



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ELZELIS DE AGUIAR MULLER

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA COMO MATÉRIA-PRIMA NA CONFECÇÃO DE TIJOLOS
CERÂMICOS: ESTUDO DE CASO - ETA BOLONHA**

**Belém-PA
2009**

Elzelis de Aguiar Muller

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA COMO MATÉRIA-PRIMA NA CONFECÇÃO DE TIJOLOS
CERÂMICOS: ESTUDO DE CASO – ETA BOLONHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil, na área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental e com Linha de Pesquisa voltada para Saneamento Ambiental e Infra-Estrutura Urbana.

Orientadora: Profª Drª Luiza Carla Girard Machado

Co-Orientador: Profº Dr. Alberto Carlos de Melo Lima

**Belém-PA
2009**

ELZELIS DE AGUIAR MULLER

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA COMO MATÉRIA-PRIMA NA CONFECÇÃO DE TIJOLOS
CERÂMICOS: ESTUDO DE CASO – ETA BOLONHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará para obtenção do Título de Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil, na área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental e com Linha de Pesquisa voltada para Saneamento Ambiental e Infra-Estrutura Urbana, submetida a Banca Examinadora do Colegiado, constituída pelos professores:

Data de aprovação:

Banca Examinadora:

Profª Drª Luiza Carla Girard Machado (Orientadora)
Universidade Federal do Pará/UFPA

Profº Dr. Alberto Carlos de Melo Lima (Co-Orientador)
Universidade do Estado do Pará/UEPA

Profº Dr. André Luiz da Silva Salgado Coelho
Universidade Federal do Pará/UFPA

Profª Drª. Dione Mari Morita
Universidade de São Paulo/Escola Politécnica/EPUSP

Julgado em: ____/____/____

Conceito: _____

Belém-PA
2009

DEDICATÓRIA

À Deus pelo milagre da vida;

Aos meus pais, Carlos e Elza pelo apoio e carinho sem precedentes e que compartilharam o meu dia-a-dia de alegria, tristeza, esperança;

Ao meu esposo, Alcides pela compreensão nas minhas ausências;

À minha sobrinha Inaray que mesmo pequenininha sempre me apoiou e me recebeu de braços abertos dizendo: *“tia eu também vou fazer mestrado quando crescer”*;

A minha grande amiga Valdizia Mendes e família pelo apoio nas visitas técnicas a EPUSP;

A minha orientadora Profª Drª. Luíza Carla Girard Teixeira Machado pela dedicação, orientação e apoio ao longo deste trabalho

Ao meu Co-orientador Profº Dr. Alberto Carlos de Melo Lima pela aceitação, pelas orientações competentes, amizade e permanente disponibilidade no transcorrer desta pesquisa e no curso de mestrado.

A Profª Drª Dione Mari Morita da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, pelas orientações, dedicação e a forma carinhosa como sempre fui recebida na EPUSP em busca da construção do conhecimento e sugestões fornecidas ao longo desta pesquisa meu muito obrigada.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal do Pará, que nos proporcionou a realização deste Curso de Mestrado, nossos sinceros agradecimentos;

Aos Professores do Programa de Mestrado em Engenharia Civil/UFGA, pela habilidade na arte de ensinar;

A Secretária do Programa de Mestrado em Engenharia Civil da UFGA, Dona Cleide, pela atenção e forma carinhosa de atendimento quando por diversas vezes solicitei;

A Universidade do Estado do Pará, que me apoiou no desenvolvimento dessa pesquisa, especialmente aos Gestores do Curso de Engenharia de Produção; na pessoa do Prof^o Msc. André Clementino Santos, Prof^o Msc. Yveline Santos e Prof^o Msc. Manoel Maximiano.

A Universidade da Amazônia pelo apoio técnico na viabilização dos ensaios físicos;

A minha família e amigos pelo incentivo, a amizade e a compreensão;

Ao meu irmão Edécio Muller que esteve sempre presente e me apoiando em todas as fases deste trabalho, auxiliando-me nas tarefas mais difíceis;

Ao meu amigo Hélcio Arruda pelo convívio do dia-a-dia ao longo do curso de mestrado;

Ao Prof^o Msc. Evaristo Rezende dos Santos pelo apoio e incentivo na realização do mestrado;

A Prof^a Ms. Vera Braz pelo apoio, ensinamento e pela ampliação de minha visão de vida e de ciência;

À Prof^a Dr^a Ana Rosa Barp pelo incentivo à realização do Mestrado;

À Dra. Ivanize Pimentel, minha amiga de todas as horas

A todos os técnicos e funcionários das entidades, listados abaixo, que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desta pesquisa;

Universidade da Amazônia – ETEA e Laboratório de Materiais de Construção, especialmente as amigas Rosilda Moraes e Nazaré Lira, aos técnicos Roberto e Ordilei ao Engenheiro Wandemyr Mata pela gentileza, apoio e competência ao longo desta pesquisa;

A Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, especialmente a Prof^a Dr^a Dione Mari Morita;

Ao IFPA através da Prof^a Msc. Márcia Valéria Cunha e Prof^o. Dr. Oscar Jesus Choque Fernandez que deram todo o apoio na realização dos ensaios de Difração de Raios-X;

A Prof^a Msc. Ilka Serra do IFPa pelo apoio nos ensaios químicos, muito obrigada;

À Embrapa, na pessoa do Engenheiro Químico Orivan Teixeira pelo apoio na realização dos ensaios químicos.

A empresa MACAFERRI, pelo fornecimento da manta Geotextil para confecção do leito de secagem na pessoa do Engenheiro Itamar ;

A COSANPA que através de seus técnicos (especialmente o Sr. Manoel, engenheiros Tomás, José Carlos e Edivaldo) da Estação de tratamento de água da ETA Bolonha que nos auxiliaram a todo instante na coleta de lodo e possibilitaram a concretização deste trabalho.

A Indústria Cerâmica Brasília, especialmente ao Sr. Alcidones Leal, proprietário da cerâmica que mostrou-se sempre disposto, atencioso e pronto a ajudar e forneceu toda a infra-estrutura de sua industria para a realização deste trabalho os meus sinceros agradecimentos e a Arquiteta Mirian Leal, professora do curso de arquitetura da Universidade da Amazônia, que articulou e possibilitou o andamento desta pesquisa.

A Vanessa da Assessoria de Comunicação da Unama pelo apoio e gentileza na confecção dos convites;

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta pesquisa.

*“Dirige os meus passos nos teus
caminhos, para que as minhas pegadas
não vacilem”*
Salmo 17:5

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Esquema de uma ETA convencional com pontos de geração de resíduos	24
Figura 3.2	Formas de desaguamento de Lodos de ETA's	30
Figura 3.3	Massa de Lodo retida no leito de drenagem empregando uma manta Geotextil	31
Figura 3.4	Etapas de desenvolvimento de leitos de secagem proposta por Cordeiro (2001)	32
Figura 3.5	Formas de aproveitamento de lodo de ETA's	33
Figura 3.6	Fluxograma do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos	34
Figura 3.7	Representação esquemática dos limites de consistência	43
Figura 3.8	Gráfico de Plasticidade (Ábaco de Casagrande)	45
Figura 4.1	Organização das etapas de trabalho	49
Figura 4.2	Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho	51
Figura 4.3	Instalações da Industria Cerâmica, onde foi realizado O experimento	52
Figura 4.4	Argila em processo de repouso no pátio da indústria cerâmica por aproximadamente 6 meses	52
Figura 4.5	Fluxograma do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos	53
Figura 4.6	Processo de colocação de argilas nas esteiras (operação manual); a) argila gorda; b) argila magra (argilão)	53
Figura 4.7	Processo de mistura da massa cerâmica (argila magra e gorda)	54
Figura 4.8	Processo de extrusão	54
Figura 4.9	Processo de transporte e secagem dos tijolos cerâmicos; a) transporte dos tijolos; b) setor de secagem	55
Figura 4.10	Estufa para secagem dos tijolos moldados	55
Figura 4.11	Forno para queima dos tijolos cerâmicos	56
Figura 4.12	Manta Geotextil MT600 utilizada nas UDL's	57
Figura 4.13	ETA Bolonha (RMB)	58
Figura 4.14	Fluxograma do processo de tratamento da ETA Bolonha	59
Figura 4.15	Ponto de aplicação do Cloreto de Polialumínio e a calha Parshall na ETA Bolonha	59
Figura 4.16	Esquematisação do Decantador da ETA Bolonha	60
Figura 4.17	Decantador da ETA Bolonha	60
Figura 4.18	UDL1 com a) revestimento de seixo no fundo e b) aplicação da manta Geotextil nas paredes e no fundo localizado próximo a c) válvula de fundo do decantador nº 04	63
Figura 4.19	UDL1 em operação com as amostras de lodo	64
Figura 4.20:	Montagem da UDL2 ao lado dos decantadores	64

Figura 4.21	a) Operador coletando lodo na válvula de fundo do decantador nº 04 e b) coleta de amostras do lodo para análise química	67
Figura 4.22:	Lançamento da amostra do lodo na UDL1	67
Figura 4.23:	Monitoramento do lodo contido na UDL1 onde observam-se nas figuras a) lodo após o lançamento; b) lodo com 02 dias de secagem; c) lodo com 07 dias e d) lodo com 10 dias.	68
Figura 4.24:	Manta geotextil limpa e preparada para utilização em novos ensaios	68
Figura 4.25:	Coleta manual no fundo do decantador nº 04	70
Figura 4.26:	a) Transporte da amostras de lodo e b) lançamento das amostras de lodo em um dos reservatórios da UDL2.	70
Figura 4.27:	Monitoramento do lodo desaguado na UDL2 com a) durante lançamento; b) 5 dias; c) 7 dias; d) 11 dias; e) 13 dias; f) 15 dias, com retirada da amostra para análise e encaminhamento a indústria cerâmica.	71
Figura 4:28	Colocação do lodo desaguado em sacos plásticos para transporte à industria cerâmica após as fases de drenagem e secagem na UDL2.	71
Figura 4:29	Difratograma de Raios-X da marca PHILIPS	74
Figura 4.30:	Tijolo-testemunho (0% de lodo)	75
Figura 4.31:	Processo de fabricação dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha; a) lodo no pátio da industria cerâmica; b) massa cerâmica (0% de lodo); c) mistura lodo/argila; d) lançamento da mistura (esteira); e) homogeneizador; f) extrusora; g) vagonetes transportadores; h) transporte dos tijolos.	76
Figura 4.32:	Continuação do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha; a) setor de secagem; b) queima dos tijolos; c) seleção e expedição.	77
Figura 4.33	Aspecto visual da coloração dos tijolos cerâmicos utilizados no ensaio de resistência à compressão	80
Figura 4.34	Tijolo capeado com argamassa pronto para ensaio de resistência à compressão	81
Figura 4.35	Prensa Hidráulica usada para a realização do ensaio de resistência à compressão	81
Figura 4.36:	Separação e identificação dos tijolos cerâmicos para amostragem	82
Figura 4.37:	Secagem em estufa	83
Figura 4.38:	Tijolos imersos em tanque com água	83
Figura 5.1	Diagrama Granulométrico de Winkler	91
Figura 5.2	Difratograma de Raios-X - Lodo do Lote nº 03	95
Figura 5.3	Difratograma de Raios-X - Lodo do lote nº 04	95
Figura 5.4	Difratograma de Raios-X da Argila Gorda	95
Figura 5.5	Imagem de MEV do Lodo do Lote nº 03	96
Figura 5.6	Diatomáceas presentes no Lodo do Lote nº 03	97

Figura 5.7	Amostra de lodo do Lote nº 03 espectro de EDS da região indicada	97
Figura 5.8	Imagem de MEV do Lodo do Lote nº 04	98
Figura 5.9	Diatomáceas presentes no Lodo do Lote nº 04	98
Figura 5.10	Imagem de MEV da amostra do lodo do lote nº 04 e Espectro de EDS da região indicada	99
Figura 5.11	Imagem de MEV da argila magra	99
Figura 5.12	Imagem de MEV da argila gorda	100
Figura 5.13	Espectros de EDS da amostra de argila magra	100
Figura 5.14	Espectro de EDS da amostra de argila gorda	101
Figura 5.15	Valores encontrados de absorção de água para os tijolos cerâmicos com 0% de lodo (tijolo testemunho), 10% e 12% de lodo proveniente do lote nº 03 da ETA Bolonha	106
Figura 5.16	Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo a massa cerâmica	108
Figura 5.17	Valores encontrados de absorção de água para os tijolos cerâmicos com 0% de lodo (tijolo testemunho), 10% e 12% de lodo proveniente do lote nº 04 da ETA Bolonha	114
Figura 5.18	Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo a massa cerâmica	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.	Materiais encontrados em resíduos provenientes em processo de tratamento de água	25
Tabela 3.2	Características dos Lodos de Estações de Tratamento de Água (parâmetros convencionais)	26
Tabela 3.3	Características dos lodos de Estações de Tratamento de Água (Parâmetros não Convencionais)	27
Tabela 3.4	Características gerais dos resíduos produzidos na ETA	28
Tabela 4.1	Parâmetros usados no processo de queima da cerâmica Brasília	56
Tabela 4.2	Quantidades de tijolos cerâmicos produzidos em relação a incorporação de lodo	78
Tabela 4.3:	Classificação dos tijolos cerâmicos segundo valores obtidos de resistência a compressão	79
Tabela 5.1	Teores de sólidos do lodo	86
Tabela 5.2	Teores de carbono orgânico	86
Tabela 5.3	Teor de umidade do lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda e da massa cerâmica – UDL1	86
Tabela 5.4	Teor de umidade do lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda, e da massa cerâmica - UDL2	87
Tabela 5.5	Granulometria e massa específica das amostras de lodo coletadas no decantador nº 04 da ETA Bolonha	88
Tabela 5.6	Granulometria e massa específica das amostras de argila tipo magra	88
Tabela 5.7	Granulometria e massa específica das amostras de argila tipo gorda	89
Tabela 5.8	Composição granulométrica da massa cerâmica utilizada no processo industrial	90
Tabela 5.9	Limites de Liquidez, Plasticidade e Índice de Plasticidade encontrados nas amostras de lodo da ETA Bolonha	92
Tabela 5.10	Limites de Liquidez, Plasticidade e Índice de Plasticidade encontrados nas amostras de argila tipo magra	93
Tabela 5.11	Limites de Liquidez, Plasticidade e Índice de Plasticidade encontrados nas amostras de argila tipo gorda	93
Tabela 5.12	Classificação das amostras segundo o Índice de Plasticidade	93
Tabela 5.13	Limites de consistência das amostras da massa Cerâmica	94
Tabela 5.14	Dimensões dos tijolos com e sem adição de lodo Lote nº 03	103

Tabela 5.15	Esquadro e Planeza das faces dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 03	104
Tabela 5.16	Absorção de água dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 03	105
Tabela 5.17	Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 03	107
Tabela 5.18	Dimensões dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 04	111
Tabela 5.19	Esquadro e Planeza das faces dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 04	112
Tabela 5.20	Absorção de água dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 04	113
Tabela 5.21	Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo - Lote nº 04	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	Síntese das unidades componentes da ETA Bolonha	62
Quadro 4.2	Quadro resumo das datas da fase de coleta do lodo e lançamento nas UDL's	65
Quadro 4.3:	Resumo das quantidades de lodo produzido em cada lote nas UDL's	72

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Quadros	xiii
Resumo	xvi
Abstract	xvii
1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO GERAL	21
2.1 Objetivos Específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Resíduos Gerados em ETA's	22
3.1.1 Origem do Lodo em ETA's Convencionais	22
3.1.2 Características dos Lodos de Estações de Tratamento de Água	24
3.1.3 Tratamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água	29
3.1.4 Disposição Final de Lodo de Estações de Tratamento de Água	32
3.2 O Processo Produtivo de Cerâmica Vermelha	34
3.3 Lodo de ETA como Produto Cerâmico	37
3.4 Materiais Cerâmicos	39
3.4.1 Plasticidade e Granulometria	40
3.4.2 Retração	46
3.4.3 Porosidade e Absorção	46
3.4.4 Resistência à Flexão	47
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	49
4.1 Indústria Cerâmica	50
4.2 Viagem à São Paulo	57
4.3 Experimento	58
4.3.1 ETA Bolonha	58
4.3.2 Implantação e Operação da Unidade de Desaguamento de Lodo (UDL)	62
4.3.3 Produção dos Tijolos Cerâmicos	72
4.3.4 Ensaios Para Caracterização dos Tijolos Cerâmicos	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1 Determinação dos teores de sólidos e de carbono orgânico	85
5.2 Determinação dos teores de umidade do lodo, das argilas e da massa cerâmica	86

5.2.1	Lote nº 03 - Proveniente da UDL1	86
5.2.2	Lote nº 04 - Proveniente da UDL2	87
5.3	Determinação da Granulometria por Sedimentação	87
5.3.1	Lodo da ETA Bolonha	88
5.3.2	Argila do Tipo Magra	88
5.3.3	Argila do Tipo Gorda	89
5.3.4	Massa Cerâmica	89
5.4	Determinação dos Limites de Consistência	92
5.5	Determinação da Composição Mineralógica por Difração de Raios-X	94
5.6	Incorporação do Lodo da ETA Bolonha na Massa Cerâmica	101
5.6.1	Lote nº 03 (UDL1)	101
5.6.1.1	Caracterização dos Tijolos - Lote nº 03	101
5.6.1.2	Dimensões dos Tijolos - Lote nº 03	102
5.6.1.3	Esquadro e Planeza das Faces - Lote nº 03	103
5.6.1.4	Absorção de Água - Lote nº 03	104
5.6.1.5	Resistência à Compressão - Lote nº 03	106
5.6.1.6	Inspeção Visual - Lote nº 03	109
5.6.2	Lote nº 04 (UDL2)	109
5.6.2.1	Caracterização dos Tijolos - Lote nº 04	109
5.6.2.2	Dimensões dos Tijolos - Lote nº 04	110
5.6.2.3	Esquadro e Planeza das Faces - Lote nº 04	111
5.6.2.4	Absorção de Água - Lote nº 04	112
5.6.2.5	Resistência à Compressão - Lote nº 04	114
5.6.2.6	Inspeção Visual - Lote nº 04	116
6.	CONCLUSÃO	117
7.	RECOMENDAÇÕES DESTE TRABALHO	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXO A -	Metodologia para Caracterização Física das Amostras das Argilas, Lodo e da Mistura Lodo/Argila	126
ANEXO B -	Ensaio de Limite de Consistência, Granulometria e Resistência à Compressão	144

RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar a possibilidade de incorporar o lodo da Estação de Tratamento de Água do Bolonha (RMB), na fabricação de tijolos cerâmicos para uso na construção civil. Duas unidades de desaguamento de lodo (UDL) foram implantadas e operacionalizadas na ETA Bolonha. Antes da confecção dos tijolos cerâmicos, o lodo da ETA Bolonha foi desaguado nas UDL's que eram dotadas de manta permeável, e em seguida foram caracterizadas fisicamente e mineralogicamente. O lodo foi adicionado a massa cerâmica de uma indústria local para a produção de tijolos. Diversas proporções da mistura lodo e argila foram testadas com intuito de encontrar a proporção adequada para a produção de tijolos cerâmicos (10%, 12% e 20% de lodo de ETA à massa cerâmica). Ensaios de laboratório foram realizados para avaliar sua resistência, absorção de água, dimensões adequadas e aspecto visual. Não foi possível a incorporação de 20% de lodo à massa cerâmica devido à alta plasticidade e a dificuldade de fabricação dos tijolos cerâmicos, no entanto, as proporções de 10% e 12% de lodo de ETA foram as que tiveram resultados melhores quanto aos parâmetros de resistência, indicando que os tijolos cerâmicos podem ser produzidos com a incorporação de até 12% de lodo de ETA.

