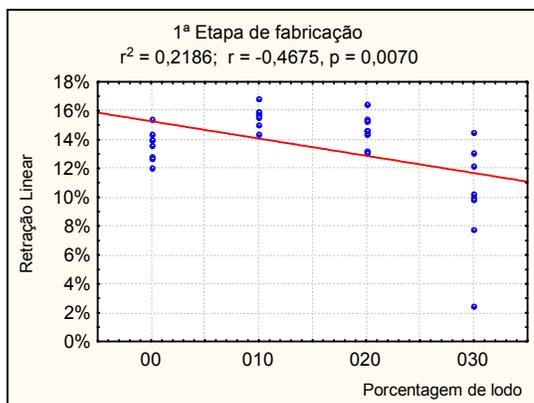


Gráfico 6.11 – Evolução da retração linear dos tijolos da 1ª etapa de fabricação.

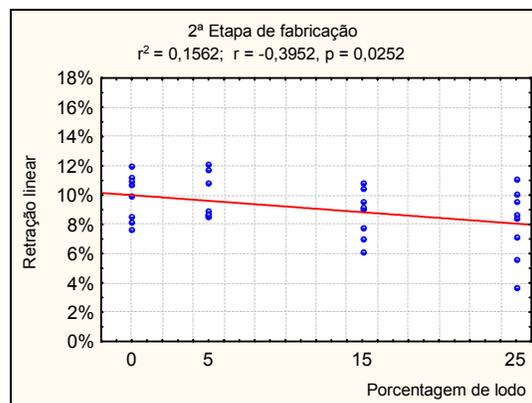


Gráfico 6.12 – Evolução da retração linear dos tijolos da 2ª etapa de fabricação.

O Gráfico 6.12 apresenta os resultados de retração linear dos tijolos fabricados na 2ª etapa. A semelhança dos anteriores, os tijolos desta etapa também apresentaram pequena variação, entre 6 e 12%, com exceção da dosagem de 25%, cuja variação foi de 4 a 11%. Para esta etapa o teste de Tukey HSD indica que todos os tijolos apresentaram retração linear estatisticamente igual.

Observando a tendência das retas dos dois gráficos acima, pode-se destacar que a retração linear dos tijolos da 2ª etapa de fabricação é inferior a da 1ª. Tal fato, aliado aos resultados do teste de Tukey HSD, pode implicar que a variação dimensional não depende diretamente da dosagem de lodo, estando muito mais relacionada ao método de produção dos tijolos.

6.3.1.3 Perda de massa dos tijolos

O Gráfico 6.13 mostra a média das massas dos tijolos, agrupados por etapa de fabricação. Através do gráfico constata-se que o peso dos tijolos e a dosagem de

lodo são inversamente proporcionais. Esta tendência à redução do peso do tijolo pode ser explicada pela volatilização da matéria orgânica do lodo.

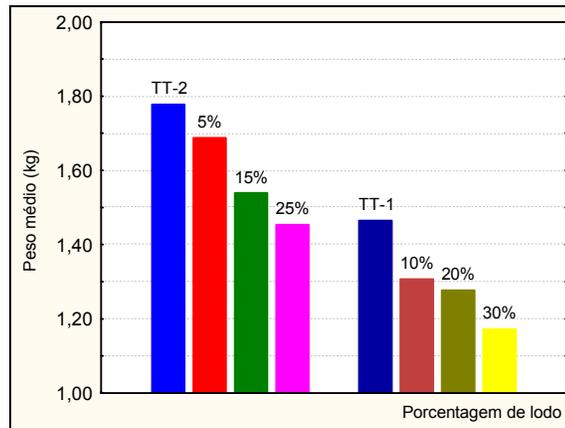


Gráfico 6.13 - Evolução do peso dos tijolos segundo a dosagem de lodo.

Os Gráficos 6.14 e 6.15 apresentam, respectivamente, os valores da perda de massa dos tijolos fabricados na 1ª e na 2ª etapa. Os valores de r e r^2 de ambos os gráficos, respectivamente 0,9099 e 0,8279 para a 1ª etapa e 0,9523 e 0,9068 para a 2ª, indicam que a perda de massa é significativamente influenciada pelo incremento da dosagem de lodo; a linha ascendente confirma que a relação é diretamente proporcional.

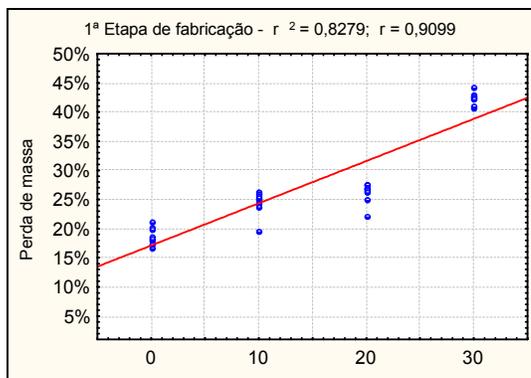


Gráfico 6.14 - Evolução da perda de massa dos tijolos da 1ª etapa de fabricação.