Palavras-Chave: Estação de Tratamento de Água, Lodo de Estação de Tratamento de Água, Cerâmica Vermelha, Usos Benéficos do Lodo

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the possibility of incorporating the sludge in the water treatment station of Bolonha (RMB), in the manufacture of ceramic bricks for use in construction. Two units of flow of mud (UDL) were established and operationalized in the ETA Bolonha. Before the preparation of ceramic bricks, the mud flows were ETA Bologna in UDL's that were equipped with open collar, and then were characterized physically and mineralogically. The sludge was added to the ceramic body of a local industry for the production of bricks. Various proportions of silt and clay mixture were tested in order to find the appropriate proportion to the production of ceramic bricks (10%, 12% and 20% of sludge in the ceramic body ETA). Laboratory tests were conducted to assess its strength, water absorption, an appropriate size and visual appearance. It was not possible to incorporation of 20% of mud to ceramic body due to the high plasticity and the difficulty of manufacture of ceramic bricks, however, the proportions of 10% and 12% of sludge from ETA were the ones that had better results on the parameters of resistance, indicating that the ceramic bricks can be produced with the incorporation of up to 12% of sludge from ETA.

Key-Words: Water treatment plant, sludge from the water treatment plant, Red Ceramics, Beneficial Uses of Sludge

1. INTRODUÇÃO

O lodo gerado pelas estações de tratamento de água (ETA's) provenientes do processo de clarificação (decantadores e filtros), atualmente são, na maioria, lançados diretamente nos corpos d'água naturais (CORDEIRO, 1999), sendo esta prática enquadrada na categoria de crime ambiental (DIAS *et al.*, 2008).

Os danos ambientais causados pelo lançamento em grande quantidade desses resíduos são enormes, devido ao aumento na quantidade de sólidos em suspensão, assoreamento dos corpos hídricos, mudanças de cor, aumento das concentrações de alumínio e ainda que incipiente, uma Demanda Química de Oxigênio (MORITA *et al.*,2002). Existe uma grande preocupação em torno desse assunto e diversas medidas foram tomadas com vistas a reduzir o lançamento desse resíduo nos rios e mananciais. Diversos trabalhos, como os de Tallini Júnior *et al.* (2006); Dias *et al.* (2008); Babatunde e Zhao (2007); Cosin *et al.* (2002); Magalhães (2003) e Teixeira *et al.* (2006), tratam sobre a possibilidade da incorporação do lodo como matéria-prima na indústria de cerâmica vermelha. Morita *et al.* (2002) relacionam os diversos benefícios com a utilização de lodos de ETA's na indústria cerâmica; como o aumento da vida útil das jazidas e a redução dos custos de recomposição de áreas com vegetação nativa; como solução definitiva à concessionária de serviços de saneamento; e ao meio ambiente com a redução da supressão da vegetação, devido a atividade extrativa e redução da poluição aquática, causada pelo lançamento de lodos de ETA's nos corpos d'água.

Observa-se que o uso do lodo evita danos ao meio ambiente, particularmente, às bacias hidrográficas que incorporam estes cursos d'água, já que haverá menos lançamento de resíduos e conseqüentemente, o assoreamento e sua contaminação por poluentes presentes nos lodos.

Atualmente, um grande desafio das empresas de saneamento é a de encontrar alternativas viáveis economicamente e tecnicamente, para dispor o lodo de ETA sem impactos ambientais (TALLINI JÚNIOR *et al.*, 2006). O lançamento direto em cursos d'água de lodos de ETA que contenham alumínio, dependendo de sua concentração, podem ser prejudiciais tanto à vida aquática quanto aos seres humanos, além de outras conseqüências físicas.

Cordeiro (1999), ao estudar o lodo de ETA's, ressalta que há grande carência de pesquisas científicas e tecnológicas sobre o tema e que os poucos dados que existem no Brasil estão dispersos, dificultando o trabalho neste campo, e falta a conscientização efetiva sobre a importância do assunto.

Desta forma, estudar a viabilidade de aproveitar esses resíduos (lodo) na indústria cerâmica é da maior relevância e de interesse de muitos países. Um trabalho realizado por Morita *et al.* (2002) assegurou que foram utilizados 90% da massa de lodo de ETA, que empregava sulfato de alumínio como coagulante, na fabricação de tijolos e que foram encontrados bons resultados, mostrando a viabilidade do uso do lodo na fabricação de tijolos cerâmicos. Em outro trabalho na Espanha (CANTO *et al.*, 2002) também foi estudada a possibilidade de incorporação de lodo produzido pelas ETA's na fabricação de tijolos, sendo uma alternativa de disposição final, devido à legislação cada vez mais restritiva de disposição em aterros sanitários (MORITA *et al.*, 2002), entretanto, faltam estudos em escala real.

Empregar o lodo na indústria cerâmica é uma solução prática e promissora à construção civil. A sociedade tem cobrado dos administradores públicos soluções para redução dos impactos ao meio ambiente. Assim, investir em técnicas de produção com esse objetivo é uma das alternativas encontradas, bem melhor que sua disposição em aterros sanitários.

A ETA Bolonha, que abastece 65% da RMB, tem como principais mananciais os lagos Água Preta e Bolonha e o Rio Guamá. Machado (2003) comenta, em seu trabalho, que a produção de lodo gerado no processo de clarificação é de aproximadamente 105 toneladas de resíduos secos por mês, que são lançados diretamente em Igarapé, pela concessionária de

serviços de abastecimento, Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

Desta forma, face à relevância do tema, e de existirem poucos estudos no Brasil e no mundo, em escala real (MORITA *et al*, 2009), este trabalho estudou a viabilidade de incorporar o lodo de ETA na massa cerâmica. Ressalta-se que este trabalho é pioneiro na região Norte do Brasil, assim, realizar ensaios tecnológicos criteriosos para que se conheça a proporção de lodo de ETA adequada a massa cerâmica é de fundamental importância.

2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica da incorporação do lodo gerado pela ETA Bolonha (RMB) como matéria-prima na fabricação de tijolos cerâmicos.

2.1 Objetivos Específicos:

- a) Implantar e operar uma unidade de desaguamento de lodo (UDL) próximo ao decantador da ETA Bolonha com fins de secagem do lodo para caracterização física e mineralógica;
- b) Avaliar a possibilidade do uso de lodo em cerâmica
- c) Realizar a caracterização física e mineralógica das matérias-primas cerâmicas;
- d) Avaliar qual a melhor relação lodo/argila para a confecção ideal dos tijolos cerâmicos;
- e) Caracterizar e avaliar as propriedades mecânicas dos tijolos cerâmicos segundo as Normas da ABNT;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, abordam-se os resíduos gerados em ETA's, desde sua origem em ETA's convencionais até sua caracterização, tratamento e disposição final.

3.1 Resíduos Gerados em ETA's

Considera-se, atualmente, a ETA como uma indústria produtora de água potável. Logo, a produção dos resíduos gerados pelo processo devem ser tratados e dispostos de forma adequada, obedecendo as regulamentações das Normas Técnicas e legislação vigentes, conforme apresentado por Di Bernardo (2002) apud Magalhães (2003).

O resíduo (lodo) gerado nos decantadores e filtros das ETA's possui composição variada de acordo com a região onde ela está localizada, com o mês de coleta e com o coagulante usado (AWWA, 1990).

3.1.1 Origem do Lodo Gerado em ETA's Convencionais

O processo de tratamento das águas para abastecimento público visa remover impurezas da água bruta, captada nos mananciais que são impróprios para o consumo humano. Existem diversos métodos de tratamento de água que vão desde os mais simples como fervura e sedimentação, o tratamento convencional (coagulação química, floculação, decantação e filtração para clarificação da água antes da etapa de desinfecção) ao tratamento avançado. Estes métodos dependem da qualidade das águas encontradas nos mananciais.

Uma ETA convencional é constituída das seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação. A coagulação é a desestabilização de partículas presentes na água bruta. Os principais coagulantes usados são: Sulfato de Alumínio,

Cloreto de Polialumínio, Sulfato Férrico, Sulfato Ferroso Clorado e Cloreto Férrico. A floculação implica no encontro das partículas desestabilizadas, proporcionando a formação de agregados (flocos). Nos decantadores, os flocos formados são separados da água pela ação da gravidade. A etapa de filtração tem como objetivo reter as partículas sólidas que não ficaram retidas no decantador, ou leitos porosos como de carvão ativado, areia e cascalho. As ETA's são constituídas de filtros rápidos que funcionam sob a ação da gravidade e sob pressão e são lavados a contra-corrente (inversão de fluxo) com uma vazão que possa expandir, de forma segura, o meio filtrante. Este processo de lavagem dos filtros carrega muitos resíduos e são nocivos ao meio ambiente. A etapa final do processo de tratamento é a desinfecção que inativa os microorganismos patogênicos presentes na água através de agentes físicos e/ou químicos.

Dias *et al.* (2008) citaram que, devido ao baixo padrão de qualidade da água bruta captada, as ETA's sofrem algumas implicações internas como aumento do consumo de produtos químicos, particularmente do Sulfato de Alumínio e o aumento expressivo do volume de resíduos concentrados em suas unidades de decantação e filtração. Os autores ressaltaram que esses resíduos, aqui denominados de "lodo de ETA" são lançados nos mananciais superficiais sem qualquer tratamento e agredindo dessa forma o meio ambiente.

Na figura 3.1 é apresentado o esquema de uma ETA convencional onde podem ser observados os pontos de geração de resíduos, que são principalmente os lodos dos decantadores e as águas de lavagem dos filtros.

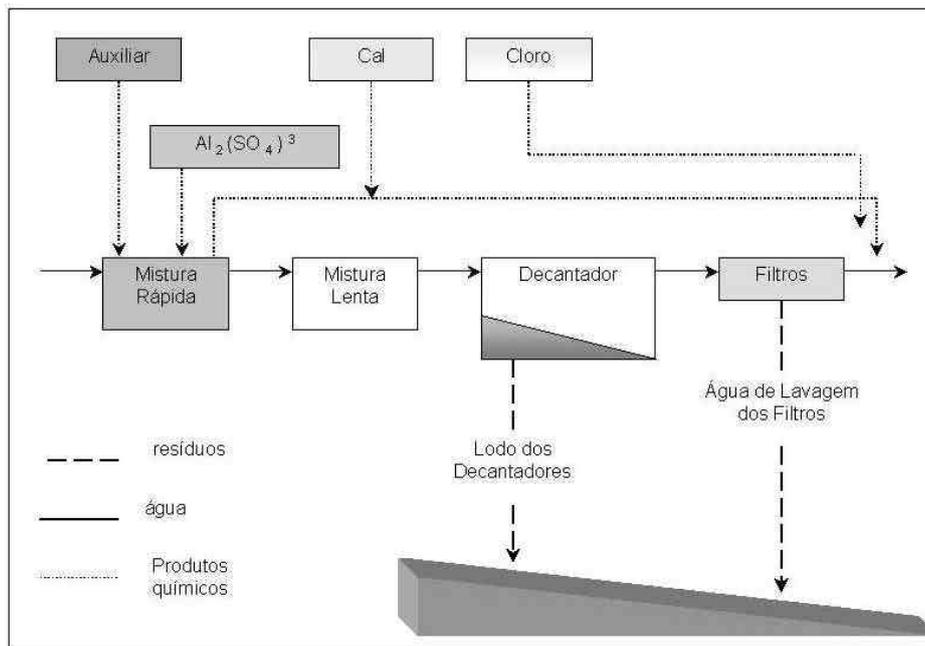


Figura 3.1: Esquema de uma ETA convencional com pontos de geração de resíduos.

Fonte: Cordeiro (1999) apud Magalhães (2003)

3.1.2 Características dos Lodos de Estações de Tratamento de Água

Segundo Richter (2001) apud Andrade (2005), de acordo com o tipo de tratamento de água empregado, diferentes resíduos provenientes dos decantadores e dos filtros serão gerados, com características diversas, quando provenientes de ETA's convencionais ou de ETA's de abrandamento.

Richter (2001), Dias *et al.* (2008) afirmaram que as características do lodo gerado nas ETA's variam de acordo com a natureza da água bruta, captada no processo, dos processos unitários, dos produtos químicos aplicados, tipo e forma de limpeza dos decantadores, entre outros fatores.

Segundo Novaes (2005), as ETA's utilizam produtos químicos na chegada da água bruta, como por exemplo, carvão ativado em pó (CAP) para controle e sabor e odor de precursores de subprodutos da desinfecção; cal virgem ou hidratada para controle do pH do processo e oxidantes como peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio, sendo que a adição desses produtos químicos também irá afetar a composição do lodo. Ainda

segundo o autor, os hidróxidos dos sais de alumínio ou ferro, que são os coagulantes mais usados, são os principais constituintes do lodo, sendo que a água de hidratação presa aos flocos faz com que fique em forma de gel gelatinoso e volumoso de difícil desaguentamento. Este lodo tem propriedades de fluido tixotrópico, ou seja, é gel em estado natural e fluido quando submetido a esforços cisalhantes e de difícil sedimentação ou flotação. Na tabela 3.1 são apresentados alguns materiais encontrados em lodos de ETA's.

Tabela 3.1: Materiais encontrados em resíduos provenientes em processos de tratamento de água

MATERIAL	PROVENIENTE DE:	APARECE NO RESÍDUO COMO:
Sólidos em Suspensão	Água bruta	Silte
Matéria orgânica	Água bruta	Matéria orgânica
Sais de alumínio	Coagulação química	Hidróxido de alumínio
Sais de ferro	Coagulação química	Hidróxido de ferro
Polímero	Tratamento químico	Polímero
Cal	Tratamento químico e correção de pH	CaCO ₃ (carbonato de cálcio)
Carvão ativado granular e em pó	Controle de sabor e odor	Carvão ativado granular e em pó
Cloro, Ozônio	Desinfecção	Em solução

Fonte: DOE (1990) apud Novaes (2005)

Andrade (2005) enfatizou a necessidade de se conhecer as características do lodo a partir da determinação de parâmetros como: sólidos, pH, metais, nitrogênio, fósforo total, carbono orgânico total (COT), etc. A autora relacionou nas Tabelas 3.2 e 3.3 as características dos lodos de ETA's, segundo diversos autores.

Tabela 3.2: Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros convencionais).

Parâmetros	Cordeiro (1993) ¹	Yuzhu (1996)	Barbosa (2000)	Huang <i>et al</i> (2001)	Richter (2001)	Isaac <i>et al</i> (2002a)	Paulsrud <i>et al</i> (2002)	Godbold <i>et al</i> (2003)
pH	5,0 -7,6	-	6,2-9,8 ⁽²⁾ 6,8-10,6 ⁽³⁾	6,59	6 - 8 ⁽²⁾ 7,4 - 9,5 ⁽³⁾	7,8 ⁽⁵⁾	6,9 - 8,4	5,5 - 7,5
Sólidos Totais	1100 – 81575 (mg/L)	2,5 (%)	29595 -52345 ⁽²⁾ 2132-5074 ⁽³⁾ (mg/L)	-	0,1% - 4% ⁽²⁾ 0,25%- 3,5% ⁽³⁾ 2% - 25% ⁽⁴⁾	480 ⁽⁵⁾ (mg/L)	0,06 -18,5 (%)	0,1 -27 ⁽²⁾ 1,85 -17,6 ⁽³⁾ (%m/m)
Sólidos voláteis (% dos sólidos totais - %st)	20-73	20	24,96--25,35 ⁽²⁾ 23,57- 29,17 ⁽³⁾	9,56	20 - 35 ⁽²⁾ 5,1 - 14,1 ⁽³⁾	33 ⁽⁵⁾	37,5 - 67,5	10 - 35
Alcalinidade	-	0,0 - 115 (mgCaCO ₃ /L)	68,48-93,60 ⁽²⁾ 54,08-81,32 ⁽²⁾ (mgCaCO ₃ /L)	0,055 (%CaO)	-	3,70 ⁽⁵⁾	0,25 - 1,76 (% Ca em st)	-
Ferro	-	17,5-1800 (mgFe/L)	130500- 392500 ⁽²⁾ 124000- 299500 ⁽³⁾ (mgFe/L)	5,514 (%Fe ₂ O ₂)	-	> 113.1 ⁽⁵⁾ (mg/L)	-	6,5 ⁽²⁾ 19 - 38 ⁽³⁾ (% st)

LEGENDA:

- (1) Síntese da caracterização de lodo de decantadores realizados por diversos autores
- (2) Resíduo de tratamento com sulfato de alumínio
- (3) Resíduo de tratamento com cloreto férrico
- (4) Resíduo do processo de abrandamento por cal
- (5) Água de lavagem dos filtros

Fonte: Adaptado de Andrade (2005).

Tabela 3.3: Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros não convencionais).

	Barbosa (2000)	Barroso et al (2001)	Huang et al (2001)	Isaac et al (2002)	Paulsrud et al (2002)	Godbold et al (2003)
Al	57730 - 171769 ⁽²⁾ 95773 - 162165 ⁽³⁾ (mgAl/kg)	0,3 - 11100 (mgAl/L)	10,483 (%Al ₂ O ₃)	5,48 ⁽⁵⁾ (mgAl/L)	-	4 - 11 ⁽²⁾ 4,5 - 10,5 ⁽³⁾ (% st)
Zn	29,0 - 64,0 ⁽²⁾ 31,5 - 125,0 ⁽³⁾ (mgZn/kg)	0,11 - 4,25 (mgZn/L)	-	1,55 ⁽⁵⁾ (mgZn/L)	66 - 296 (mgZn/L st)	0,011 - 0,086 (% st)
Cd	não detectado ⁽²⁾ não detectado ⁽³⁾	0,01 - 0,14 (mgCd/L)	0,87 (mg/kg)	25,76 ⁽⁵⁾ (mgCd/L)	0,06 - 1,2 (mgCd/kg st)	< 0,005 ⁽²⁾ <0,0001 - 0,0006 ⁽³⁾ (% st)
Ni	50,0 - 79,5 ⁽²⁾ 50,0 - 90,0 ⁽³⁾ (mgNi/kg)	1,06 - 2,70 (mgNi/L)	-	0,373 ⁽⁵⁾ (mgNi/L)	3,4 - 39,7 (mgNi/kg st)	0,0018 - 0,0125 (% st)
Mn	1415 - 1485 ⁽²⁾ 366 - 1265 ⁽³⁾ (mgMn/Kg)	0,1-60 (mgMn/L)	-	1,002 ⁽⁵⁾ (mgMn/L)	-	< 0,005 - 5 ⁽²⁾ 0,06 - 0,81 ⁽³⁾ (% st)
Cu	24 - 70 ⁽²⁾ 34 - 61 ⁽³⁾ (mgCu/kg)	0,06-2,05 (mgCu/L)	-	0,028 ⁽⁵⁾ (mgCu/L)	< 10 - 110 (mgCu/kg st)	0,003 - 0,0087 (% st)
Cr	34,5 - 38,5 ⁽²⁾ 34 - 44 ⁽³⁾ (mgCr/kg)	0,35 - 3,82 (mgCr/L)	82,3 (mg/kg)	< 0,004 ⁽⁵⁾ (mgCr/L)	< 5,8 - 33 (mgCr/kg st)	<0,0002 - 0,0125 (% st)
Pb	56 - 75 ⁽²⁾ 46 - 54 ⁽³⁾ (mgPb/kg)	0,50-2,32 (mgPb/L)	15,6 (mg/kg)	0,03 ⁽⁵⁾ (mgPb/L)	6,4 - 29,4 (mgPb/kg st)	0,0013 - 0,0084 (% st)
As	-	-	-	< 0,02 ⁽⁵⁾ (mgAs/L)	-	< 0,04 ⁽²⁾ 0,001 - 0,002 ⁽³⁾ (% st)
Hg	-	-	-	-	0,01 - 0,46 (mgHg/kg st)	< 0,00005 - 0,00006 (% st)
Si	-	-	43,417 (%SiO ₂)	-	-	-
COT	-	-	-	-	-	7,72 (% m/m C)

LEGENDA:
 (1) Síntese da caracterização de lodo de decantadores realizados por diversos autores
 (2) Resíduo de tratamento com sulfato de alumínio;
 (3) Resíduo de tratamento com cloreto férrico
 (4) Resíduo do processo por cal
 (5) Água de lavagem dos filtros

Fonte: Andrade (2005)

Machado (2003) realizou um estudo sobre os resíduos gerados na ETA Bolonha, que é também o objeto de estudo deste trabalho. Os dados obtidos pela autora estão apresentados na tabela 3.4 e apresentam as características gerais dos resíduos produzidos na ETA Bolonha.

Tabela 3.4 - Características gerais dos resíduos produzidos na ETA Bolonha.

Parâmetro	Unidade	Lodo (Decantador)	Águas de Lavagem dos Filtros	Valores de Referência
Volume	m ³ /mês	54.864	314.488	-
Sólidos Totais	mg/L	3.424	504	130 - 40.000
Sólidos Fixos Totais	%	40	-	50 - 96,5
Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	1.695	48	-
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1.730	456	-
Sólidos Sedimentáveis	mL/L	273	-	-
pH	-	5,2-7,3	5,8-7,0	5,5 - 8,0
Alcalinidade Total	mgCaCO ₃ /L	102	10	10 - 115
Alumínio	mg Al ⁺³ /L	320	14	325 - 3.965 *
Coliformes Totais	N.M.P/100 mL	2.367	1.163	1.095 - 1.733.000
* somente lodo dos decantadores				

Fonte: Adaptado de Machado (2003).

Os dados apresentados na Tabela 3.4 mostram que o volume dos resíduos gerados no processo de lavagem dos filtros é quase 6 vezes maior do que o retirado nos decantadores mensalmente. O inverso se observa em relação aos sólidos totais encontrados nos decantadores da ETA Bolonha, que produz mensalmente 3.424 mg/L em relação aos 504 mg/L encontrados na água de lavagem dos filtros. O pH em quase todos os trabalhos apresentados nas tabelas 3.2 a 3.4 ficou dentro dos limites de 5,0 a 8,0 para as ETA's que tem o alumínio como coagulante no processo de tratamento. Os dados apresentados nas tabelas 3.2 a 3.4 possuem valores distintos e são faixas amplas. Quando se compara, por exemplo, os valores

encontrados para o alumínio em diferentes trabalhos e os apresentados na Tabela 3.4, observa-se a necessidade de realizar uma caracterização completa para que se defina o tipo de tratamento e a disposição final.

3.1.3 Tratamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água

O objetivo principal do tratamento do lodo das ETA's é retirar gradativamente a água presente, para reduzir seu volume e concentrar seus sólidos e no final obter uma massa sólida ou semi-sólida, com teor de sólidos adequados ao seu transporte e disposição final.

As operações de tratamento dos lodos nas ETA's e ETE's são as seguintes: Adensamento; Condicionamento e Desaguamento.

O tratamento do lodo pode abranger uma série de etapas e envolver uma série de processos até que se possa atingir as condições desejadas para disposição. Após o lodo ser removido do decantador, deve-se adensá-lo. O adensamento consiste na produção de um lodo concentrado, mais adequado para as etapas seguintes de desaguamento. Normalmente, o adensamento é realizado por sedimentação ou por flotação, e produz-se um lodo concentrado, com natural redução de volume pela remoção de água.

O adensamento consiste na concentração de sólidos, favorecendo o funcionamento das unidades subseqüentes do tratamento como o condicionamento e o desaguamento, principalmente no que diz respeito ao consumo de produtos químicos, custos de equipamentos e de transporte e disposição. Em ETA's o adensamento de lodos pode ser realizado por gravidade, flotação com ar dissolvido ou por equipamentos mecânicos, entre eles o adensador de esteiras e a centrífuga.

O condicionamento é o processo responsável por melhorar as características da separação sólido-líquido do lodo. Para que se obtenham melhores resultados na etapa de desaguamento, o lodo pode ser condicionado através do aquecimento em reatores ou pelo resfriamento, o que causa a saída de água graças a temperatura extrema e às condições de pressão. Os processos de condicionamento empregam a adição de polímeros (condicionamento orgânico) e suspensão de cal (condicionamento

inorgânico). Usando tais processos, o teor de sólidos no lodo desaguado (mistura) pode chegar a 30%.

Esta etapa visa reduzir o teor de umidade do lodo para diminuir o seu volume, facilitar o seu transporte e diminuir os custos de transporte até o destino final. A operação de desaguamento do lodo pode ser natural ou mecanizada.

Um esquema de desaguamento do lodo é mostrado na figura 3.2.

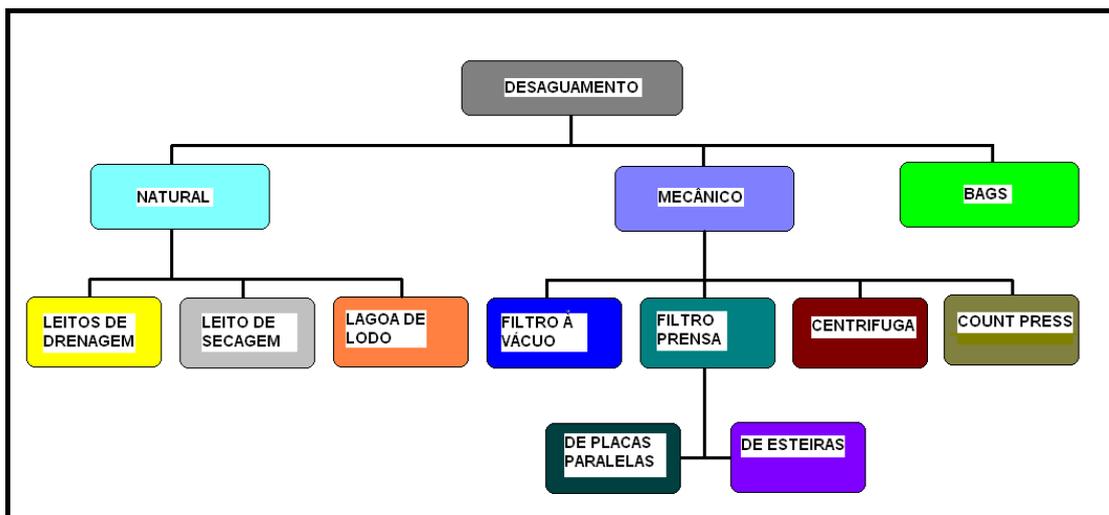


Figura 3.2: Formas de desaguamento de lodos de ETA's

O desaguamento do lodo natural requer um procedimento simples, que consta na sua disposição em leitos de secagem, lagoas de lodo e leitos de drenagem. O resíduo fica no leito por um determinado tempo, desaguando graças às condições do ambiente e toma a forma apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.3: Massa de lodo retida no leito de drenagem empregando uma Manta Geotextil
Fonte: Barroso (2007)

A tecnologia dos leitos de secagem tem sido utilizada para remoção de água de rejeitos de diversos tipos de tratamento de águas residuárias e de abastecimento desde o início do século passado. Ela vem sendo aplicada praticamente sem mudanças consideráveis em sua estrutura física. Ao empregar mantas geotextil como leito de drenagem, Barroso (2007) utilizou a mesma metodologia empregada por Cordeiro (1993), que estudou a possibilidade de modificação dessa estrutura física. O autor observou que a colocação de manta geotextil sobre a camada filtrante do leito possibilitava a remoção mais efetiva da água livre dos lodos, mesmo utilizando areias de construção (grossa e fina), adquiridas no mercado, como meio filtrante. Segundo Cordeiro (1999) apud Barroso (2007) a areia era lavada e os leitos testados com espessura de areia de 5 e 10 cm. Essa alteração foi chamada de leito modificado 1. Em seus resultados, o autor verificou que a areia e a espessura da camada filtrante não eram decisivos na remoção de água livre.

Segundo Barroso (2007), os estudos evoluíram e Cordeiro (2001) desenvolveu uma proposta de um leito modificado 2, onde neste leito a areia foi removida e o leito constituído de uma camada de brita 01 com 5 cm e sobre ela a manta geotextil, com a camada de lodo atingindo até 50 cm. Uma ilustração da evolução dos leitos de secagem pode ser observada na figura 3.4.

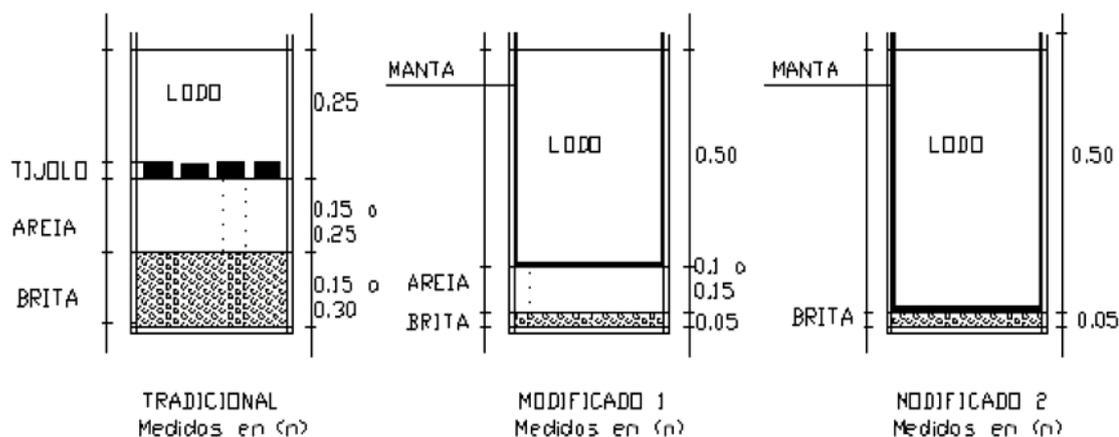


Figura 3.4: Etapas de desenvolvimento de leitos de secagem proposta por Cordeiro (2001).

Fonte: Cordeiro (2001) apud Barroso (2007)

Quanto ao desagamento mecanizado, os equipamentos mais utilizados são: filtros a vácuo, filtros prensa de placas paralelas, filtro-prensa de esteira e centrífuga, sendo os dois últimos os mais utilizados.

3.1.4 Disposição Final de Lodo de Estações de Tratamento de Água

O lodo de ETA's, normalmente, durante o processo de lavagem dos decantadores e dos filtros, tem como disposição final, os corpos d'água. A NBR 10.004/04 classifica o lodo de ETA como resíduo sólido. Nesse sentido, a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, em seu artigo nº 54 sobre a Poluição e outros Crimes Ambientais imputa pena de reclusão para quem causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora". Devido a isso, existe a obrigação de tratar e dispor adequadamente o lodo de ETA's, devendo ser prioridade dos gestores de sistemas.

Algumas técnicas de disposição do lodo no solo são possíveis atualmente, visando reduzir os impactos negativos, como os apresentados por Morita *et al.* (2002), as técnicas são: disposição em aterros, aplicação no solo, incineração e disposição das cinzas em aterro. Uma classificação das

formas de aproveitamento foi apresentada por Tsutiya e Hirata (2001) apud Machado (2003) de acordo com o esquema da figura 3.5.

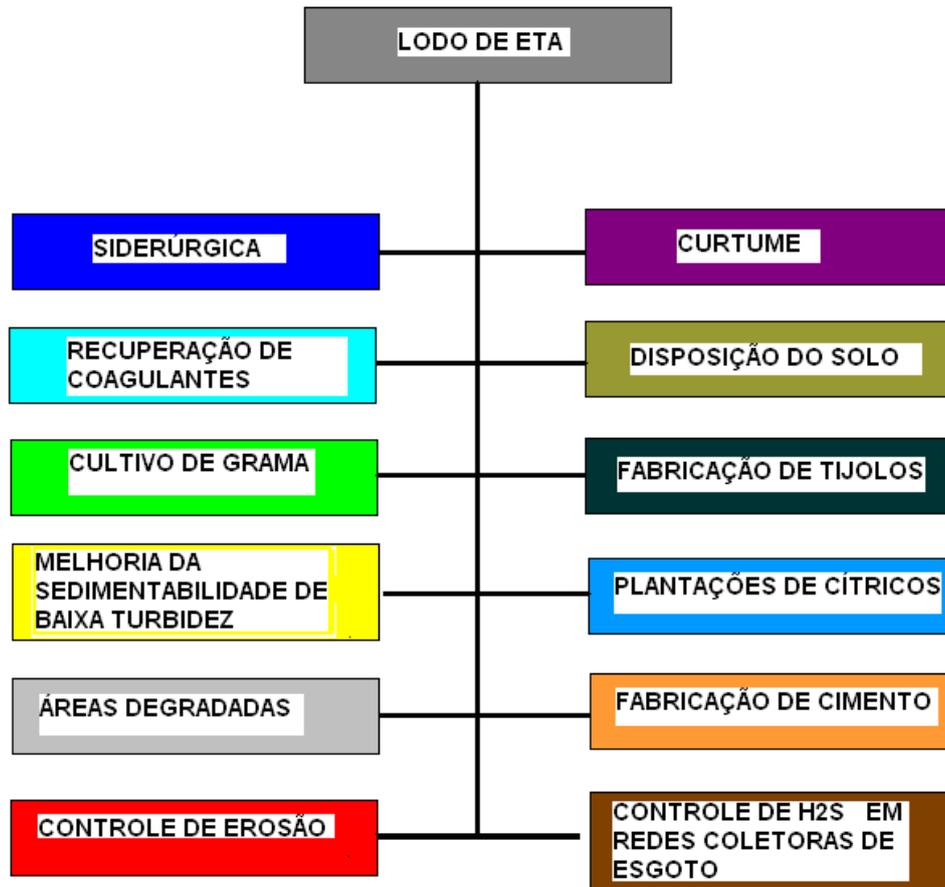


Figura 3.5: Formas de aproveitamento de Lodos de ETA's.
Fonte: Adaptado de Machado (2003)

Cornwell *et al.* (2000) realizaram um levantamento sobre as formas de disposição final de lodos de ETA's nos E.U.A e verificaram que a maioria das ETA's aplicava os lodos no solo, em aterros sanitários ou particulares ou lançava em sistemas públicos de esgotos sanitários.

Segundo Reali (1999), a disposição do lodo de forma controlada no solo é uma alternativa possível de ser adotada caso seja comprovada que não haverá impactos negativos ao meio ambiente, particularmente, ao solo receptor dos resíduos gerados na ETA.

No Brasil, uma experiência pioneira na utilização do lodo de ETA foi desenvolvido por Morita *et al.* (2002), que incorporaram lodo da ETA Cubatão (SP) em tijolos cerâmicos em escala real e obtiveram êxito, em conformidade com as normas técnicas da ABNT.

3.2 O Processo Produtivo de Cerâmica Vermelha

Novaes (2005) comentou que existem cerca de 12.000 indústrias de cerâmica vermelha ou estrutural, assim distribuídas: 62% fabricam blocos e tijolos; 37% telhas e 0,2% tubos, com faturamento anual destas empresas de U\$ 6 bilhões. Ainda, segundo o autor, mensalmente são consumidas 10.500.000 toneladas de argila para a fabricação de blocos e tijolos e 4.500.000 toneladas para a fabricação de telhas. A geração de empregos diretos é de 650.000 e 2.000.000 de empregos indiretos.

O setor cerâmico brasileiro tem as condições necessárias para melhorar a cada ano, tendo produtos de alta qualidade, preços competitivos a nível mundial, abundância de praticamente todas as matérias primas, recursos técnicos e gerenciais altamente qualificados e boa infra-estrutura de pesquisas (Magalhães, 2003).

O processo de fabricação de tijolos envolve as etapas de exploração das jazidas, tratamento da matéria-prima, homogeneização, moldagem, secagem e queima.

Uma melhor visualização sobre o processo de fabricação de tijolos ou blocos cerâmicos é mostrada no fluxograma da figura 3.6 apresentada por Bauer (1992).

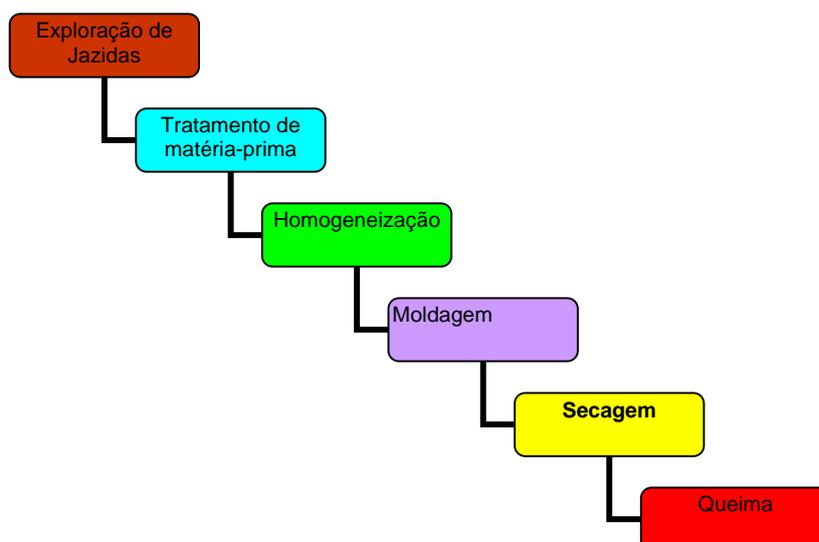


Figura 3.6: Fluxograma do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos
Fonte: Adaptado de Bauer (1992).

Exploração da Jazida

A principal matéria-prima das jazidas é a argila. Ela pode ser extraída por tratores de esteiras e no processo de produção de blocos, geralmente é misturada com outras matérias-primas, tais como micas, areias e siltes, os quais atuam reduzindo a retração e diminuindo a plasticidade da massa cerâmica (chamados de desplastificantes). Segundo Morita *et al.* (2002), existem as argilas plásticas (argilas gordas), que possuem granulometria muito fina sendo, por isso, difíceis de processar; adicionam-se então outras argilas (argilas magras) às primeiras, o que reduz a plasticidade da massa, facilitando o processo de fabricação. Ainda segundo os autores, ocorre a mistura (pois são diferentes tipos de argila) e o repouso da matéria-prima, que é feito ao ar livre, por cerca de 3 meses. Após o descanso, a argila é transportada ao pátio da fábrica cerâmica, por caminhões, onde fica armazenada por alguns dias.

Segundo Magalhães (2003), antes da exploração, as jazidas devem ser analisadas segundo a qualidade, e o volume total disponível de argila, acesso para veículos pesados, logística de distribuição ao consumidor e necessidade de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) acompanhado do Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA), visando possibilitar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da mesma.

Tratamento da Matéria-Prima

Segundo Magalhães (2003), entre os tratamentos prévios necessários à fabricação dos produtos cerâmicos pode-se citar depuração, trituração, homogeneização e umidificação. Segundo o autor, a depuração é a operação de eliminação de impurezas que podem prejudicar o material, tais como grãos duros, nódulos de cal e sais solúveis, dando origem a uma secagem anormal das peças, prejudicando a qualidade final do produto. A trituração melhora a homogeneização, pois as argilas devem ser reduzidas a pequenos fragmentos e os desengordurantes reduzidos a pó. A homogeneização é a mistura da argila com o desengordurante. A umidificação é a mistura de uma quantidade de água necessária para facilitar a homogeneização e a moldagem das peças.

Moldagem

A moldagem é o processo de dar forma definitiva à massa ou pasta e os tipos de moldagem estão ligados à plasticidade e à quantidade de água adicionada. Depois de moldada, a pasta resulta num feixe contínuo, o qual é cortado em blocos por fio de arame (NOVAES, 2005); ainda segundo o autor, as peças, neste período, ainda tem de 7 a 30% de umidade e é o processo de secagem que reduz esta umidade para posterior queima. Os blocos cortados são empilhados em vagonetas e conduzidos até estufa de secagem, onde permanecerão por um período médio de 48 horas, a uma temperatura de 100° C.

Secagem

Segundo Bauer (1992), a secagem é tão importante quanto o cozimento, porquê, após a moldagem, ainda permanecem cerca de 5% a 35% de água. Por exemplo, o tijolo comum, ainda conserva cerca de 1 kg de água após a moldagem e se a argila for levada ainda úmida para o forno, a umidade interior ficará retida pela crosta externa, aparecendo tensões internas e o conseqüente fendilhamento. Por isso, diz o autor, se faz a secagem prévia, de forma controlada, pois se não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, entretanto, se for muito lenta, a produção será anti-econômica. A secagem pode levar de 3 a 6 semanas para as argilas moles, ou até uma semana para as argilas rijas, quando feita por ar, por secagem natural. A época do ano influencia muito a produção, diz o autor, principalmente no inverno, onde reduz bastante.

Queima

Na queima, toda a água de conformação é eliminada e ocorre a mudança na estrutura da argila, por isso, as fases de aquecimento e resfriamento das peças deve ser controlada. Entretanto, uma queima acelerada é mais econômica, todavia, uma queima mais lenta produz peças de melhor qualidade (MAGALHÃES, 2003).