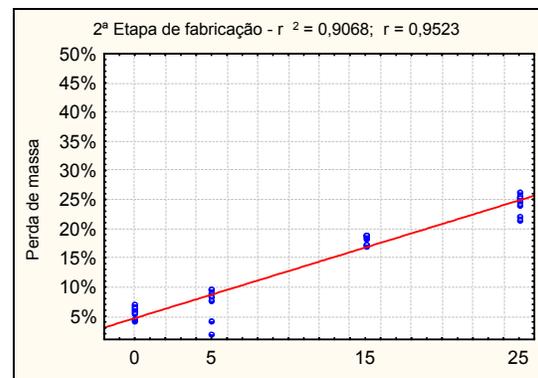


Gráfico 6.15 - Evolução da perda de massa dos tijolos da 2ª etapa de fabricação.

Considerando que o peso máximo do tijolo, em cada etapa de fabricação, seria o peso do tijolo-testemunha, destaca-se, neste gráfico, que os tijolos fabricados com 30% de lodo tiveram uma perda, em média, de 45% da sua massa, enquanto os tijolos com 5% perderam em média 6%.

Pelo teste de Dunet pode-se afirmar que os pesos dos tijolos com lodo, exceto com a dosagem de 5%, são estatisticamente diferentes dos seus respectivos tijolos-testemunha. Pelo teste de Tukey HSD constatou-se que os tijolos com 10 e 20% de lodo são estatisticamente semelhantes. A partir destes testes pode-se concluir que a adição de lodo acarreta em perda significativa da massa dos tijolos, contudo, esta mudança não é relevante quando há adição 5% de lodo à massa cerâmica e quando há um aumento de 10 para 20% de lodo.

O fenômeno da perda de massa implica que quanto maior a dosagem do lodo mais leve e, portanto, mais facilmente manuseável será o tijolo. Além disso, observando a os tijolos não apresentaram variação dimensional (o volume não varia entre as dosagens), um menor peso implica em menor densidade, o que resulta em um melhor isolamento acústico e maior economia no projeto estrutural.

6.3.1.4 Absorção de água dos tijolos

O Gráfico 6.16 representa a média de Absorção de Água dos tijolos fabricados com as diferentes dosagens de lodo. O gráfico mostra uma relação diretamente proporcional entre o aumento da dosagem de lodo e o aumento da Absorção.

De acordo com uma regra prática adotada por Petrucci (1998), a Absorção de Água deve estar entre 10 e 18%. Assim, os tijolos fabricados com dosagens de 20, 25 e 30% estão acima do limite proposto. Contudo, os tijolos com dosagem de 20% de lodo obtiveram, em média, valores na faixa de 20%, próximo ao limite máximo.

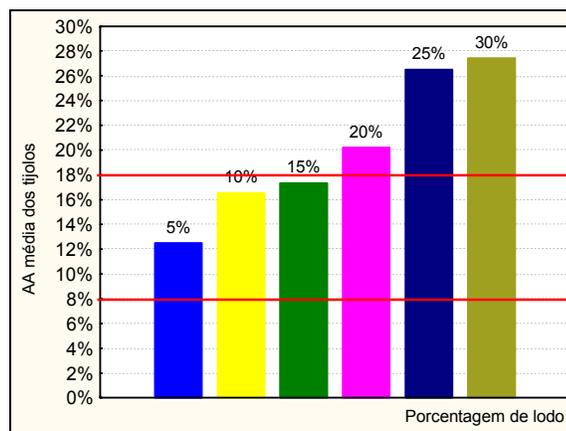


Gráfico 6.16 - Evolução da absorção de água, segundo a dosagem de lodo.

Pelo teste de Dunet constatou-se que os valores de Absorção de Água dos tijolos com lodo são estatisticamente diferentes dos respectivos tijolos-testemunha. Com o

teste de Tukey HSD observou-se que os valores de Absorção dos tijolos são distintos entre si. Isto implica que há realmente um incremento significativo da absorção quando há aumento da dosagem.

O Gráfico 6.17 apresenta o incremento, em porcentagem, da Absorção de Água de cada tijolo em relação ao seu respectivo tijolo-testemunha. O gráfico mostra que os tijolos fabricados com lodo, em todas as dosagens, absorveram mais água do que o tijolo-testemunha, destacando a dosagem de 25% que absorveu, em média, 160% a mais do que o tijolo-testemunha na sua etapa de fabricação.

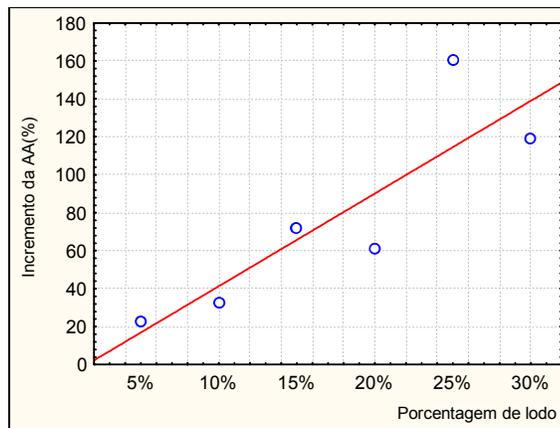


Gráfico 6.17 - Incremento da Absorção de Água de dos tijolos com lodo, em relação ao tijolo-testemunha.