Novaes (2005) afirmou que a queima é realizada durante um período de aproximadamente 30 horas e após este período, os tijolos sofrem o

processo de resfriamento por mais 24 horas dentro do forno e em seguida, são transferidos para um galpão onde deverão permanecer estocados para posterior transporte e comercialização.

3.3 Lodo de ETA como Produto Cerâmico

A produção de tijolos cerâmicos a partir da incorporação de lodo de ETA's tem se mostrado, nos últimos anos, como promissora à indústria cerâmica. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de diminuir a quantidade de lodo nos corpos d'água e conseqüentemente reduzirem os impactos negativos ao meio ambiente, como pode ser observado no trabalho de Cosin *et al.* (2002), onde foi investigado o potencial de uso do lodo proveniente de uma ETA industrial na fabricação de massas cerâmicas. Em seus resultados os autores encontraram incorporações de lodo na massa cerâmica de até 20%.

Morita *et al.* (2002) descreveram o processo de fabricação de tijolos cerâmicos quando foi estudada a possibilidade de incorporação de lodos da ETA Cubatão. Os autores usaram uma argila procedente de jazida própria e que, após extração, foi preciso deixar a argila em repouso ao ar livre por aproximadamente 3 meses. Após esse tempo, a mesma foi transportada à fábrica por caminhões e armazenada por alguns dias. Do pátio da fábrica, a argila foi recolhida por trator e encaminhada a uma tremonha¹ de dosagem, onde foi adicionado 18 kg de coque (carvão) por minuto, o que corresponde a 2,4% da massa cerâmica. Através de esteiras, a mistura foi transportada até a máquina extrusora², passando por homogeneizadores para umidificá-la acima do limite de plasticidade. Ainda na extrusora, continuam os autores, a massa foi prensada através do molde, resultando num feixe contínuo, onde foram cortados os tijolos por fios de arame, sendo transportados e empilhados em vagonetas transportadoras, que foram transferidas para a estufa de secagem. Na estufa, permaneceram por 48 horas onde atingiram a

¹ **Tremonha:** é uma peça do moinho por onde passa o grão que deve ser moído. É a peça formada principalmente por uma *rosca sem-fim*.

² **Extrusora:** Faz a desareação da massa, ou seja, retira o ar presente na argila.

temperatura de 100° C. Após a secagem na estufa, os tijolos foram transferidos para o forno de queima, onde foram empilhados de forma a preencher todo o seu interior. Segundo os autores, todo processo de fabricação levou em torno de 7 dias. Os autores incorporaram 25%, 20%, 12,5% e 10% de lodo nos tijolos cerâmicos. Foram feitos testes de caracterização do lodo e ensaios de resistência à compressão, absorção à água e características dimensionais nos tijolos produzidos com o lodo. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que as características materiais dos lodos da ETA Cubatão e da indústria cerâmica eram compatíveis, não havendo interferências significativas nos processos produtivos e nem nas características finais dos tijolos processados. Dentre os percentuais de lodo incorporados a massa cerâmica a que melhor resultou foi a 12.5%. A incorporação de 20 e 25% de lodo de ETA provocou o aparecimento de trincas e rachaduras em alguns tijolos após secagem na estufa, que foram descartados pelos autores.

Ueno *et al.* (2005) avaliou a viabilidade técnica de incorporação do lodo proveniente do processo de tratamento de água para abastecimento na confecção de produtos cerâmicos para a construção civil, como tijolos de vedação e telhas de cerâmica vermelha. O autor obteve resultados que mostraram que era possível a incorporação de até 8% e 6% de lodo (base seca) à massa de cerâmica vermelha para a confecção de tijolos de vedação e telhas respectivamente.

Novaes (2005) avaliou o uso benéfico do lodo com cloreto férrico da ETA Campinas (SP) verificando a viabilidade técnica em escala de laboratório e real, além de averiguar se um tratamento complementar do lodo, através de leito de secagem melhoraria as condições requeridas pelo referido uso. Em escala de laboratório foram usadas as proporções de lodo/argila de: 10, 20, 30, 40 e 50% e em escala real de: 7, 10.7, 14.2 e 17.8%. Sendo que o teor de sólidos do lodo era de 55%. Os resultados obtidos pelo autor em escala de laboratório mostraram que os corpos de prova apresentaram propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos tijolos cerâmicos em escala real, entretanto, o autor ressaltou que, devido as condições de mistura, não foi possível atingir em escala real proporções

superiores a 17,8% de lodo. A utilização do leito de secagem também foi um fator que melhorou as condições de trabalhabilidade do lodo, permitindo atingir essa proporção. Quanto às características físicas do lodo, do ponto de vista da mecânica dos solos, este foi classificado como silte-arenoso. Quanto as suas características mineralógicas, o lodo apresentou em sua constituição química compostos de silício e caolinita, o que também foi encontrado nas matérias-primas cerâmicas analisadas, indicando compatibilidade entre esses materiais. A goethita, também foi outro elemento presente no lodo e que contribuiu na cor do tijolo cerâmico, devido ao óxido de ferro, que produz uma cor mais vermelha. Quanto a caracterização dos corpos de prova, estes mostraram-se semelhantes aos tijolos cerâmicos processados na indústria com: diminuição da resistência mecânica, ganhos de absorção de água e aumento da porosidade aparente do material à medida que o lodo foi sendo adicionado.

Outros trabalhos em escala de laboratório como Ramires *et al.* (2001), Cosin *et al.* (2002) e Magalhães (2003) demonstraram que o aumento de incorporação de lodo à massa cerâmica nos corpos de prova queimados, implica no aumento de sua absorção de água e porosidade, diminuição da resistência mecânica à compressão, portanto, com características de um material não-plástico, que não deve ser utilizado de forma isolada na indústria cerâmica, mas associado a argila de natureza plástica.

3.4 Materiais Cerâmicos

Na confecção de tijolos cerâmicos, a construção civil, de um modo geral, considera como elemento essencial a presença da fração argila. Deste modo, torna-se necessário o estudo das características físicas e químicas deste material, a fim da obtenção de um melhor desempenho na confecção da mistura cerâmica necessária para a produção dos tijolos.

De acordo com Das (2007), a argila consiste em um material com partículas lamelares, com tamanhos inferiores a 0,002 mm, constituídas por um conjunto de minerais, compostos de silicatos complexos de alumínio hidratados, denominados de *argilominerais*. Dentre os principais tipos de

argilominerais encontrados na composição mineralógica da argila, estão: a caulinita, a illita, a gibsita e em alguns casos, a montmorilonita. Estes argilominerais possuem utilização prática na fabricação de telhas, materiais cerâmicos, sondagens, fundações profundas e vedação de barragens. Recebem o nome comercial de *caolim* e *bentonita*, provenientes do grupo caulinita e esmectita sódica, também conhecida como *montmorilonita*, respectivamente. As principais propriedades transmitidas por estes argilominerais, de uma forma geral são: *plasticidade*, *coesão*, *expansão* e *tixotropia*.

Segundo Grim (1953) apud Das (2007), as argilas podem ser definidas como partículas “que desenvolvem plasticidade quando misturadas com uma quantidade de água”. Tal propriedade transfere à argila a propriedade de poder ser moldada, conservando a sua forma, e endurecendo com a perda de água, com conseqüente solidificação definitiva com a exposição ao calor.

Vargas (1977) definiu a plasticidade como a propriedade de certos sólidos serem moldados sem variação de volume, logo, a plasticidade de certas argilas existe porque a forma lamelar de seus grãos permite um deslocamento relativo das partículas, sem necessidade de variação do volume, e que essa plasticidade dependerá também do teor de umidade da argila. Como a forma dos grãos depende da estrutura cristalina, e essa é peculiar a cada espécie mineral, o autor concluiu que cada espécie de mineral dará à argila plasticidade diferente, isto é, capacidade de serem moldadas sem variação de seu volume. Afirmou que tal propriedade vai depender também do teor de umidade da argila.

3.4.1 Plasticidade e Granulometria

Petrucci (2007) considerou que as argilas, para serem utilizadas na indústria cerâmica, devem apresentar certas características essenciais e outras acidentais ou secundárias. As características essenciais são determinadas pela plasticidade, pela capacidade de absorção e cessão de água, e pelo seu comportamento ao calor: alteração de volume durante a

secagem e o cozimento. As características secundárias são determinadas pela fusibilidade, porosidade e cor.

Nas cerâmicas, o interesse, segundo Bauer (1992), se situa no peso, resistência mecânica, resistência ao desgaste, absorção de água e duração.

Define-se *plasticidade* como sendo uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume. Trata-se de uma das mais importantes propriedades das argilas.

A sua aplicação prática imediata é verificada em uma melhor caracterização e classificação do solo, bem como fornecer parâmetros iniciais para realização de projetos geotécnicos de caráter empírico.

Segundo Petrucci (2007), nas argilas, a plasticidade varia com a quantidade de água. A argila seca tem plasticidade nula e molhando-a, ela vai ganhando plasticidade até um máximo; a partir deste ponto, com mais água, as lâminas se separam e a argila perde a plasticidade e torna-se um líquido viscoso. No caso das argilas puras, elas dão pastas plásticas, mas nas de qualidade inferior, deve-se ter adições de substâncias que melhorem a plasticidade. As argilas podem conter substâncias inorgânicas ou orgânicas: carbonato e hidróxido de sódio, silicatos, oxalatos e tartaratos sódicos, tanino, húmus, ácido oléico, etc.

A análise granulométrica, que é a determinação da faixa de tamanho das partículas presentes em um solo, é expressa como uma porcentagem da massa total seca. Os métodos mais comumente utilizados para encontrar a distribuição do tamanho das partículas do solo são os ensaios de peneiramento, para partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro e de sedimentação, para tamanhos de partículas de diâmetros inferiores a 0,075 mm (DAS, 2007).

O traçado da curva granulométrica permite uma perfeita caracterização e identificação dos solos arenosos e pedregulhos, uma vez que materiais com curvas iguais comportam-se, na prática, de maneira semelhante.

Entretanto, ao se referir aos chamados *solos finos* ou *argilosos*, a mesma não se aplica. Considera-se neste caso, solos finos como sendo

aqueles que apresentam a maioria dos grãos com diâmetro inferior a 0,1 mm. Portanto, apenas o conhecimento da curva granulométrica destes solos não é suficiente para prever o seu comportamento na prática. Ou seja, podem existir siltes, argilas e solos argilosos de mesma curva granulométrica, cujos comportamentos não são semelhantes. Logo, a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade (ou o limite de plasticidade) são as “propriedades índices”, capazes de identificar qualquer solo quanto ao seu comportamento como material de construção (VARGAS, 1997).

Todos estes fatores interferem no comportamento do solo, mas o estudo dos minerais-argilas é muito complexo. De forma prática, a engenharia faz a análise indireta, baseada no comportamento solo na presença de água. Generalizou-se então, o emprego de ensaios e índices propostos pelo engenheiro químico Atterberg. Tem-se assim, os estados líquido, plástico, semi-sólido e sólido, identificados quanto ao teor de umidade do material e separados uns dos outros pelos chamados limites de liquidez, de plasticidade e de contração. A diferença entre os limites de liquidez e plasticidade (correspondente ao estado plástico) denomina-se índice de plasticidade. Desta forma, Atterberg estabeleceu, arbitrariamente, os teores de umidade para definir a trabalhabilidade dos materiais cerâmicos (CARVALHO, 1997).

Pinto (2000) afirmou que os limites de consistência estão relacionados diretamente com o teor de umidade do solo. Se a umidade de um solo for muito elevada, o mesmo se apresenta como fluído denso, caracterizando o que chamamos de *estado líquido*. À medida que o teor de umidade vai diminuindo, o solo tende a endurecer, para um certo $h = LL$ (*limite de liquidez*), perdendo assim a sua capacidade de fluir, porém podendo ser moldado facilmente e conservando a sua forma, passando então para o *estado plástico*. Ao continuar perdendo umidade, o solo tende a sair do seu estado plástico, até que $h = LP$ (Limite de plasticidade), desmanchando-se ao ser trabalhado, atingindo assim o *estado sólido*. Continuando-se a secagem, ocorre a passagem gradual para o *estado sólido*. O limite entre os dois estados é um teor de umidade $h = LC$ (Limite de contração).

Na figura 3.7 é mostrada uma representação esquemática dos estados físicos, chamados estados de consistência, e suas fronteiras, ou seja, os limites de consistência.

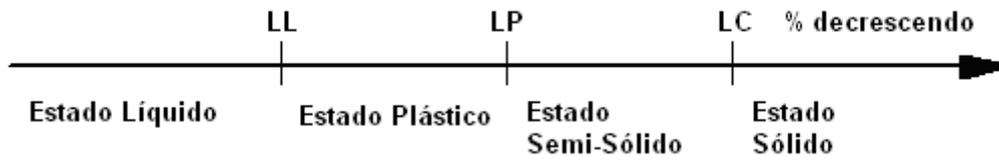


Figura 3.7 - Representação esquemática dos limites de consistência.

Fonte: Adaptado de Pinto (2000).

Apesar desses limites serem baseados na realização de um elevado número de investigações experimentais, as suas definições são consideradas convencionais. Mesmo assim, ainda constituem uma das maneiras mais simples e rápidas de se obterem informações bastante claras do tipo de solo e suas propriedades, passando a serem consideradas como determinações rotineiras nos laboratórios de mecânica dos solos.

Em relação ao índice de plasticidade (*IP*), ele pode ser definido como sendo a diferença entre os limites de liquidez (*LL*) e plasticidade (*LP*) (CAPUTO, 1981).

$$IP = LL - LP \qquad \text{Eq. 3.1}$$

Este índice quantifica, de certo modo, o caráter argiloso do solo, estabelecendo uma faixa em que o material se encontra no seu estado plástico, podendo ser máximo para as argilas, e mínimo, ou ainda, nulo para as areias, sendo que neste caso escreve-se $IP = NP$ (não plástico).

Já a presença de uma pequena porcentagem de matéria orgânica aumenta o valor do *LP*, porém o resultado do *LL* permanece praticamente inalterado, apresentando o solo, assim, baixos valores de *IP*.

Jenkins classificou os solos em função do *IP* da seguinte forma:

Fracamente Plásticos $1 < IP < 7$

Medianamente Plásticos..... $7 < IP < 15$

Altamente Plásticos $IP > 15$

Visando classificar o solo através das suas propriedades físicas mais importantes, Casagrande idealizou o *gráfico de Plasticidade*, sendo cada solo definido por um ponto em coordenada correspondente aos seus valores de *LL* e *LP*, ou seja, a região onde o ponto é plotado classifica e define a plasticidade do solo analisado.

Deste modo, este gráfico é dividido em 6 regiões e 8 grupos, de acordo com as linhas A, B e C, mostradas na Figura 3.8.

Em função das regiões definidas neste gráfico, os solos finos podem ser classificados em 8 grupos de acordo com a sua plasticidade em: argilas inorgânicas de alta, média e baixa plasticidade, solos siltosos inorgânicos de alta, média e baixa plasticidade, solos siltosos inorgânicos de alta, média e baixa compressibilidade, argilas orgânicas e siltes orgânicos. Acima da linha A encontra-se a faixa definida como região das argilas inorgânicas. Observa-se que na mesma região em que se encontram os siltes inorgânicos de alta e mediana compressibilidade, situam-se também as argilas e siltes orgânicos, respectivamente. Estes siltes são distinguidos através do odor e das cores mais escuras, características presentes em solos orgânicos. A classificação geral através do gráfico de *Casagrande* é visualizada na Figura 3.8 (CAPUTO, 1981).

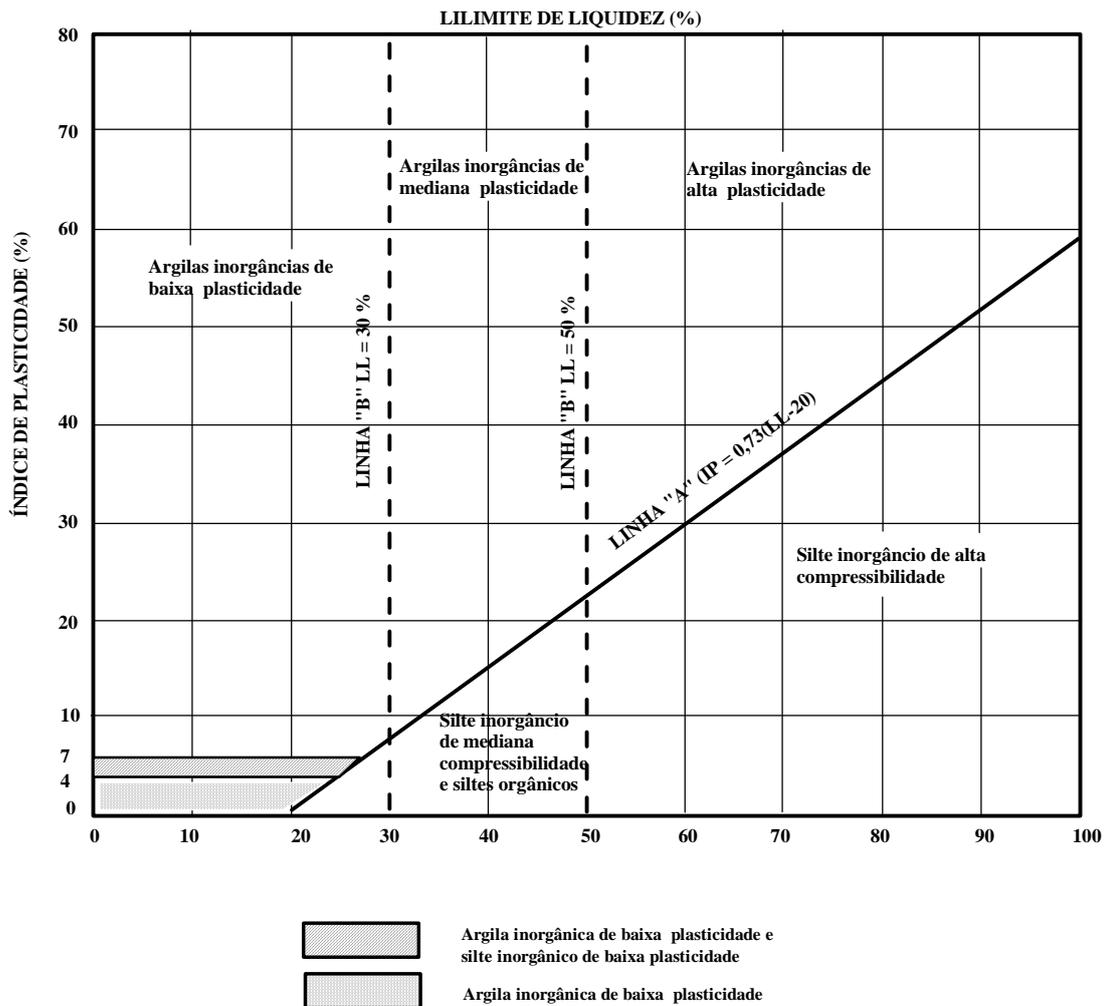


Figura 3.8 - Gráfico de Plasticidade (Ábaco de Casagrande)
 Fonte: Adaptado de Caputo (1981).

Na indústria cerâmica brasileira, quanto à plasticidade, as argilas podem ser classificadas como gordas e magras. Correspondem as argilas gordas, aquelas ricas em material argiloso, elevada presença da fração de grãos coloidais e alta plasticidade, permitindo uma boa capacidade de moldagem quando cozidas. Já as magras, em contrapartida, em função do tamanho dos grãos e da presença de minerais quartzosos, apresentam baixa plasticidade, logo produzindo materiais cerâmicos de qualidade inferior, ou seja, produtos porosos e frágeis.

3.4.2 Retração

A retração é um parâmetro que representa o decréscimo de tamanho resultante da secagem ao ar e ao forno. As argilas naturais tem normalmente retração ao ar de 2 a 8% e ao forno, de 2,5 a 10%.

Bauer (1992) explica que num bloco de argila seca, quando exposto ao ar, inicialmente, a velocidade de evaporação da água é igual à que teria uma superfície de água igual à do bloco. Depois, a velocidade de evaporação vai diminuindo, porque as camadas externas ao secarem, vão recebendo a água das camadas internas por capilaridade, de modo que o conjunto tende a se homogeneizar continuamente, fazendo com que as quantidades de água, vindas das camadas internas, sejam cada vez menores.

Todo esse processo, no lugar antes ocupado pela água, vai ficando com diversos vazios e como conseqüência o conjunto retrai-se.

A retração tem como efeito negativo, o fato de ela não ser totalmente uniforme, o que poderá a vir a deformar o bloco. A retração varia de acordo com o teor de umidade e os tipos de argila e é uma propriedade que deve ser levada em consideração para obtenção de produtos de melhor qualidade (BAUER, 1992).

3.4.3 Porosidade e Absorção

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume aparente total de uma peça cerâmica. A porosidade aparente ou absorção está diretamente ligada à absorção de água do material. Outras propriedades estão relacionadas com absorção de água, como resistência mecânica, resistência química, resistência ao gelo, resistência ao choque térmico, entre outras (BAUER, 1992).

Alguns fatores diminuem a porosidade, como por exemplo, a vitrificação, que pode ser causada devido à presença de sal na massa cerâmica durante a queima em alta temperatura (PETRUCCI, 2007).

Petrucci (2007) diz que se pode aumentar ou diminuir a porosidade de várias maneiras. Se pretender aumentar a porosidade deve-se adicionar matérias que são eliminadas com a queima (matérias carbonosas, como serragem de madeira dura e carvão moído), ou matérias porosas. Se pretende diminuir a porosidade, deve-se vitrificar a massa da argila pela adição de fundentes ou por calor e pela adição de eletrólitos à argila em estado seco, tais como: álcalis, hidróxido de cálcio, ácidos em grande quantidade, etc.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), no estado seco, a porosidade de um tijolo dependerá apenas da distribuição granulométrica dos componentes das matérias-primas e do modo com que estes foram misturados. Ressaltou que a máxima densificação e a mínima porosidade se obtém quando a distribuição granulométrica é bastante aberta tal que permite que as partículas menores ocupem os interstícios entre as partículas maiores. A porosidade final do produto queimado é influenciada pela porosidade inicial do verde ou seco, da formação da fase líquida e do rearranjo das fases formadas.

3.4.4 Resistência à Flexão

Uma das principais características funcionais dos tijolos cerâmicos é a resistência mecânica das peças fabricadas.

A resistência mecânica depende muito da quantidade de água usada na moldagem. O excesso de água lava as partículas menores, que mais facilmente fundirão para formar o vidrado (BAUER, 1992).

Segundo Oliveira *et al.* (2004), após o processo de secagem das peças cerâmicas, a resistência mecânica dependerá das argilas e dos teores dos componentes argilosos. De forma indireta, a resistência mecânica a seco depende de alguns fatores como: regularidade de secagem pelo desenvolvimento de forças de coesão equilibradas, sem solicitações de tensões residuais ou fissuras evidentes ou microscópicas; o grau de secagem, quantidade de umidade residual final, ou quantidade de umidade reabsorvida do ambiente, que acima de certos limites, podem reduzir

drasticamente a resistência mecânica; a geometria dos produtos e gradientes de densidade; a quantidade de água; a granulometria dos materiais inertes e a moagem das matérias-primas duras (granulometria mais fina)

Durante o processo de queima (tratamento térmico), a peça cerâmica tem a quantidade de poros reduzida, apresentando contração, além de aumentar a massa específica e a ligação de cristais entre si, formando uma massa dura e densa, de resistência mecânica aceitável dentro dos limites a que se destina (LOPES & ACCHAR, 2006).

Segundo Facincani (1992) apud Novaes (2005), em relação a resistência do produto queimado, diz que as forças de coesão do produto seco são normalmente muito inferiores àquelas que possuem o mesmo produto após o processo de queima.

Emilani (1989) apud Novaes (2005) diz que a resistência mecânica após a queima depende diretamente dos teores dos componentes argilosos e da distribuição granulométrica, da composição química e dos teores dos componentes inertes. Indiretamente, o autor afirmou que a resistência mecânica pode ser melhorada através de ações que lhe dão aumento de resistência mecânica ao produto seco e que afetam as variáveis inerentes ao processo de queima, como: ciclo de pré-aquecimento, de queima e tempo, máxima temperatura de queima e ciclo de resfriamento.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta as fases de trabalho que foram desenvolvidas para alcançar os objetivos inicialmente propostos, conforme pode ser observado na Figura 4.1.

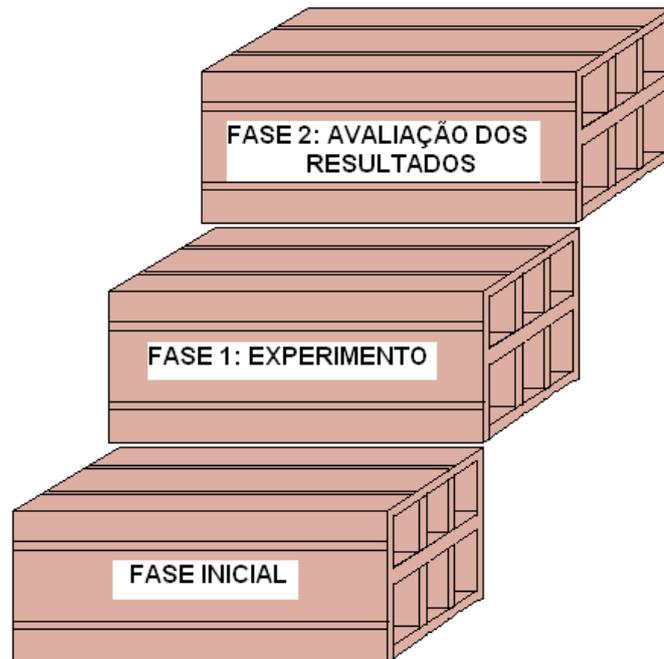


Figura 4.1: Organização das etapas de trabalho.

Os primeiros procedimentos adotados na presente pesquisa foram de verificar a possibilidade de incorporação do lodo da ETA Bolonha com argilas na fabricação de tijolos. Assim, foram realizados levantamentos bibliográficos, contatos com ceramistas para escolha da indústria cerâmica, viagens à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP-USP) para definição da metodologia a ser empregada na confecção dos tijolos cerâmicos e no desaguamento do lodo.

De acordo com os trabalhos encontrados na literatura, verificou-se que a presente pesquisa seria viável tecnicamente. Assim, o passo seguinte foi implantar uma Unidade de Desaguamento de Lodo (UDL1), próxima a válvula de fundo do decantador e outra próxima ao tanque dos decantadores

(UDL2). A próxima etapa foi encaminhar diversas amostras de lodo desaguado nas UDL's para análise físico-química no Laboratório de Química do IFPa. O material proveniente das UDL1 e UDL2 foi enviado a indústria cerâmica para o preparo da mistura do lodo em proporções de 10, 12 e 20% com as argilas usadas na confecção dos tijolos cerâmicos. Diversas amostras das proporções lodo/argila, argilas (magra e gorda) e do lodo foram analisadas nos Laboratórios da UNAMA, IFPA e EMBRAPA-PA nos aspectos físico, geotécnico e mineralógico. Ainda nesta fase experimental confeccionaram-se tijolos cerâmicos usando as proporções de 10, 12 e 20% de lodo/argila, os quais foram caracterizados no laboratório de materiais de construção da Universidade da Amazônia. Na última etapa de trabalho, foi avaliada a melhor relação lodo/argila para confecção dos tijolos cerâmicos, a partir dos resultados encontrados nos ensaios de caracterização. Para uma melhor visualização da metodologia adotada neste trabalho, apresenta-se, na Figura 4.2, uma esquematização de todas as fases desenvolvidas para alcançar os objetivos.

4.1 Indústria Cerâmica

Para viabilizar a confecção do tijolo cerâmico com a mistura lodo/argila foi contactada uma indústria cerâmica que ocupa uma área de 126.500 m² no Município de Benevides/PA. Com 41 anos de funcionamento, atualmente, tem uma produção semanal de 15.000 peças, que são; tijolos de oito e seis furos, blocos para laje pré-moldados e cumeeira. A escolha da indústria deveu-se ao interesse do proprietário em participar desta pesquisa, o qual colocou toda sua infra-estrutura disponível para viabilização do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos com incorporação do lodo do ETA Bolonha.

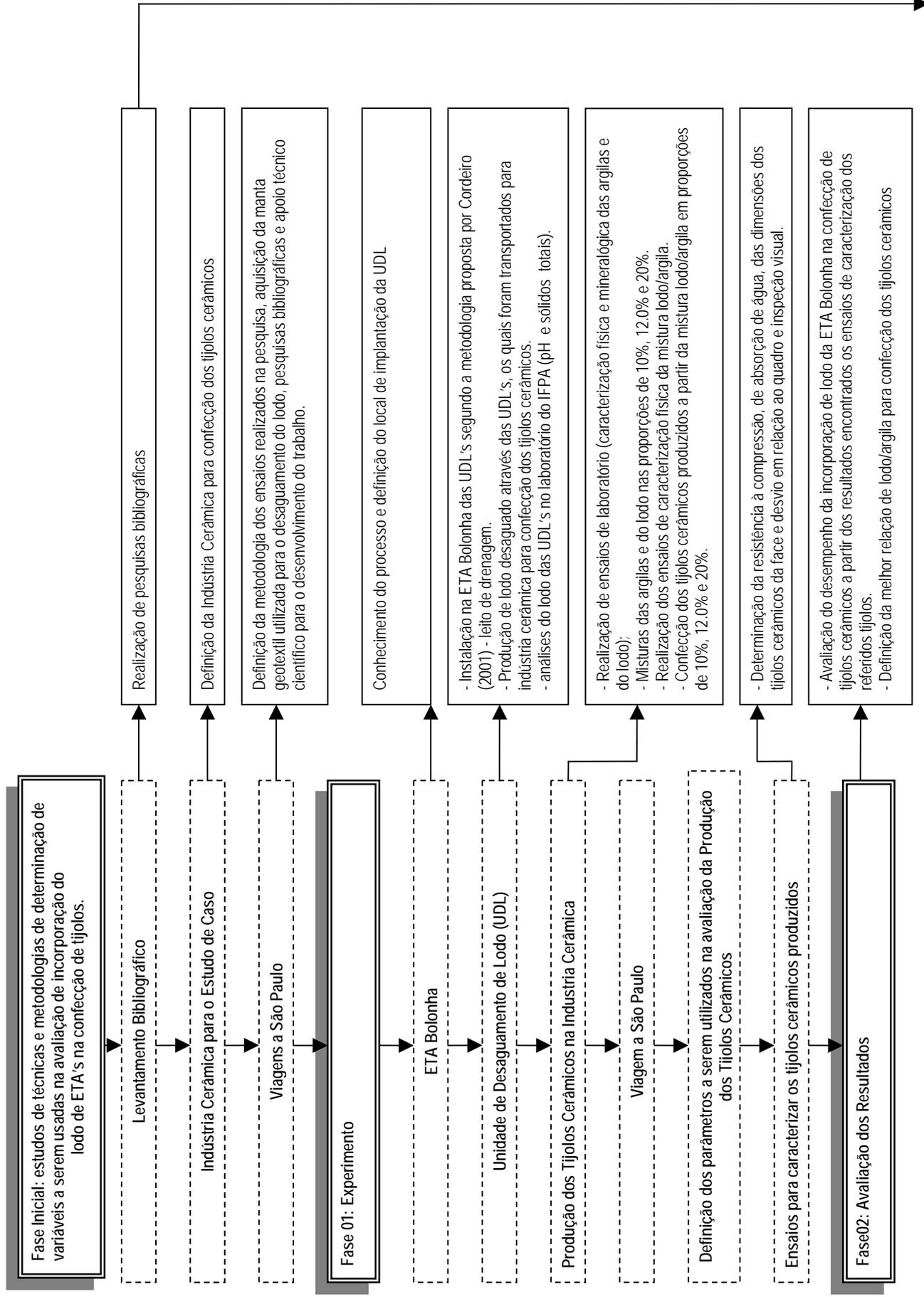


Figura 4.2: Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho

Na figura 4.3 é mostrada uma foto das instalações da Cerâmica.



Figura 4.3: Instalações da indústria cerâmica, onde foi realizado o experimento.

A indústria possui jazida própria e está localizada em Murinim (Benfica) ao lado do Rio Benfica com uma área total de 400.000 m², a uma distância de 30 km da fábrica.

As argilas provenientes da jazida são do tipo magra (argilão) e gorda (plástica), e são extraídas através de tratores de esteira e transportadas ao pátio da fábrica cerâmica por caminhões basculantes, devendo ficar em repouso durante 6 meses, conforme figura 4.4.



Figura 4.4: Argila em processo de repouso no pátio da indústria cerâmica por aproximadamente 6 meses

Na figura 4.5 é apresentado o esquema do processo de fabricação do tijolo cerâmico utilizado na indústria cerâmica deste estudo.

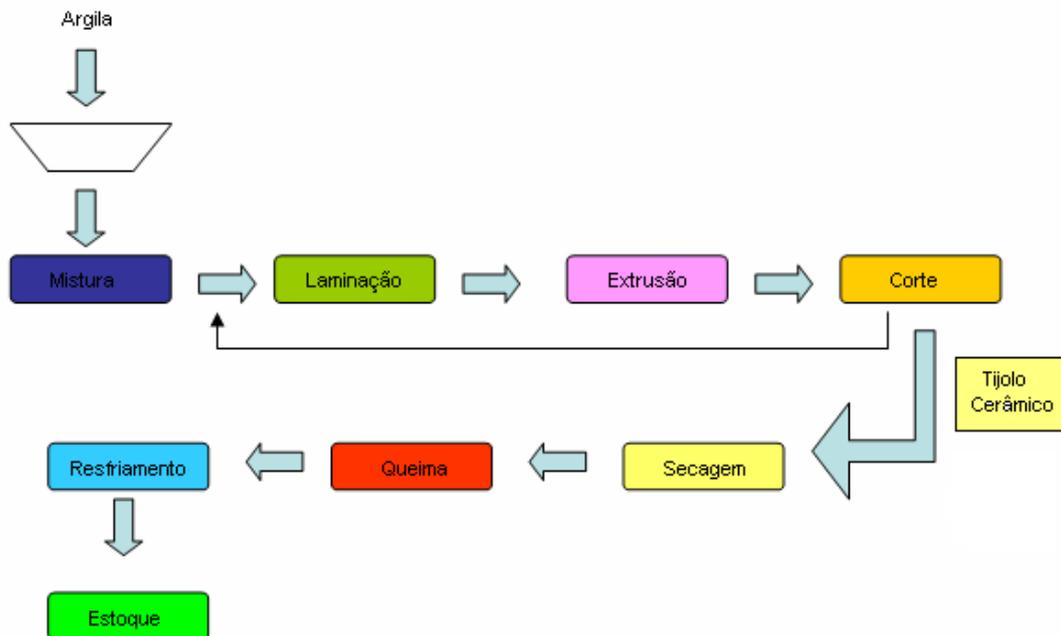


Figura 4.5: Fluxograma do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos.

As argilas (magra e gorda) são colocadas de forma manual pelos operários com auxílio de pá nas esteiras transportadoras (Figura 4.6 a e b), passando por máquinas misturadoras até chegar à máquina extrusora.



Figura 4.6: Processo de colocação de argilas nas esteiras (operação manual); a) argila gorda (plástica); b) argila magra (argilão).

No processo de mistura pode-se adicionar água caso a massa cerâmica esteja muito seca, conforme Figura 4.7.



Figura 4.7: Processo de mistura da massa cerâmica (argila magra e gorda)

Morita *et al* (2002) em estudo similar ao presente trabalho afirmaram que antes da extrusão a mistura passa pelo processo de homogeneização, onde é umidificado acima do limite de plasticidade. Os autores afirmaram que no processo de extrusão a mistura é prensada através do molde, resultando num feixe contínuo, que é cortado em blocos por fios de arame, conforme figura 4.8.



Figura 4.8: Processo de extrusão

Os tijolos cortados são transportados pelos operários através de carrinhos-de-mão para o setor de secagem onde são empilhados de forma manual, conforme figura 4.9.



Figura 4.9: Processo de transporte e secagem dos tijolos cerâmicos; a) transporte dos tijolos; b) setor de secagem

No caso de Indústria Cerâmica precisar aumentar a sua produção em dias ensolarados ou em períodos chuvosos, a secagem dos tijolos cerâmicos é feita através de estufa.



Figura 4.10: Estufa para secagem dos tijolos moldados.

Em seguida à etapa de secagem, os tijolos são transferidos para o forno de queima, onde são empilhados de forma a preencher totalmente o seu interior, com capacidade para 30.000 peças (figura 4.11). O combustível

utilizado atualmente é lenha, todavia, já foi adquirido equipamento que utilizará como combustível a madeira picada (serragem).



Figura 4.11: Forno para queima dos tijolos cerâmicos

Na tabela 4.1 são apresentados alguns parâmetros do processo de queima dos tijolos cerâmicos que leva um total de 48 horas.

Tabela 4.1 Parâmetros usados no processo de queima na Cerâmica Brasília.

TEMPO DE QUEIMA	TEMPERATURA DO FORNO
24 horas	100 a 200° C
12 horas	300°C
8 horas	500° C

Os tijolos, após a queima, permanecem no forno por mais 24 horas para resfriamento, através de circulação de ar. Terminado o resfriamento, os tijolos são transferidos para o galpão de estocagem e expedição. O processo de fabricação dos tijolos cerâmicos leva em torno de 7 dias, desde a dosagem das argilas até a retirada dos tijolos do forno.

4.2 Viagem à São Paulo

Foram realizadas duas viagens ao Estado de São Paulo, para verificar a viabilidade técnica dos ensaios tecnológicos dos tijolos cerâmicos. Na primeira viagem, foi contactado o Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) que forneceu todo o apoio técnico e científico para o desenvolvimento deste trabalho.

Na segunda viagem a cidade de São Paulo, foi conseguida uma “manta” do tipo não tecida de poliéster, de referência comercial, MT600 (marca MACAFERRI), com densidade superficial de 600 g/cm^2 e abertura de $0,06$ a $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ e espessura de $4,4 \text{ mm}$ sem emenda (Figura 4.12). Essa manta foi utilizada nas Unidades de Desaguamento de Lodo (UDL's) nas quais se deram o processo de desaguamento do lodo da ETA Bolonha. Ressalta-se que a referida “Manta” foi doada gentilmente por representante de empresa do setor.



Figura 4.12 : Manta Geotextil MT600 utilizada nas UDL's

No Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, foi oferecido apoio técnico na confecção dos corpos de prova e nos ensaios tecnológico da mistura lodo/argila, caso fosse decidido neste trabalho confeccionar corpos de prova. Assim como, após várias reuniões com o

corpo técnico da EPUSP foi definido que os tijolos cerâmicos deveriam ser produzidos e ensaiados em escala real (dimensões comerciais), visto que, ensaios em corpos de provas em escala-piloto (protótipo), que possuem dimensões inferiores aos comerciais, não seriam possíveis devido a falta de equipamentos nos laboratórios na cidade de Belém (PA). Foi recomendado pelos pesquisadores da EPUSP, a moldagem “*in loco*” devido as alterações nas propriedades físicas que poderiam ocorrer no transporte da mistura lodo/argila da cidade de Belém (PA) para a cidade de São Paulo e conseqüentemente modificar as propriedades mecânicas do tijolo cerâmico.

4.3 Experimento

Neste item apresentam-se as etapas experimentais que foram seguidas, conforme pode ser observado no fluxograma da figura 4.2.

4.3.1 ETA Bolonha

A ETA Bolonha foi o local de implantação das UDL's. Esta ETA está localizada na Região Metropolitana de Belém e dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental dos Mananciais de Abastecimento de Água de Belém (APA-Belém). Uma vista da fachada da ETA é apresentada na figura 4.13.



Figura 4.13: ETA Bolonha (RMB)

Na figura 4.14 são ilustrados os principais processos que constituem uma ETA convencional, o qual é utilizado pela ETA Bolonha e composto das unidades de coagulação (mistura rápida), floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação.