6.3.1.5 Resistência à compressão dos tijolos

O Gráfico 6.18 mostra os valores médios obtidos dos tijolos fabricados com as diferentes dosagens de lodo. Observa-se que os tijolos com 5% de lodo apresentam resistência suficiente para serem classificados na Categoria C (>4,0 MPa). Os tijolos com dosagem de 10% poderiam ser classificados na Categoria B (2,5 - 4,0 MPa). Com as dosagens de 15 e 20% os tijolos atingiram a resistência mínima para a Categoria A (1,5 – 2,5 MPa). Os tijolos fabricados com as dosagens de 25 e 30% não atenderam a esta resistência mínima.

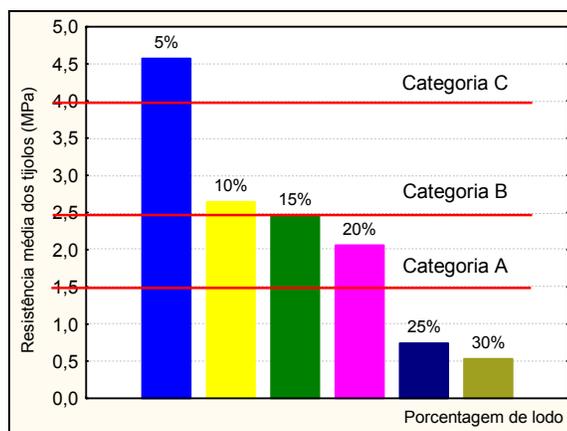


Gráfico 6.18 - Evolução da resistência à compressão, segundo a dosagem de lodo.

Pelo teste de Dunet constatou-se que os valores de Resistência à compressão dos tijolos com lodo são estatisticamente diferentes dos respectivos tijolos-testemunha. Pelo teste de Tukey HSD observou-se que os tijolos com adição de 10% e 20% são estatisticamente iguais. Isto significa que há uma redução significativa da resistência dos tijolos quando há aumento da dosagem, contudo, tal fenômeno não se verifica quando se aumenta de 10 para 20% de lodo. Do ponto de vista do uso, isto implica que a aplicação de 20% de lodo na fabricação de tijolo resultará em um produto com a mesma qualidade de um outro que utilizasse apenas 10% de lodo.

O Gráfico 6.19 apresenta a porcentagem de perda de Resistência à compressão de cada tijolo em relação ao seu respectivo tijolo-testemunha. Considerando que a máxima resistência que o tijolo com lodo pode obter, em cada etapa de fabricação, seria igual ao valor obtido pelo tijolo-testemunha, pode-se constatar, que mesmos os tijolos fabricados com 5% de lodo perderam cerca de 45% da resistência obtida pelo tijolo-testemunha.

Os tijolos fabricados com 15 e 20% perderam na faixa de 70% da resistência máxima, contudo, ainda atingiram a resistência mínima exigida pela norma. As dosagens mais altas, de 25 e 30%, perderam cerca de 90% da resistência do tijolo-testemunha.

De acordo com o desempenho obtido pelos tijolos, em cada dosagem, pode-se afirmar que os tijolos com 25 e 30% de lodo não são tecnicamente aceitáveis; as demais dosagens resultaram em tijolos que atenderam a legislação pertinente. Assim, tem-se que a dosagem máxima que obteve aprovação técnica é a de 20%.

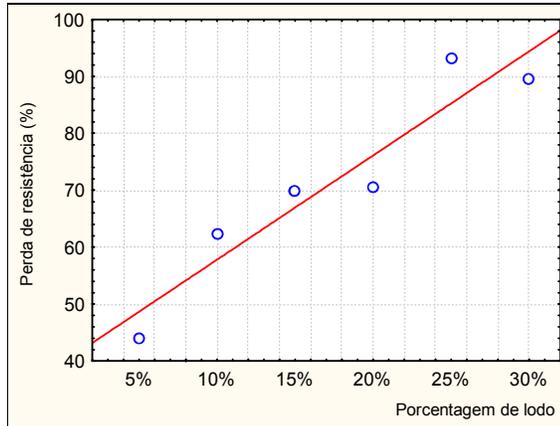


Gráfico 6.19 – Diminuição da Resistência à Compressão de cada tijolo, em relação ao seu tijolo-testemunha.

6.3.2 Avaliação ambiental

Para esta fase de avaliação foram analisadas apenas amostras dos tijolos fabricados com as duas maiores dosagens as quais obtiveram a aprovação na avaliação antecedente, a saber, 15 e 20%; além destes, também foram analisados os respectivos tijolos-testemunha.

6.3.2.1 Ensaio de lixiviação

Os de Gráficos 6.20 a 6.23 mostram, respectivamente, as concentrações de cádmio, chumbo, cromo e prata da análise do extrato lixiviado de três amostras dos tijolos supracitados; a linha vermelha indica a concentração máxima permitida pela norma. Por dificuldades operacionais não foram analisados todos os metais constantes na NBR10005 (ABNT, 2004b).