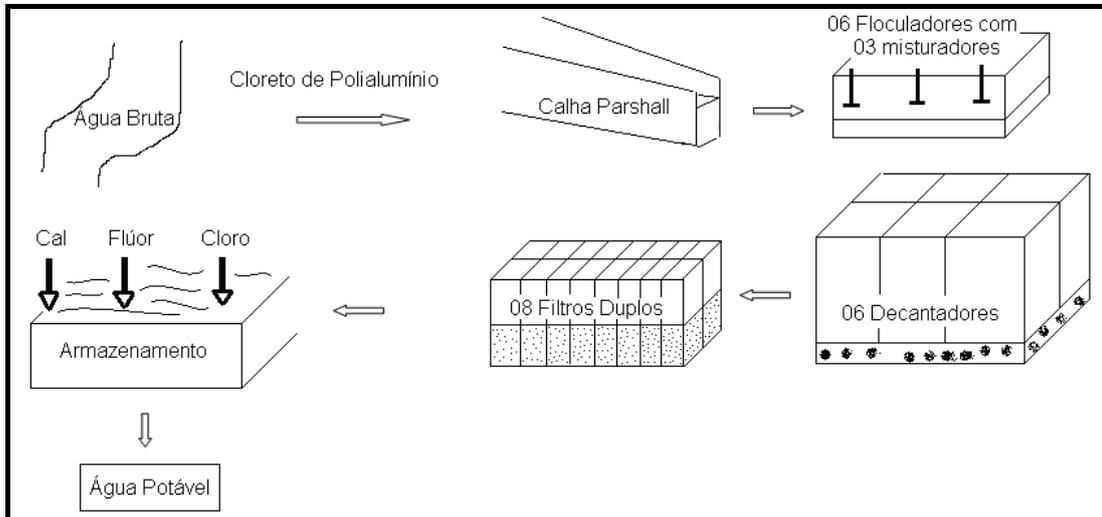


Figura 4.14: Fluxograma do processo de tratamento da ETA Bolonha.

Na **coagulação**, é adicionado a água bruta o Cloreto de Polialumínio. O coagulante utilizado é o Cloreto de Polialumínio, com dosagem de 8 a 8,5 p.p.m, dependendo da qualidade da água bruta (COSANPA, 2008).



Figura 4.15: Ponto de aplicação do Cloreto de Polialumínio e a calha Parshall na ETA Bolonha.

Após a coagulação, a água é encaminhada para o processo de floculação, por um canal, para 6 floculadores dotados de três câmaras cada e de agitadores mecânicos do tipo turbina.

Segundo Machado (2003), a ETA Bolonha possui seis decantadores do tipo convencional, dotados de bandeja intermediária e de limpeza manual. Segundo a autora, o período de operação de cada decantador é de aproximadamente 15 dias, após o qual é totalmente descarregado pela abertura de três registros de fundo (R1, R2 e R4) e de um registro auxiliar (R3). Um esquema do decantador da ETA Bolonha e uma foto são apresentadas nas figuras 4.16 e 4.17, respectivamente.

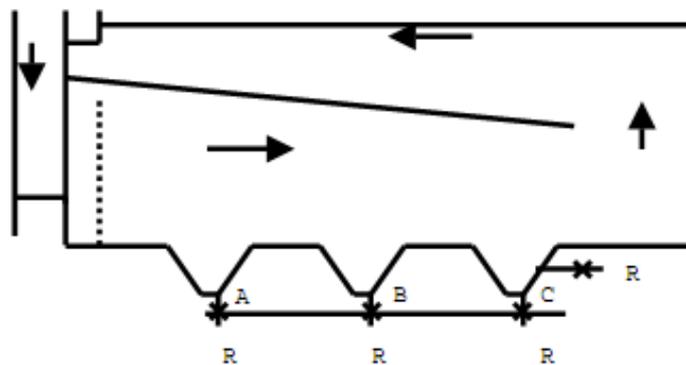


Figura 4.16: Esquemática do decantador da ETA Bolonha
Fonte: Adaptado de Machado (2003).



Figura 4.17: Decantador da ETA Bolonha.

A seguir, tem-se a **filtração**. A ETA Bolonha possui 8 filtros rápidos descendentes, sendo que cada um tem dimensão em planta de 72 m² (6,00 x 12,00), sendo dotado de duas câmaras, com leito filtrantes de camada única de areia.

Por último tem-se a **desinfecção**, que tem a finalidade de eliminar os microorganismos patogênicos presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus, além de algas, realizadas por intermédios de cloro gasoso.

Em seguida ao processo de desinfecção, a água recebe a adição de cal hidratada para correção do pH e a adição de fluorsilicato de sódio, de modo a se obter um teor de fluoreto na água tratada na faixa de 0,6 a 0,8 mg/L.

Após esse tratamento, a água é conduzida a um reservatório apoiado e através das Estações Elevatórias de Água Tratada é encaminhada aos setores de abastecimento.

Uma síntese das unidades da ETA Bolonha é apresentada no quadro 4.1.

Os resíduos da ETA Bolonha oriundos do processo de lavagem dos decantadores e dos filtros, atualmente não estão tendo um destino final adequado em função dos danos que podem causar ao meio ambiente ao serem lançados no Igarapé Murutucum (Parque Ambiental de Belém). Diante desta situação esta pesquisa pretende utilizar os resíduos (lodo) provenientes dos decantadores, como matéria-prima na confecção de tijolos cerâmicos.

Quadro 4.1: Síntese das unidades componentes da ETA Bolonha.

Unidade	Características	Destinação
Câmara de chegada	Dimensões em planta (9,00 x 4,00) m ² .	Receber a água bruta e encaminhar para a Calha Parshall
Mistura rápida	Calha Parshall (Garganta com 6")	Medir a vazão de água bruta e misturador hidráulico
Floculação	6 floculadores com 3 câmaras mecanizadas cada.	Proporcionar a agregação das partículas
Decantação	6 decantadores	Proporcionar a sedimentação das partículas floculadas
Filtração	8 filtros; 2 células filtrantes cada (dimensões em planta (6,00x12,00)m ²)	Retirar as partículas no meio filtrante
Sistema de lavagem dos Filtros	Reservatório elevado com capacidade para 1550 m ³	Reservar água para lavagem dos filtros e demais instalações da estação.
Cloração Correção de pH Fluoretação	Cloro gasoso, hidróxido de sódio, fluorsilicato de sódio	Garantir a desinfecção da água, controlar a corrosão, bem como diminuir a incidência de cáries dentárias

Fonte: Adaptado de Machado (2003).

4.3.2 Implantação e Operação da Unidade de Desaguamento de Lodo (UDL)

A implantação da UDL foi em área próxima dos decantadores da ETA Bolonha e com leito de drenagem, de acordo com Cordeiro (2001).

As UDL's foram compostas de reservatórios cilíndricos com capacidades variadas (1000 litros e 500 litros), dotados de drenos próximo ao fundo, constituído de uma camada de seixo nº 01 com 5 cm de espessura que revestiu a área de fundo e sobre ela a manta Geotextil MT600. Nas figuras 4.18 a), b) e c) são apresentadas a UDL1 na fase de implantação próximo a válvula de fundo do decantador nº 04.

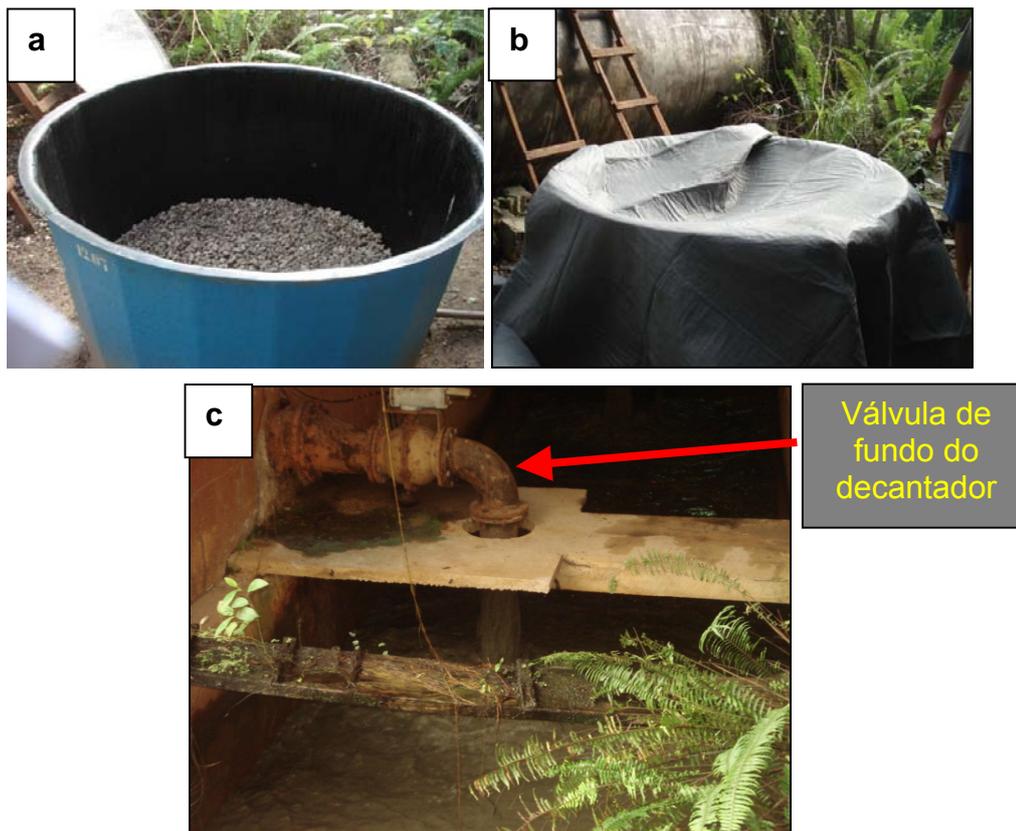


Figura 4.18: UDL1 com a) revestimento de seixo no fundo e b) aplicação da manta Geotextil nas paredes e no fundo localizado próximo a c) válvula de fundo do decantador n° 04.

Nesta etapa experimental as amostras de resíduos foram coletadas particularmente no decantador n° 04 nos dias de limpeza. Este decantador foi escolhido para a coleta das amostras por diversos fatores, sendo o principal deles, a conveniência da abertura da válvula de fundo deste decantador ser manual, o que não era possível nos outros decantadores que tinham a válvula de fundo totalmente automatizada, dificultando a coleta das amostras de fundo devido a vazão ser elevada.

Foram realizadas 4 coletas sendo 3 nas válvulas de fundo (Tipo 1) e 01 do fundo do decantador (Tipo 2). As amostras coletadas possuíam Cloreto de Polialumínio (PACl) como coagulante. O lodo coletado foi encaminhado para as UDL's para desaguamento e posterior armazenamento em local apropriado. Na Figura 4.19 é apresentado o lodo disposto na UDL1.



Figura 4.19: UDL1 em operação com as amostras de lodo.

A partir dos resultados preliminares realizados nos ensaios do Tipo 1 principalmente levando em consideração a quantidade de lodo obtida no processo de desaguamento na UDL1. Por esse motivo, foi implantada nova UDL para os ensaios Tipo 2, que necessitavam de maior quantidade de amostras de lodo desaguado.

A nova UDL foi denominada de UDL2 e era composta de 03 reservatórios cilíndricos, sendo 02 de 500 litros e 01 de 1.000 litros localizados em áreas próximas aos decantadores (Figura 4.20), sendo que a coleta do lodo ocorreu no fundo do decantador nº 04.



Figura 4.20: Montagem da UDL2 ao lado dos decantadores.

No quadro 4.2 são apresentadas as datas das coletas dos lodos nos decantadores e lançamento nas UDL's.

Quadro 4.2: quadro resumo das datas da fase de coleta do lodo e lançamento nas UDL's.

Ensaio	Nº de Coleta	Data da Coleta	UDL
Tipo 1	1ª	18/12/08 (20:30 hrs)	1
	2ª	12/01/09 (20:30 hrs)	
	3ª	24/01/09 (02:00 hrs)	
Tipo 2	4ª	12/03/09 (06:00 hrs)	2

As coletas se deram num período de quatro meses (dezembro/08 a março/09) onde foram obedecidos os critérios de normalização das amostras quanto a sua retirada, preservação e estocagem definidas segundo a NBR 10.007/2004 da ABNT.

Nos ensaios Tipo 01 foram realizadas 03 coletas na UDL1, sendo que a 1ª e 2ª coleta não foram utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa pela quantidade de lodo desaguado (aproximadamente 15 Kg) ter sido insuficiente para a realização dos ensaios de caracterização do referido lodo e confecção dos tijolos cerâmicos. Este fato foi devido às coletas ocorrerem logo após 30 minutos da abertura da válvula de fundo do decantador nº 04 quando o lodo já estava menos concentrado. A 3ª coleta foi a que apresentou maior quantidade de lodo desaguado e possibilitou a coleta de amostras em quantidade suficiente para as análises em laboratório e confecção dos tijolos cerâmicos.

Para melhor compreensão dos procedimentos experimentais adotados neste trabalho relacionam-se a seguir todas as etapas de operação nas UDL's desde a coleta de lodo nos decantadores, lançamento nas UDL's, até a retirada das amostras para mistura (lodo/argila) nas concentrações desejadas e posterior confecção dos tijolos cerâmicos.

- UDL1:
 - Abertura manual da válvula de fundo do decantador pelo operador.
 - Coleta de lodo na válvula de fundo do decantador nº 04 em recipientes com capacidade de 12 litros (Figura 4.21a). O volume coletado era de aproximadamente 1000 litros.
 - Coleta de amostra do lodo na válvula de fundo do decantador em recipientes plásticos, limpos, para análises do teor de sólidos totais (ST) e pH em laboratório (Figura 4.21b).
 - Lançamento do lodo coletado na UDL (Figura 4.22).
 - Monitoramento do leito de drenagem da UDL durante a fase de secagem do lodo em torno de 23 dias (Figura 4.23).
 - Após encerramento da fase de desaguamento foram coletadas amostras de lodo desaguado retido na manta geotextil para determinação do teor de sólidos. Os lotes de lodo coletados após a fase de desaguamento foram transportados para a indústria cerâmica escolhida. Cada lote de lodo desaguado foi colocado em sacos plásticos resistentes, etiquetados, e lacrados somente quando encaminhados a indústria cerâmica para evitar odores desagradáveis.
 - Após a retirada das amostras de lodo desaguado na UDL, a manta geotextil foi retirada para limpeza e posterior reutilização em novos ensaios de desaguamento (Figura 4.24).



Figura 4.21: a) operador coletando lodo na válvula de fundo do decantador nº 04 e b) coleta de amostras do lodo para análise química.



Figura 4.22: Lançamento da amostra do lodo na UDL1.



Figura 4.23: Monitoramento do lodo contido na UDL1 onde observam-se nas figuras a) lodo após o lançamento; b) lodo com 02 dias de secagem; c) lodo com 07 dias e d) lodo com 10 dias.



Figura 4.24: Manta Geotextil limpa e preparada para utilização em novos ensaios.

- UDL2:
 - Colocação de uma escada de madeira, o que proporcionou a descida de um operador até o ponto de coleta no fundo do decantador.
 - Coleta manual e diretamente no fundo do decantador com auxílio de um recipiente de 12 litros (balde plástico), o qual foi içado através de corda e lançado pelos operários em outros recipientes de mesma capacidade (Figura 4.25).
 - Transporte e lançamento dos recipientes de 12 litros diretamente nos protótipos dos leitos de drenagem, totalizando um volume da amostra de aproximadamente 2.000 litros (Figura 4.26a e 4.26b).
 - Monitoramento da UDL durante a fase de secagem do lodo que foi em torno de 15 dias, (Figura 4.27a à Figura 4.27f).
 - Coleta de amostra do lodo desaguado em recipientes plásticos, limpos, para análises do teor de sólidos totais (ST).
 - O encaminhamento do lodo desaguado a indústria cerâmica em sacos plásticos, assim como, a limpeza das mantas geotextil, seguiram a mesma metodologia adotada para o leito de drenagem da UDL1 (ver Figura 4.28).

Quanto ao período de utilização do leito de drenagem da UDL2 envolvendo as operações de lançamento do lodo, monitoramento do desaguamento e retirada dos sólidos desaguados foi de aproximadamente 15 dias. Este tempo foi devido a redução da quantidade de lodo em volume, aumentando a concentração de sólidos, o que proporcionou uma condição mais favorável para a utilização do referido leito face ao período de utilização da UDL1 que utilizou um lodo muito úmido.



Figura 4.25: coleta manual de lodo no fundo do decantador nº 04.



Figura 4.26: a) Transporte das amostras de lodo e b) Lançamento das amostras de lodo em um dos reservatórios da UDL2.

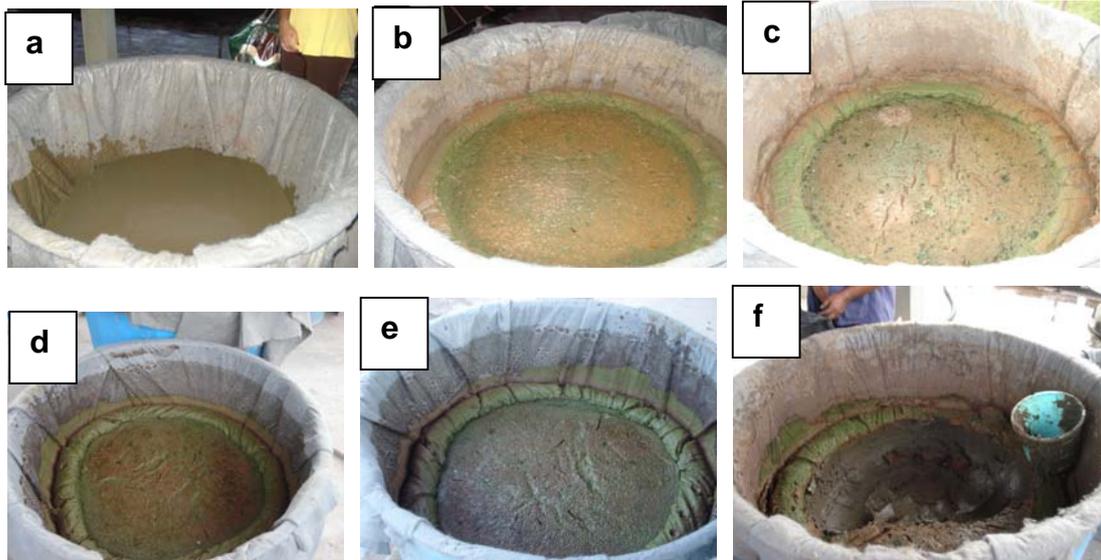


Figura 4.27: Monitoramento do lodo desaguado na UDL2 com a) durante lançamento; b) 5 dias; c) 7 dias; d) 11 dias; e) 13 dias; f) 15 dias, com retirada da amostra para análise e encaminhamento a indústria cerâmica.



Figura 4.28: Colocação do lodo desaguado em sacos plásticos para transporte à indústria cerâmica após as fases de drenagem e secagem na UDL2.

4.3.3 Produção dos Tijolos Cerâmicos

Conforme foi descrito anteriormente, a incorporação do lodo às massas cerâmicas teve início após conclusão da produção da quantidade desejada de lodo desaguado, através das UDL's provenientes das coletas 3 e 4, que doravante são denominados de lote. No quadro 4.3 é apresentado um resumo das quantidades de lodo produzido em cada coleta.

Quadro 4.3: Resumo das quantidades de lodo produzido em cada lote nas UDL's.

Lotes	Quantidade (em sacas)*	UDL
03	4 sacas	UDL1
04	14 sacas	UDL2

* 1 saca equivale a aproximadamente 20 kg de lodo desaguado

O lodo desaguado foi transportado, por um veículo, até a indústria cerâmica em sacos plásticos, devidamente etiquetados, identificando os lotes, com cuidado de ser retiradas folhas, insetos ou qualquer outro material estranho encontrado no lodo.

Com a chegada destes materiais à referida indústria, foram executados os seguintes procedimentos, segundo apresentado por Novaes (2005) e aqui adaptado para esta pesquisa:

1º Os sacos plásticos contendo lodo da ETA Bolonha foram abertos e espalhou-se este material no pátio da indústria cerâmica sobre o solo;

2º No segundo dia, executou-se o quarteamento do lodo e amostras foram encaminhadas aos laboratórios. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade da Amazônia, da EMBRAPA/PA e no Laboratório de Geologia do IFPA, sendo obtido:

- Massa Específica do lodo;
- Teor de umidade;
- Distribuição Granulométrica;
- Limite de Liquidez e de Plasticidade e Índice de Plasticidade;
- Difração de Raios-X

- Carbono orgânico

Os procedimentos dos referidos ensaios encontram-se na íntegra no anexo A e seguiram as normas da ABNT, da seguinte forma: NBR 6508 – Determinação da massa específica do solo; NBR 6457 – Determinação do Teor de Umidade; NBR 7181 - Distribuição Granulométrica; NBR 7180 – Determinação do Limite de Plasticidade e NBR 6459 - Determinação do Limite de Liquidez. O ensaio de determinação da matéria orgânica foi realizado através do método do carbono orgânico e seguiu a metodologia da EMBRAPA/PA.

No caso da análise por Difração de Raios-X, Dias *et al* (2008) comentaram, em seu trabalho sobre uso do lodo na fabricação de blocos, que esta técnica consiste em determinar as distâncias mantidas pelos íons ou átomos formadores dos cristais (distância interplanares), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de Raios-X incidente e o plano atômico e difrato, como também do conhecimento do comprimento de onda desses raios. Segundo os autores, essa técnica tem sido muito utilizada na análise de inúmeros materiais cimentícios, rochas, solos e concretos, a fim de qualificar os minerais constituintes de cada material. Ressalta-se que este último ensaio (difração de Raios-X) foi realizado no Laboratório de Geologia do IFPA. A metodologia consiste de um equipamento de Raios-X, com amostra em pó, cujo diagrama de refração é registrado graficamente por contador Geiger, chamado de difratograma de Raios-X. O ensaio consiste em secar o resíduo em estufa e depois passar na peneira nº 100 e em seguida a amostra em pó é colocada em lamina de vidro. Logo depois o aparelho de Raios-X é acionado sobre a amostra e obtido o difratograma em contador. O difratômetro de Raios-X empregado foi da marca PHILIPS PW 1730, com Goniômetro PW 1050, foco normal, e com tubo de raios-x de anodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,540598 Å). A aquisição de dados foi obtida através de uma interface e software e tratamento dos dados com o software APD (*Automated Powder Diffraction*) (Figura 4.29). Os registros foram realizados no intervalo de 10 a 60° 2 θ .

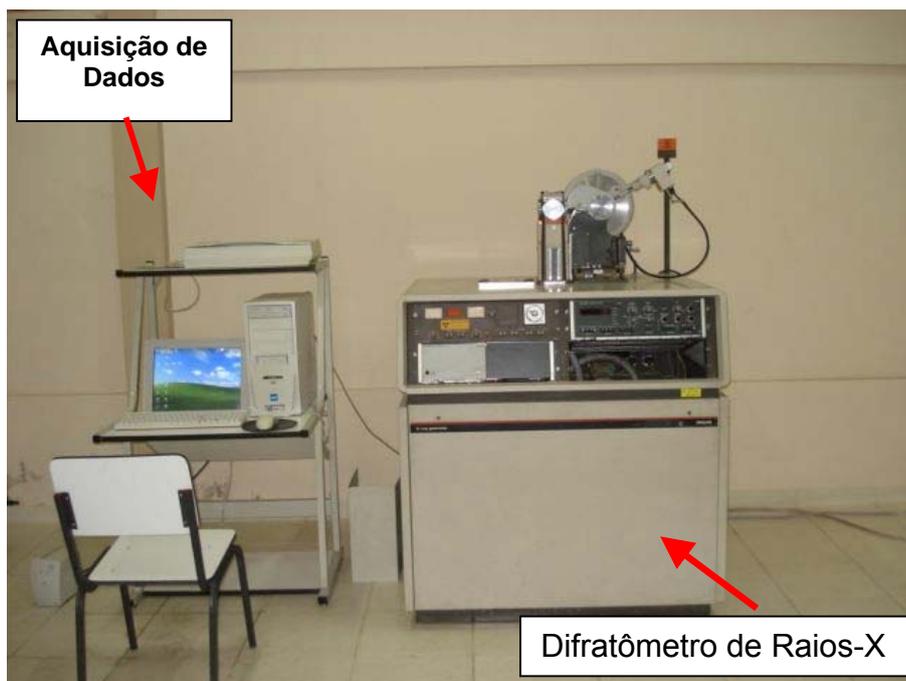


Figura 4.29: Difratômetro de Raios-X da marca PHILIPS

3º No terceiro dia, foi coletada uma amostra de cada tipo de argila constituinte de massa cerâmica para a realização de análises física e mineralógica, sendo que as argilas utilizadas para confecção dos tijolos cerâmicos desta pesquisa foram as da indústria cerâmica, do tipo magra e gorda, as quais são extraídas de jazida própria.

Na indústria cerâmica, as argilas foram misturadas de forma manual na proporção de 8:2, respectivamente do tipo magra e gorda (argila plástica) guardadas em um galpão coberto apresentando a configuração heterogênea.

4º Antes de proceder a mistura do lodo com o montante de massa cerâmica foi realizada coleta de amostras de lodo e da massa cerâmica para determinação do teor de umidade. Este procedimento foi necessário devido a perda de umidade do lodo.

5º Por fim, foi obtida a mistura lodo/argila nas relações pré-determinadas (10%, 12% e 20%).

Essas proporções foram estabelecidas por serem consideradas as melhores proporções para confecção dos tijolos conforme descrito nos trabalhos de Dias *et al.* (2008), Morita *et al.* (2002), Novaes (2005) e Magalhães (2003).

Antes de iniciar a produção dos tijolos cerâmicos, as argilas foram separadas e deixadas em um local próximo dos lotes 03 e 04 de lodo. Um operador, com auxílio de uma pá, colocava de forma alternada, as devidas quantidades de lodo e de massa cerâmica em um local (pátio) da indústria. Alguns cuidados especiais foram repassados ao operador quanto às quantidades erguidas na pá, pois deve-se manter semelhança, de modo a manter as proporções de mistura pré-estabelecidas, por exemplo para a proporção de 20% de lodo, cada oito pás de massa cerâmica foi colocado duas pás de lodo, e assim sucessivamente até completar o volume desejado, no total, três proporções de mistura foram obtidas para cada lote de lodo desaguado.

Para cada lote de lodo (03 e 04), cuidados especiais foram tomados na identificação de cada proporção a ser utilizada de (10%, 12%, 20%) para posterior comparação com o tijolo fabricado apenas com argila (testemunho), ou seja 0% de lodo (ver figura 4.30).



Figura 4.30: Tijolo-testemunho (0% de lodo).

Antes de iniciar a produção dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha, foram limpos o tanque de homogeneização e a extrusora, objetivando que toda massa cerâmica incrustada nas mesmas não interferisse nas proporções (10%, 12% e 20% de lodo), visando o início da produção dos tijolos cerâmicos para cada lote (03 e 04).

Os conteúdos das misturas inicialmente sofreram o processo de homogeneização, em seguida extrusão, secagem, queima, seleção e expedição, conforme a metodologia utilizada pela indústria cerâmica escolhida (ver Figura 4.31a, 4.31h e 4.32a e 4.32c).



Figura 4.31: Processo de fabricação dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha; a) lodo no pátio da indústria cerâmica; b) massa cerâmica (0% de lodo); c) mistura lodo/argila; d) lançamento da mistura (esteira); e) homogeneizador; f) extrusora; g) vagonetes transportadores; h) transporte dos tijolos.



Figura 4.32: Continuação do processo de fabricação dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha; a) setor de secagem; b) queima dos tijolos; c) seleção e expedição

No processo de fabricação dos tijolos com incorporação de lodo provenientes do lote 03 (UDL1) nas proporções de 10% e 12%, notou-se que havia pouca presença de água livre no lodo, levando a dosagem (adição) de água, no processo para produção dos tijolos nas proporções pré-estabelecidas. Quanto a incorporação de lodo na proporção de 20% à massa cerâmica, esta não foi possível devido a quantidade de lodo desaguado ser insuficiente para produção dos tijolos nesta proporção.

Na produção dos tijolos com as proporções de 10% e 12% referente ao lote 04 (UDL2), a água normalmente dosada no processo cerâmico foi cessada em função do estado plástico da massa cerâmica. Os tijolos foram extrusados na pressão 18 kgf/cm^2 , a qual é considerada como a pressão normal de operação.

Em seguida dando continuidade ao processo de fabricação dos tijolos com incorporação de 20% de lodo proveniente do lote 04, notou-se que a massa cerâmica adquiriu mais plasticidade, após o processo de homogeneização, o que ocasionou uma redução na pressão da extrusora para 13 kgf/cm². A massa extrusada caiu no chão e não foi possível passar por corte de fios de arame.

À medida que os tijolos foram extrusados, estes eram marcados com bastões de aço numerados (gabarito), para distinguir quais iriam corresponder às proporções investigadas, pois no forno de queima eles se misturam, podendo comprometer os testes seguintes.

Esses tijolos foram submetidos ao processo normal de secagem ao ar livre, por um período de 4 dias, e posteriormente queima a 500°C. Após a queima, durante 48 horas, os tijolos permaneceram no forno durante 24 horas para resfriamento. Por fim, os tijolos fabricados foram estocados em um local coberto na indústria e alguns deles retirados e encaminhados ao Laboratório de Materiais de Construção da UNAMA, para ensaios físicos e mecânicos, para verificação de conformidade segundo testes padronizados pela ABNT, tais como: Absorção d'água, resistência à compressão, determinação das dimensões, determinação de desvio em relação ao esquadro e inspeção visual.

A quantidade de tijolos cerâmicos em relação a cada mistura (10%, 12%) foi de aproximadamente de 100 a 120 tijolos para cada lote de lodo desaguado, totalizando 660 unidades (conforme Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Quantidades de tijolos cerâmicos produzidos em relação a incorporação de lodo.

Lote	Proporção de Incorporação de Lodo (%)	Quantidade de Tijolo Cerâmico Produzido
03	0	100
	10	100
	12	100
04	0	120
	10	120
	12	120

4.3.4 Ensaios para Caracterização dos Tijolos Cerâmicos

A seguir, serão descritas as metodologias empregadas para caracterização dos tijolos cerâmicos produzidos a partir da mistura lodo/argila. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Determinação da resistência à compressão;
- Determinação de absorção de água;
- Determinação das dimensões dos tijolos cerâmicos;
- Determinação da Face e Desvio em Relação ao Esquadro;
- Inspeção visual.

a) Determinação da Resistência à Compressão

Este ensaio seguiu a metodologia recomendada pela NBR 6461/1983 e a verificação da qualidade dos mesmos segundo a NBR 7171/1992.

A norma brasileira NBR 7171/1992 estabelece sete classes de resistência à compressão, as quais são determinadas a partir dos resultados obtidos pelas amostras durante o ensaio, ou em função da informação prestada pelo fabricante, conforme tabela 4.3

Tabela 4.3: Classificação dos tijolos cerâmicos segundo valores obtidos de resistência a compressão.

Classe	Resistência a Compressão na Área Bruta (MPa)
10	1,0
15	1,5
25	2,5
45	4,5
60	6,0
70	7,0
100	10,0

Fonte: NBR 7171/1992.

De acordo com a NBR 7171/1992, no caso dos tijolos cerâmicos com largura (L) inferior a 90 mm, a resistência mínima à compressão exigida é de 2,5 MPa, independentemente da classificação. Todas as amostras de tijolos cerâmicos tem que atender ao requisito mínimo de 1,0 MPa.

Nas figuras 4.33 a 4.35 é mostrada a preparação dos tijolos cerâmicos para os ensaios de resistência a compressão. Uma prensa hidráulica modelo Universal MUE-100 da marca EMIC foi utilizada nos ensaios de resistência mecânica dos tijolos cerâmicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade da Amazônia.



Figura 4.33: Aspecto visual da coloração dos tijolos cerâmicos utilizados no ensaio de resistência à compressão



Figura 4.34: Tijolo capeado com argamassa pronto para ensaio de resistência à compressão.



Figura 4.35: Prensa Hidráulica usada para a realização do ensaio de resistência à compressão.

b) Determinação de Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água seguiram as recomendações da norma NBR 7171/1992, a qual estabelece que a absorção de água não deve ser inferior a 8% e nem superior a 25%

A metodologia utilizada no trabalho seguiu a de Novaes (2005) para os testes de absorção de água e foi o seguinte:

1. No Laboratório de Materiais de Construção da Unama foram escolhidos e identificados os tijolos cerâmicos a serem utilizados na determinação da absorção de água (figura 4.36)



Figura 4.36: Separação e identificação dos tijolos cerâmico para amostragem .

2. Os tijolos separados para amostragem foram colocados para secagem em estufa a 110° C durante um período de 24 horas (ver figura 4.37)



Figura 4.37: Secagem em estufa

3. Após o período de secagem (24 horas) os tijolos foram pesados (peso pós-estufa PF);
4. Em seguida, os tijolos foram encaminhados a um tanque com água à temperatura ambiente por 24 horas (ver figura 4.38)



Figura 4.38: Tijolos imersos em tanque com água

5. Após esse período de tempo, foram retirados do tanque com um pano úmido, enxugados e pesados (peso pós-mergulho PI);
6. No cálculo da absorção de água foi empregada a fórmula:

$$\frac{PF - PI}{PI} \times 100$$

Eq. 4.1

c) Determinação das Dimensões dos Tijolos Cerâmicos

As dimensões (largura x altura x comprimento) dos tijolos cerâmicos foram avaliadas conforme a NBR 7171/92 e NBR 8042/92 que objetivam verificar se a produção dos referidos tijolos confeccionados estavam em conformidade com as especificações das referidas normas técnicas.

d) Determinação da Planeza da Face e Desvio em Relação ao Esquadro

Segundo Dias *et al.* (2008) a NBR 7171/92 recomenda que os tijolos cerâmicos devem apresentar uma tolerância de 3 mm, quando avaliados em relação ao desvio de esquadro e a planeza da face. Os autores explicaram que a verificação da planeza refere-se à medida da flexa na região central da face do bloco, face essa que receberá a argamassa de revestimento, enquanto, o desvio em relação ao esquadro refere-se à face destinada a receber as argamassas de assentamento e de revestimento. Assim, dizem os autores, os dois índices avaliam as questões de empenamento e deformações que ocorrem nos blocos durante o processo produtivo, fatores esses importantes para o nivelamento da alvenaria e consumo de argamassas para revestimento.

e) Inspeção Visual

Este teste é um processo de avaliação visual que foi realizado em alguns tijolos cerâmicos selecionados para o ensaio de resistência a compressão como: observações relativas a uniformidade do processo de queima, cor aparente, presença ou ausência de trincas, arestas e cantos e conformação dos furos que são parâmetros que podem comprometer a qualidade dos tijolos cerâmicos quando submetidos a compressão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados de forma a verificar o desempenho dos tijolos cerâmicos com lodo da ETA Bolonha.

5.1 Determinação dos Teores de Sólidos e de Carbono Orgânico

Os diferentes coagulantes utilizados em ETA's (sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio, sulfato ferroso, sulfato ferroso clorado, cloreto férrico, etc...) influenciam as propriedades dos materiais cerâmicos que incorporam o lodo de ETA's no processo de fabricação.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os teores de sólidos e de carbono orgânico determinados para o lodo após desaguamento no leito de secagem. Frisa-se que o lodo do lote nº 03 ficou na UDL1 por um período de 23 dias, superior ao lodo contido na UDL2 (Lote nº 04), que foi somente de 15 dias. Um trabalho recente apresentado por Barroso (2007), que seguiu metodologia proposta por Cordeiro (2001), determinou teores de sólidos totais para uma ETA do estado de São Paulo e obteve para massa seca de 28,4% no leito de drenagem num período de 7 dias de desaguamento. O coagulante usado era o cloreto de polialumínio (PAC), mesmo produto, empregado na ETA Bolonha (PA).

Em relação ao carbono orgânico, o lodo da ETA Bolonha apresentou valores de 2,35 a 2,45%, valores estes inferiores aos de Morita *et al.* (2002) que determinaram teores de carbono orgânico variando de 5,5 a 8,1%. Os autores recomendaram que o lodo da ETA Cubatão pudesse substituir o coque (comumente utilizado na indústria cerâmica como fonte de matéria orgânica), parcialmente ou totalmente. Novaes (2005) afirmou que percentuais elevados de matéria orgânica podem prejudicar a fabricação de peças cerâmicas, pois, durante a queima, poderão perder massa e

comprometer as propriedades mecânicas das peças, todavia, um pouco é necessário para queima.

Tabela 5.1 Teores de sólidos do lodo

Lote	Sólidos Totais	Sólidos Totais	Período de Desaguamento (dias)
	(%) * Início	(%) ** Final	
03	0,50	27,9	23
04	3,28	23,4	15

* Início do desaguamento do lodo

** Após desaguamento do lodo

Tabela 5.2: Teores de carbono orgânico

Amostra	C (%)
Lote nº 03	2,35
Lote nº 04	2,45
Argila Gorda	0,63
Argila Magra	0,64

5.2 Determinação dos Teores de Umidade do Lodo, das Argilas e da Massa Cerâmica

5.2.1 Lote nº 03 - Proveniente da UDL1

Na tabela 5.3 são apresentados os resultados do teor de umidade do lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda, e da massa cerâmica no início do processo de produção dos tijolos cerâmicos.

Tabela 5.3: Teor de umidade do Lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda, e da massa cerâmica – UDL1

Amostra	Unidade (%)
Lodo da ETA Bolonha (Lote nº 03- UDL1)	72,10
Argila Magra	14,45
Argila Gorda	23,87
Massa Cerâmica	32,22

Ressalta-se que o lodo permaneceu no leito de secagem por 23 dias, as sacas não continham água livre e o material apresentava boa consistência e com teor de sólidos totais de 27,9%. O lodo foi encaminhado à Indústria Cerâmica e permaneceu no pátio da referida indústria por aproximadamente 14 dias.

Os resultados encontrados para o teor de umidade, conforme apresentado na tabela 5.3, seguiram as recomendações da NBR 6457/82.

5.2.2 Lote nº 04 - Proveniente da UDL2

Na tabela 5.4 são apresentados os resultados do teor de umidade do lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda, e da massa cerâmica no início do processo de produção dos tijolos cerâmicos.

Tabela 5.4: Teor de umidade do lodo da ETA Bolonha, das argilas magra e gorda, e da massa cerâmica – UDL2

Amostra	Unidade (%)
Lodo da ETA Bolonha (Lote nº 04- UDL2)	76,6
Argila Magra	15,20
Argila Gorda	24,60
Massa Cerâmica	33,46

Os teores de umidade do lodo apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4 diferem entre si em 4,5%. Essa diferença pode ser atribuída ao tempo de desaguamento do lodo da UDL1 que foi maior (23 dias) em relação a UDL2 (15 dias) e também, ao teor de sólidos inicial. O teor de sólidos encontrado nos lotes nº 03 e 04 foram de 27,9% e 23,4%, respectivamente.

5.3 Determinação da Granulometria por Sedimentação

A composição granulométrica das matérias-primas utilizadas no processo de fabricação dos tijolos cerâmicos é fundamental para a sua qualidade.

Os resultados apresentados neste item são da determinação da granulometria pelo método da sedimentação do lodo da ETA Bolonha

provenientes das UDL's, das argilas gorda e magra e da massa cerâmica (8:2). Os dados do ensaio encontram-se dispostos no anexo B.

5.3.1 Lodo da ETA Bolonha

Os resultados obtidos de granulometria e massa específica para as amostras de lodo da ETA Bolonha são apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Granulometria e massa específica das amostras de lodo coletadas no decantador nº 04 da ETA Bolonha.

Lote	Granulometria por Sedimentação (%)		Massa Específica g/cm ³
	Silte (%)	Argila(%)	
03	8	92	2,182
04	4	96	2,349

* Lodo proveniente do lote nº 03 desaguado na UDL1 no mês de Janeiro de 2009, sendo que este material foi analisado no dia 09/03/09. O teor de sólidos encontrado foi de 27,9%.

** lodo proveniente do lote nº04 desaguado na UDL2, no mês de março de 2009 e analisado no dia 03/04/2009. O teor de sólidos foi 23,4%.

Através dos resultados obtidos, observou-se um material com características granulométricas predominantes de uma argila coloidal, com forte tendência a presença de um comportamento de um material plástico, semelhante às argilas do tipo gorda, ou seja, um material rico em argilo minerais, com leve registro de silte e ausência de areia.