Para os metais analisados, pode-se afirmar que as concentrações do lixiviados de todos os tijolos são inferiores ao limite estabelecido pela norma vigente. Em termos práticos, isto significa que os tijolos, em uma futura demolição da alvenaria com eles construída, se caracterizariam como resíduo Classe II – não perigoso.

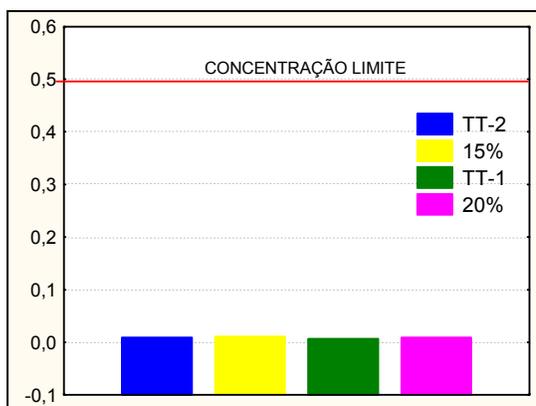


Gráfico 6.20 – Concentração de cádmio (mg/L) no extrato lixiviado.

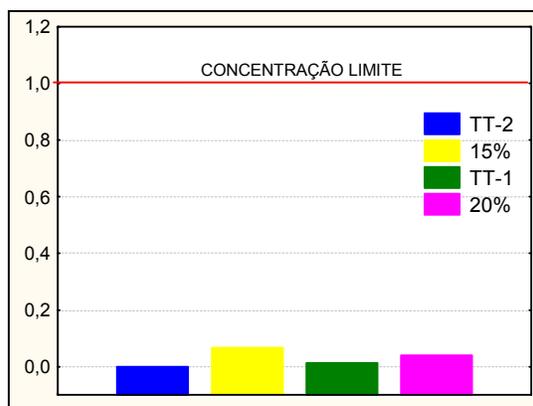


Gráfico 6.21 – Concentração de chumbo (mg/L) no extrato lixiviado.

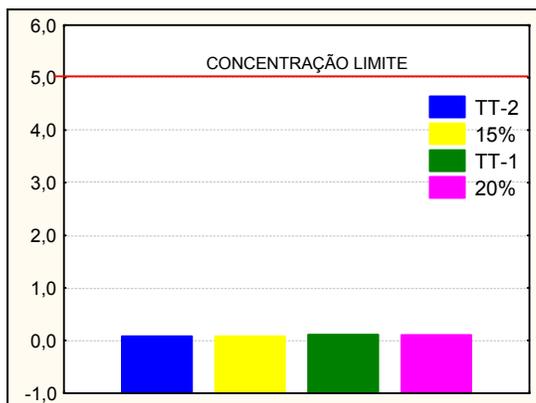


Gráfico 6.22 – Concentração de cromo (mg/L) no extrato lixiviado.

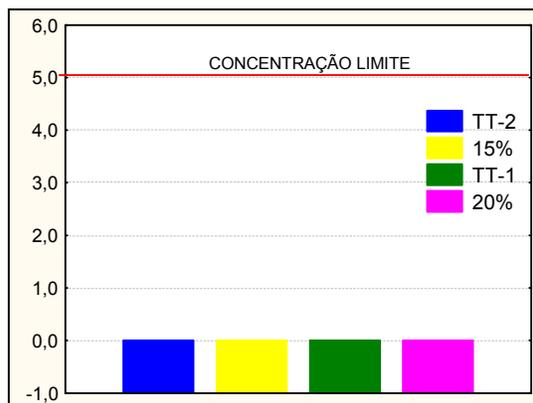


Gráfico 6.23 – Concentração de prata (mg/L) no extrato lixiviado.

6.3.2.2 Ensaio de solubilização

Os Gráficos de 6.24 a 6.29 apresentam, respectivamente, as concentrações de cádmio, chumbo, ferro, cromo, cobre e manganês do extrato solubilizado de três amostras dos tijolos; a linha vermelha indica a concentração máxima permitida pela norma. Por dificuldades operacionais não foram analisados todos os metais constantes na NBR10006 (ABNT, 2004c).

Observando os gráficos se nota que, em relação à concentração aos elementos analisados, todas as amostras apresentaram valores inferiores ao limite estabelecido pela Norma.

Como consequência destes resultados, todos os tijolos, tanto os fabricados com lodo quanto os fabricados sem lodo, foram caracterizados como resíduos Classe II A – não perigosos e inertes.

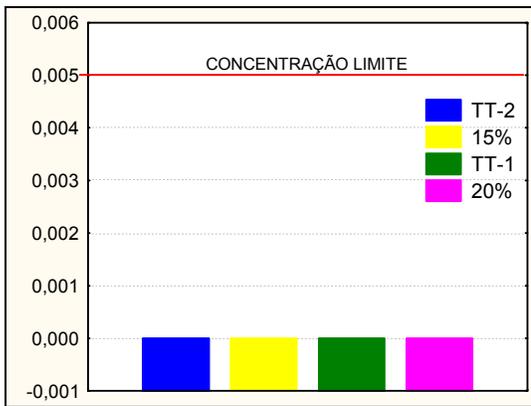


Gráfico 6.24 – Concentração de cádmio (mg/L) no extrato solubilizado.

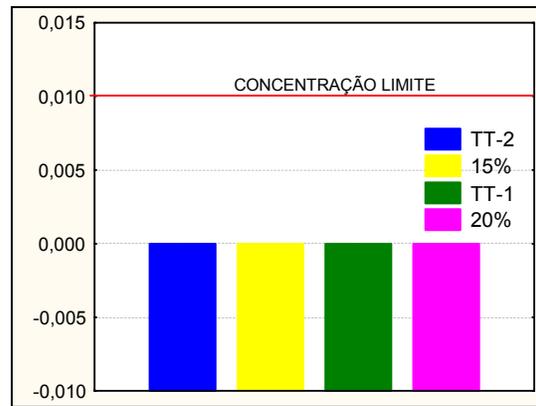


Gráfico 6.25 – Concentração de chumbo (mg/L) no extrato solubilizado.

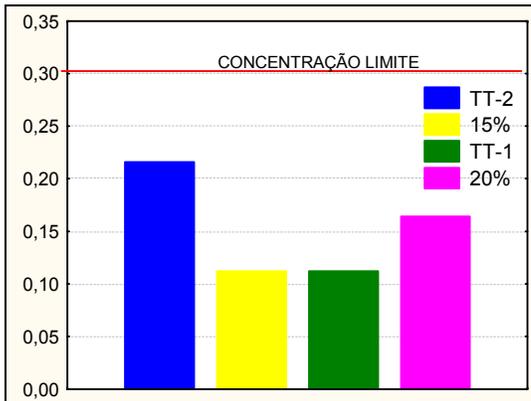


Gráfico 6.26 – Concentração de ferro (mg/L) no extrato solubilizado.

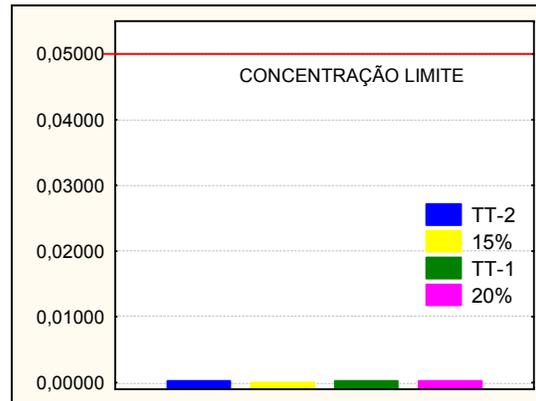


Gráfico 6.27 – Concentração de cromo (mg/L) no extrato solubilizado.

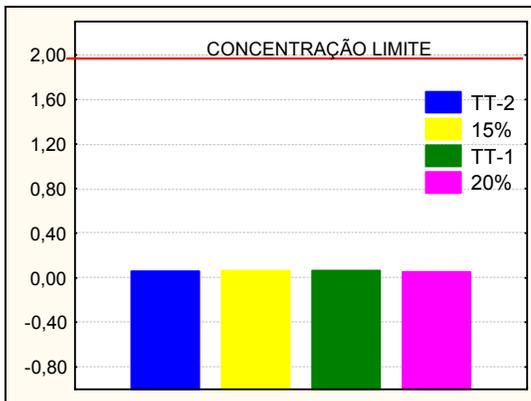


Gráfico 6.28 - Concentração de cobre (mg/L) no extrato solubilizado.

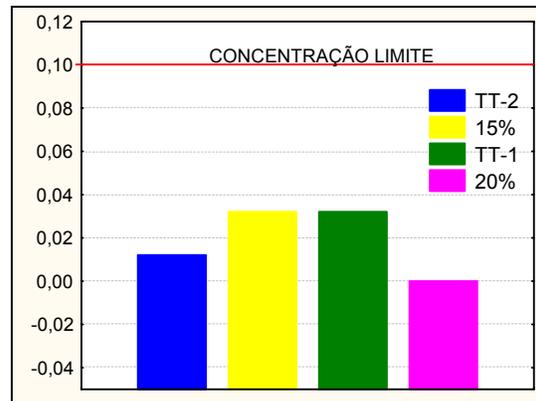


Gráfico 6.29 - Concentração de manganês (mg/L) no extrato solubilizado.

7 CONCLUSÕES

Com a observação dos valores de Absorção de Água e Resistência à Compressão constatou-se que a formulação de melhor desempenho foi a 3:2.

Sobre os tijolos maciços fabricados com lodo, pode-se concluir que:

- Não houve qualquer alteração no odor dos tijolos, mesmo em altas dosagens de lodo;
- Os tijolos fabricados com dosagens de 5% e 10% não apresentaram variação de tamanho significativa; para as dosagens de 15% e 20%, os tijolos tiveram uma variação de tamanho de cerca de 4%;
- Os tijolos fabricados com 25% de lodo apresentaram fissuras, cantos frágeis e falhas nas arestas. Os tijolos fabricados com a dosagem de 35% ficaram muito quebradiços, sem qualquer resistência mecânica e os tijolos com dosagem de 40% se fragmentaram durante a retirada do forno;
- Das dosagens testadas, a testemunha da 1ª etapa, a com 10% e a com 25% de lodo apresentaram variação dimensional superior ao limite estabelecido pela norma. Contudo este fenômeno não depende diretamente da dosagem de lodo, mas provavelmente, depende do método de produção dos tijolos;
- A adição de lodo acarreta em perda significativa da massa dos tijolos, contudo, esta mudança não é relevante quando há adição de apenas 5% de lodo à massa cerâmica e quando há um aumento de 10 para 20% de lodo;
- A absorção de água está significativa e diretamente ligada ao aumento da dosagem de lodo: os tijolos fabricados com lodo, em todas as dosagens, absorveram mais água do que o tijolo-testemunha, destacando a dosagem de 25% que absorveu, em média, cerca de 160% a mais do que o tijolo-testemunha na sua etapa de fabricação;
- A resistência à compressão foi significativamente diminuída com a adição de lodo: os tijolos com 5% de lodo perderam, em média, cerca de 45% da resistência obtida pelo tijolo-testemunha; os tijolos fabricados com 15 e 20% perderam na faixa de 70% da resistência máxima, contudo ainda atingiram a resistência mínima necessária.

- As dosagens mais altas, de 25 e 30%, perderam cerca de 90% da resistência do tijolo-testemunha e, portanto, não são tecnicamente aceitáveis;
- Tanto os tijolos-testemunha das duas etapas de fabricação quanto os fabricados com 15 e 20% de lodo, em uma futura demolição da alvenaria com eles construída, se caracterizariam como resíduo Classe II –não perigoso;

Assim, para as condições especificadas nesta pesquisa, pode-se concluir que a dosagem máxima que pode ser incorporada à massa cerâmica, atendendo simultaneamente aos requisitos técnicos e ambientais, é a de 20% de lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Cerâmica no Brasil - Números do Setor - Cerâmica Vermelha. São Paulo, 2003. Disponível em <http://www.abceram.org.br/asp/abc_283.asp> Acessado em 19 de setembro de 2007.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering*. 419: 306-309, 2006.

AISSE, M. M.; VAN HAANDEL, A. C.; VON SPERLING, M.; CAMPOS, J. R.; CORAUCCI FILHO, B.; ALÉM SOBRINHO, P. Tratamento e destino final de lodo gerado em reatores anaeróbios. 271-299 p. In: CAMPOS, J. R. (coord.) *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.

ALLEMAN, J. E.; BERMAN, N. Construtive sludge management: biobrick, *Journal of Environmental Engineering* 110 (2): 301-311, 1984.

ALVES, M. R. F. V.; HOLANDA, F.S. R. Reciclagem de Borra Oleosa através de Incorporação em Blocos Cerâmicos de Vedação. *Cerâmica Industrial*, 10 (3): 41-46, 2005.

ANDRADE NETO, C. O. *Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1997. 301 p.

ANDRADE NETO, C. O.; ALÉM SOBRINHO, P.; MELO, H. N. S.; AISSE, M. M. Decanto-digestores. 117-138 p. In: CAMPOS, J. R. (coord.) *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.

ANDREOLI, C.V.; CHERUBINI, C.; FERREIRA, A.C.; TELES, C.R.; BERNET, P.M.; FAVARIN, F.; CASTRO, A.R. Otimização do processo de secagem e desinfecção do lodo de esgoto anaeróbico utilizando leitos de secagem aliados à estufa plástica e biogás. In: *Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre: ABES, 2000. CD-ROM.

ANDREOLI, C.V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 3. ed. Belo Horizonte: Depto. Eng. Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.

ÂNGULO, S. C; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: *IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações*. IBRACON. São Paulo - SP. 2001. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>. Acessado em 29 de Agosto de 2006.

APHA-AWWA-WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. Nova York: Public Health Association Inc., 1992. 1325 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6460/83 - Tijolo maciço cerâmico – Verificação da resistência à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1983 a. 3p.

——— NBR 7170/83 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1983b. 4p.

——— NBR 6459/84 – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a. 6p.

——— NBR 7180/84 – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b. 3p.

——— NBR 7181/84 – Análise Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c. 13p.

——— NBR 12209/90 - Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 12p.

——— NBR 7171 – Bloco Cerâmico para Alvenaria – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 8 p.

——— NBR 13969/97 -Tanques sépticos: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 60p.

——— NBR 10004/04 - Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 71p.

——— NBR 10005/04 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. 16p.

——— NBR 10006/04 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c. 3p.

BALASUBRAMANIAN, J.; SABUMON, P. C.; LAZAR, J. U.; ILANGOVAN, R. Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. *Waste Management*. 26 (1): 22-28, 2006.

BELLI FILHO, P.; OLIVEIRA, R.; KOERICH, K.; MATIAS, W. G.; SOARES, H. M. Lodos de Tanques Sépticos - Caracterização e tratamento anaeróbio em um digestor piloto. In: *XXIX Congresso Interamericano de Ingeniería Y Ambiental*. San Ruan, 2004. Disponível em <[www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/ PuertoRico29/belli.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/belli.pdf)> Acessado em 25 de setembro de 2007.

CAMPREGHER, N. *Estudo da viabilidade da incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico*. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). UFSC.

CARVALHO, O. O.; SOUZA, L. C.; REGO, J. M.; LEITE, J. Y. P. *Perfil da Indústria de Cal no Rio Grande do Norte*. Relatório: FIERN/SENAI. Natal, 2000. CD-ROM

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Introdução. 1-9 p. In: CASSINI, S. T. (coord). *Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003. 210 p.

CHANG, A. C.; PAN, G.; PAGE, A. L.; ASANO, T. Developing Human Health-related Chemical Guidelines for Reclaimed Waster and Sewage Sludge Applications in Agriculture. Califórnia: Wealth Human Organization, 2001. 94 p. Disponível em <http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gwwuchemicals.pdf> . Acessado em 05 de março de 2007.

CHEESEMAN, C. K.; VIRDI, G. S. Properties and microstructure of light weight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling* 45: 18-30, 2005

CUSIDÓ, J. A.; DEVANT, M.; CELEBROVSKY, M.; ARTEAGA. Ecobrick: a new ceramic material for solar buildings. In: IV World Renewable Energy Congress (WREC). Denver, 1996. 3 (1-4): 327-330.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. ME 093/94 - Solos: Determinação da densidade real – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994. 3p.

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD & RURAL AFFAIRS – DEFRA. Raising the Quality. 1998. Disponível em <<http://www.defra.gov.uk/Environment/water/industry/waterquality/rtq14.htm>> Acessado em 05 de março de 2007.

DURANTE-INGUNZA, M. P.; ANDREOLI C. V, NASCIMENTO, R. M.; TINOCO, J. D.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S. Uso de resíduos do saneamento na fabricação de cerâmica vermelha. 283-359 In: Andreoli C. V (coord) *Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 471 p.

DUTRA, R. P. S.; ARAÚJO, P. A. S.; MACEDO, R. M. P. R.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; MARTINELLI, A. E.; PASKOCIMAS, C. A. Desenvolvimento de formulações de massas para a indústria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte. *Cerâmica Industrial*, 11 (3): 41-46, 2006 b

DUTRA, R. P.; VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; PASKOCIMAS, C. A.; MELO, P. T. Avaliação da Potencialidade de Argilas do Rio Grande do Norte – Brasil *Cerâmica Industrial*, 11 (2) :42-46, 2006 a

FERNADES, F. *Manual Prático para a compostagem de biossólidos*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84 p.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Produção e características dos biossólidos. 17-25 p. *In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. (org.) Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 97 p.

FONTES, C. M. A. *Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland*. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

GEYER, A. L. *Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto*. Porto Alegre, 2001. Tese (Doutoramento em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GONÇALVES, R. F. *Gerenciamento de lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2000. 95 p.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de Lodo de Esgotos. 56-86 p. *In: ANDREOLI, C. V. (coord.) Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. 1. ed. Rio de Janeiro : RiMa/ABES, 2001. 282 p.

GUTIERREZ, L. A. C. L.; BEZERRA, A. J. R.; FREITAS, W. A. M.; MEIRA, R. C. S.; PEREIRA, J. A. R. Desaguamento de lodo de tanques sépticos em leitos de secagem no município de Belém – PA. *In: VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.*, Fortaleza: ABES, 2006. CD-ROM.

HEREK, L. C. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G.; UEMURA, V. O.; PANCOTTE, L. P. Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo da Indústria Têxtil em Material Cerâmico. *Cerâmica Industrial*, 10 (4) 41-46, 2005

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental., *Cerâmica* 51: 85-95, 2005.

JÓRDAN, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; ROMERO, M.; RINCÓN, J. Ma. Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. *Applied Clay and Science* 30 (3-4): 219-224, 2005.

LIEW A. G.; IDRIS, A.; WONG, C. H. K; NOOR, M. J. M. M.; BAKI, A. M. M. Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization. *Waste Management and Research* 22 (4):226-233, 2004 a.

LIEW A. G.; SAMAD A. A.; WONG, C. H. K; JAAFAR, M. S; BAKI, A. M. M. Reusability of sewage sludge in clay bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 6(1):41-47, 2004 b.

LIN, D.; LIN, K.; HUNG, M.; LUO, H. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of Hazardous Materials*. 145: 58-64, 2007.

LIN, D.; LUO, H.; SHEEN, Y. Glazed tiles manufactures from incinerated sewage sludge ash and clay. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55: 163-172, 2005.

LIN, K.; LIN, C. Hydration properties of eco-ciment pastes from waste sludge ash clinkers. *Journal of the Air & Waste Management Association* 54:1534-1542, 2004.

MEDEIROS, S. A.; COSTA, C. G.; INGUNZA, M. P D.; SANTOS Jr.; O F.; PEREIRA, K. L. A. Possíveis aplicações de lodo de fossa séptica na construção civil. *In: VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.*, Fortaleza: ABES, 2006. CD-ROM.

MEDEIROS, S.A. *Incorporação do resíduo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica*. Natal, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MENESES, C. G. R. Caracterização físico-química e biológica dos resíduos de sistemas tipo tanque séptico-sumidouro da cidade do Natal. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). UFRN, 2001.

MENEZES, R. R; GLEMIREs, A. N.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6 (2): 303-313, 2002.

METCALF & EDDY. Ingeniería de águas residuales: tratamento, vertido y reutilización. 3. ed. Madrid: McGraw-Hill, 1995. 1485 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 463 p.

MOTTA, J. F. M.; ZANARD, A.; CABRAL Jr., M.; TANNOA, L. C.; CUCHIERATO, G. As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins. *Cerâmica Industrial*, 9 (2): 33-46, 2004

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JR, M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. *Cerâmica Industrial*.6 (2): 28-39, 2001

NUVOLARI, A ; FIGUEIREDO, F. F . Uso do lodo de estação de tratamento de água em tijolos cerâmicos maciços. *In: I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável*. Florianópolis, 2004. CD-ROOM.

NUVOLARI, A. *Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos maciços: aspectos tecnológicos e ambientais*. Campinas, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas.

OKUNO, N.; USHIKAWA, Y.; SHIMIZU, A.; YOSHIDA, M. Utilization of sludge in building material., *Water Science and Technology* 49 (10): 225-232, 2004.

OKUNO, N.; YAMADA, A. Evaluation of full scale solidification processes implemented in Tokyo lightweight aggregate, slag and brick. *Water Science and Technology* 41 (8): 69-76, 2000.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Análise do impacto causado pela utilização de resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. 50: 185-189, 2004.

PETRUCCI, E.G.R. *Materiais de Construção*. 11 ed. Porto Alegre: GLOBO, 1998. 435p.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial* 02(01/02): 31-35, 1997.

PRIM, E. C. C.; CASTILHO Jr, A. B.; FRANCESCHET, M.; OLIVEIRA, J. R. W; PEREIRA Jr, I. H. Estabilização de lodo de ETA e ETE para uso como material de engenharia. *In: VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Fortaleza: ABES, 2006. CD-ROM

ROCHA, C.; SANT'ANNA, F. S. P. Regulamentação para despejos de caminhões limpa-fossas na ETE-Jarivatuba, Joinville-SC. *In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Campo Grande: ABES, 2005. CD-ROM.

ROMANO NETO, R.; SANTOS, E.F.; IZIDORO, G.; VIEIRA, P.C.; SCHNEIDER, I. A.H. Utilização do lodo de uma estação de tratamento de drenagem ácida de minas em materiais cerâmicos. *In: XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005. CD-ROM

SABBAG, M. G.; MORITA, D. M. Uso de lodo de estação de tratamento de água na indústria cerâmica. *In: Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP*. São Carlos: Universidade Federal de São Paulo – USP, 2003.

SANTOS, A. D. *Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo*. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal de São Paulo – USP

SAYED, M. H. A.; MADANY, I. M.; BUALI, A. R. M. Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building* 9 (1):19-23, 1995.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE E URBANISMO – SEMURB. *Anuário Natal 2005*. Natal: Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística, 2005. 280 p.

SOARES, S. R.; CASTILHOS Jr, A. B.; MARTINS, A.; BREITENBACH, F. E.; LUPATINI, G. *Análise do Ciclo de Vida de Produtos (revestimento, blocos e telhas) do Setor Cerâmico da Indústria de Construção Civil: Panorama do Setor*. Relatório: FINEP/Habitare. Santa Catarina, 2002. UFES. CD-ROM

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1989. 499 p.

SOUZA, F.R. *Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de Estações de Tratamento de Água e de demolições*. São Carlos, 2006. (Dissertação de mestrado em construção civil). Universidade Federal de São Carlos.

TAY, J. Bricks manufactured from sludge. *Journal of Environmental Engineering* 113 (2): 278-284, 1987.

TAY, J.; SHOW, K. Resource recovery of sludge as a building and construction material – a future trend in sludge management. *Water Science and Technology* 36 (11): 259-266, 1997.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R.; 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* 52: 215-220, 2006.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – UNCED. *Agenda 21 Global*. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21/eq21.htm>> Acessado em 22 de junho de 2007.

VERÇOSA, E. J. Materiais cerâmicos. 527-570. *In*: BAUER, F. L. A. (coord) *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnico e Científicos Editora S.A, 1994. 951 p.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. de; PINATTI, D. G. Characterization of red ceramic body used in the production of bricks in the region of Campos dos Goytacazes - RJ. *Cerâmica* 46(297), 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132000000100003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 20 de junho de 2007.

WENG, C. H.; LIN, D. F.; CHIANG, P. C. Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research*, 7: 679-685, 2003.