5.3.2 Argila do Tipo Magra

Na tabela 5.6 são apresentados os resultados obtidos de granulometria e massa específica para a argila do tipo magra.

Tabela 5.6: Granulometria e massa específica das amostras da argila tipo magra.

Amostra	Granulometria por Sedimentação (%)		Massa Específica g/cm ³
	Silte (%)	Argila(%)	
01*	55	46	2,203
02**	59	41	2,205

* coletada em 10/09/2008 na jazida pelo ceramista e analisada em 10/03/09

** coletada em 05/10/2008 na jazida e analisada em 04/04/09.

A argila magra tem características de um solo silte argiloso, todavia, vale salientar que, neste trabalho esta argila já encontrava-se no pátio da cerâmica por um período aproximado de 6 meses, devido a necessidade de estocagem de matéria-prima por parte do ceramista. A qualidade deste material, quanto a sua homogeneidade e representatividade, pode ser seriamente comprometida devido ao processo de extração por tratores nas jazidas.

5.3.3 Argila do Tipo Gorda

Na tabela 5.7 são apresentados os resultados obtidos de granulometria e massa específica para a argila do tipo gorda.

Tabela 5.7: Granulometria e massa específica das amostras da argila tipo gorda.

Amostra	Granulometria por Sedimentação (%)		Massa Específica g/cm ³
	Silte (%)	Argila(%)	
01*	37	63	2,650
02**	39	61	2,651

* coletada em 10/09/2008 na jazida pelo ceramista e analisada em 10/03/09

** coletada em 05/10/2008 na jazida e analisada em 04/04/09.

A argila gorda tem um comportamento de um solo argilo siltoso, com presença de partículas predominantemente finas, constituindo-se, portanto em um material altamente recomendável para o emprego na indústria cerâmica.

Na região, costuma-se utilizar o termo “argila nobre” afim de melhor qualificar tais propriedades, com elevado índice de argilo minerais e baixos teores de impurezas.

5.3.4 Massa Cerâmica

Na tabela 5.8 são apresentados os resultados de granulometria e massa específica para a massa cerâmica na proporção 8:2, respectivamente de argila do tipo magra e gorda.

Tabela 5.8: Composição Granulométrica da Massa Cerâmica utilizada no processo industrial.

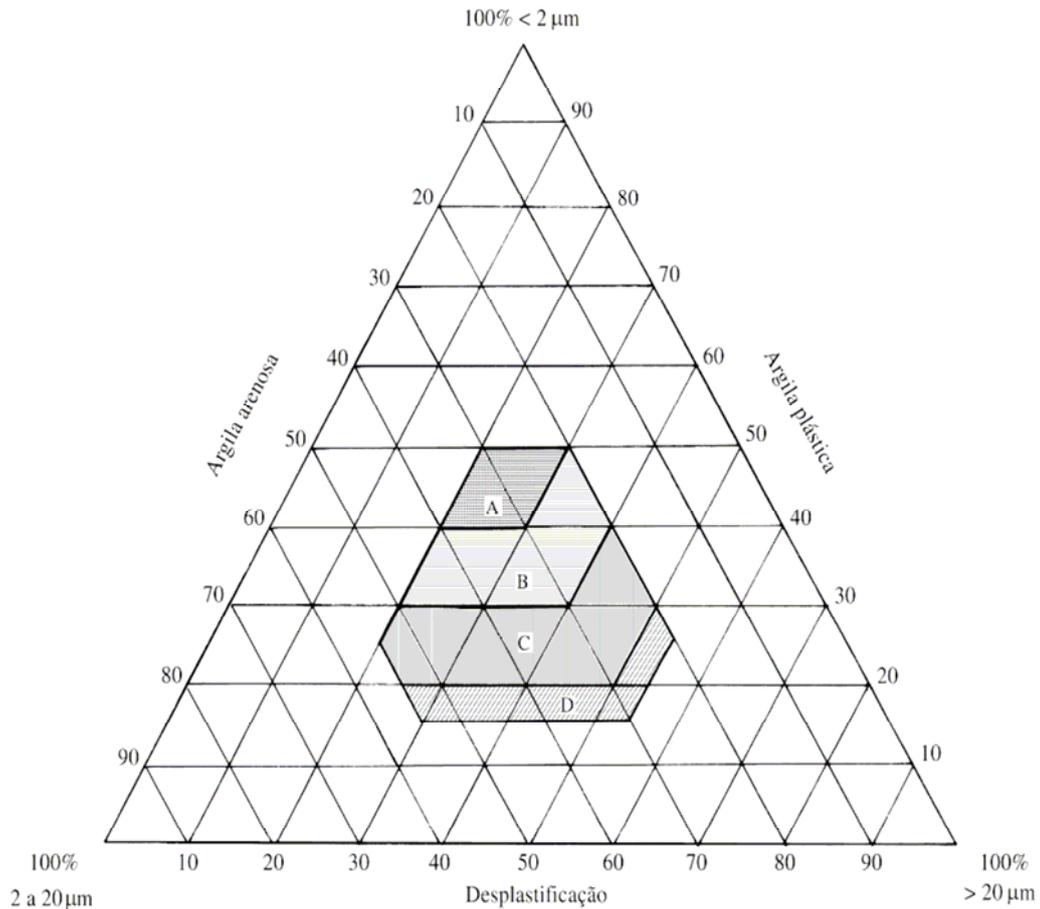
Amostra da Massa Cerâmica	Argila (%)	Silte (%)	Massa Específica (g/cm³)
1*	48	52	2,616
2**	42	58	2,617

* amostra coletada na industria cerâmica em 10/03/09 e analisada em 10/03/09

** amostra coletada em 04/04/09 e analisada em 04/04/09

Os resultados apresentados na tabela 5.8 indicam uma forte tendência da ausência da fração de areia na composição da massa cerâmica na região amazônica. Trabalhos anteriores, como o de Morita *et al.* (2002) e de Novaes (2005), relataram a presença de areia com teores de 40% a 15% na composição da massa cerâmica, respectivamente. A ausência da areia na massa cerâmica contribui positivamente para a resistência mecânica dos tijolos cerâmicos.

Pracidelli e Melchiades (1997) apresentaram um critério de avaliação qualitativo da massa cerâmica com base na sua granulometria a partir de um modelo denominado de “Diagrama Granulométrico de Winkler” que estabelece para tijolos furados, que a massa deve conter de 20 a 30% de partículas com diâmetros inferiores a 2 μm , de 20 a 55% de partículas com diâmetros variando de 2 a 20 μm e de 20 a 50% de partículas com diâmetros superiores a 20 μm . Estas composições referem-se a região C do Diagrama de Winkler, conforme Figura 5.1.



A- Material de qualidade; B- Telhas e Capas; C- Tijolos Furados; D- Tijolos Maciços

Figura 5.1: Diagrama Granulométrico de Winkler

De acordo com os resultados da análise granulométrica da massa cerâmica em estudo, conforme apresentado na tabela 5.8, observa-se que a sua composição para a confecção dos tijolos encontrava-se com valores aceitáveis, conforme a faixa ideal proposta pelo “Diagrama de Winkler”. O teor de componentes argilosos ($\varphi < 2 \mu\text{m}$) está posicionado próximo do valor limite superior deste enquadramento (região C), assim como, o teor de desplastificante. Tais resultados vêm a ratificar a boa qualidade na fabricação dos tijolos cerâmicos na região.

5.4 Determinação dos Limites de Consistência

Na tabela 5.9, são apresentados os valores dos limites de consistência das amostras do lodo da ETA Bolonha. Os dados encontram-se no anexo B.

Tabela 5.9: Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade encontrados nas amostras de lodo da ETA Bolonha.

Amostra	Limite (%)		Índice de Plasticidade IP (%)
	Liquidez LL	Plasticidade LP	
1*	282,00	83,77	198,20
2**	275,40	83,77	191,70

* Amostra 1: Lodo proveniente do lote nº 03 (UDL1)

** Amostra 2: lodo proveniente do lote nº 04 (UDL2)

NP = Não Plástico

As amostras de lodo da ETA Bolonha apresentaram comportamento físico diferenciado dos encontrados nos solos, com constantes dificuldades de manuseio do mesmo na realização dos ensaios geotécnicos, fato também relatado por Nunes e Sartori (1997), que concluiu que a constituição e o comportamento da amostra do lodo dos leitos de secagem afastavam-se radicalmente do modelo utilizado na Geotecnia, com forte presença de matéria de natureza orgânica, transferindo atributos químicos que determinaram um comportamento peculiar, tanto no estado úmido quanto seco, diferenciando-o bastante dos solos ainda que orgânicos, ou mesmo turfas. Tais observações foram constatadas durante a realização dos ensaios geotécnicos realizados nas amostras do lodo deste trabalho.

Entretanto, sugere-se neste trabalho algumas adequações na metodologia empregada na realização dos ensaios rotineiros de solo, aplicados ao lodo das ETA's, tais como, por exemplo, a não elevada secagem do teor de umidade do lodo na realização dos ensaios de consistência (LL e LP).

Os valores dos limites de consistência da amostra de argila do tipo magra são apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade encontrados nas amostras de argila tipo magra.

Amostra	Limite (%)		Índice de Plasticidade IP (%)
	Liquidez	Plasticidade	
	LL	LP	
1*	32,00	21,70	10,30
2**	33,93	19,39	14,54

* Coletada em 10/09/08 e analisada em 10/03/09

** Coletada em 05/10/08 e analisada em 04/04/09

De acordo com os valores apresentados na tabela 5.10, pode-se observar que com o auxílio do Ábaco de Casagrande, conforme Figura 3.8 do capítulo 3, constata-se o enquadramento de tal material como sendo uma argila inorgânica de mediana plasticidade.

Os valores dos limites de consistência da amostra de argila do tipo gorda são apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade encontrados nas amostras de argila tipo gorda

Amostra	Limite (%)		Índice de Plasticidade IP (%)
	Liquidez	Plasticidade	
	LL	LP	
1*	40,20	21,31	18,89
2**	33,51	17,77	15,74

* Amostra coletada em 10/09/08 na jazida pelo ceramista e analisada em 10/03/09.

** Amostra coletada em 05/10/08 na jazida pelo ceramista e analisada em 04/04/09.

Os resultados obtidos indicam que as amostras das argilas do tipo gorda podem ser classificadas como altamente plásticas ($IP > 15\%$), conforme apresentado na tabela 5.12, concluindo-se portanto, a boa qualidade das matérias-primas cerâmicas para a fabricação dos tijolos quanto ao aspecto da plasticidade das mesmas.

Tabela 5.12: Classificação das amostras segundo o Índice de Plasticidade.

Faixas de Índice de Plasticidade	Classificação	Amostras
$1\% < IP < 7\%$	Fracamente Plástica	-
$7\% < IP < 15\%$	Medianamente Plástica	Magra
$IP > 15\%$	Altamente Plástica	Gorda

Na tabela 5.13 estão os valores dos limites de consistência das amostras da mistura cerâmica utilizada pela indústria cerâmica na proporção de 8:2, respectivamente do tipo de argila magra e gorda.

Tabela 5.13: Limites de consistência das amostras da massa cerâmica.

Amostra	Limite (%)		Índice de Plasticidade IP (%)
	Liquidez LL	Plasticidade LP	
1*	37,00	23,29	13,71
2**	43,29	25,24	18,05

* amostra coletada em 10/03/09 e analisada em 10/03/09

** amostra coletada em 04/04/09/ e analisada em 04/04/09

Conforme os resultados apresentados na tabela 5.13, observaram-se com o auxílio do Ábaco de Casagrande, uma classificação do solo como sendo uma argila inorgânica de mediana plasticidade. Percebe-se que devido a maior contribuição da argila magra (ver Tabela 5.10) na confecção da massa cerâmica (8:2), tais valores de LL e IP, tendem a se apresentar próximos aos valores referentes à argila magra, com uma pequena tendência de aumento na amostra 2.

5.5 Determinação da Composição Mineralógica por Difração de Raios-X

Para que fossem conhecidas as características mineralógicas do lodo da ETA Bolonha e da argila e com isso, os seus principais constituintes mineralógicos foram determinadas por difractometria de Raios-X as fases cristalinas presentes nas amostras de lodo e argila.

Os principais constituintes mineralógicos do lodo utilizado neste trabalho, determinados por DRXP, foram: caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e gibsitita ($Al(OH)_3$). A argila gorda apresentou na análise de DRXP as seguintes fases cristalinas: caulinita, quartzo e muscovita. A indexação dos picos basais nos difratogramas (figura 5.2 a 5.4) obtidos a partir dos materiais preparados foi realizada por comparação com o padrão do banco de dados do programa da Philips (*X-pert High Score*), utilizando os padrões difratométricos do JCPDS-

ICDD. Foi observado também que as duas amostras de lodo apresentaram predominância de fase amorfa.

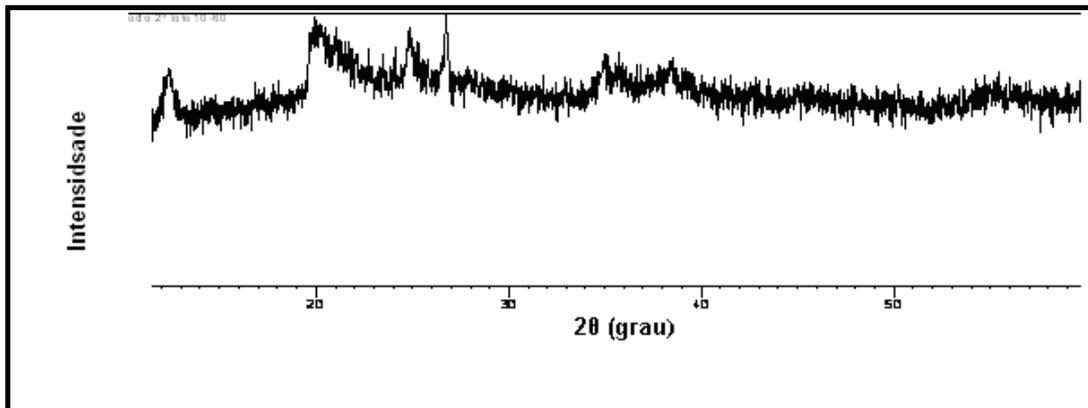


Figura 5.2: Difratoograma de Raios X - Lodo do Lote nº 03.

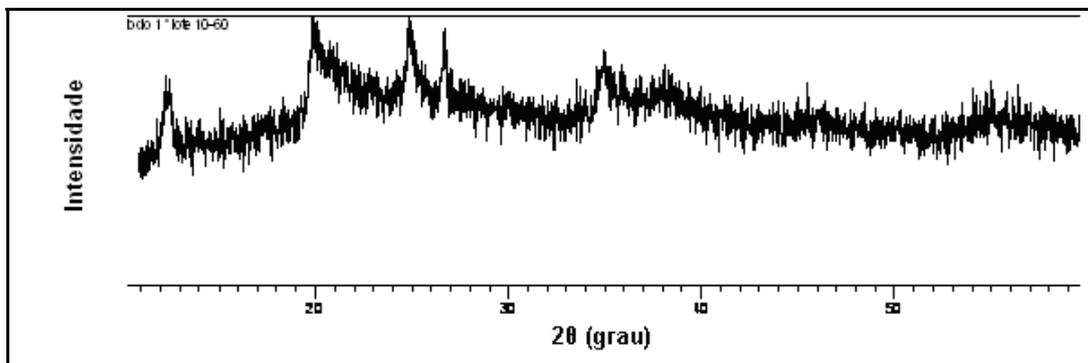


Figura 5.3: Difratoograma de Raios X - Lodo do Lote nº 04.

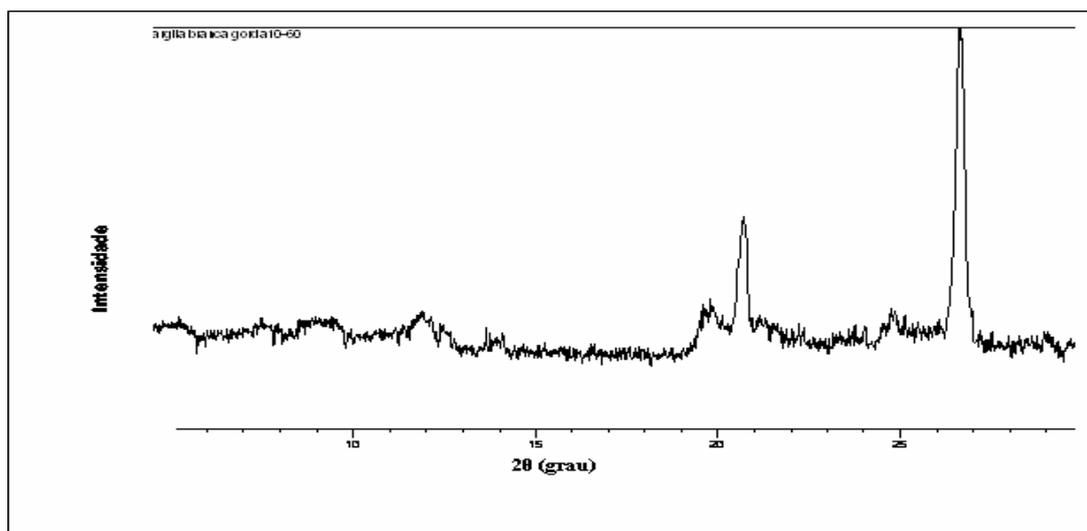


Figura 5.4: Difratoograma de Raios X - Argila Gorda.

As imagens da figura 5.5 e 5.6 foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento modelo LEO-1430. As condições de análises para imagens de elétrons secundários foram: corrente de feixe de elétrons de 90 μ A, voltagem de aceleração constante de 10 Kv e distância de trabalho de 12-15 mm. As amostras foram metalizadas com uma liga de ouro e platina. As imagens (micrografias) mostram que o lodo do lote nº 03 apresenta dimensões nanométricas ($< 0,2 \mu\text{m}$). Em geral são aglomerados muito similares a texturas observadas em argilo-minerais (Figura 5.5). Além disso, pode-se observar que a amostra apresentou a presença de diatomáceas (algas) do tipo *Aulacoseira Granulata* (Figura 5.6). Para a amostra do lodo do lote nº 03 foi realizada análise de EDS (Espectrômetro de Dispersão de Energia) que mostrou a presença de elevados teores de Al, Si, e Fe, além de pequenas proporções dos elementos Mg, K, Ca e Ti. Na Figura 5.7 é apresentada Imagem de MEV da amostra do lodo do lote nº 03 e espectro de EDS da região analisada.

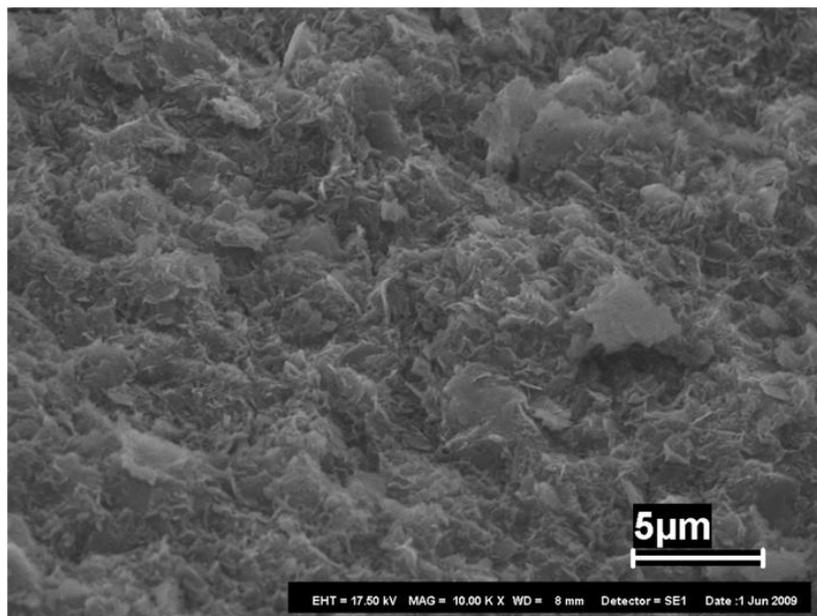


Figura 5.5: Imagem de MEV do lodo do lote nº 03.

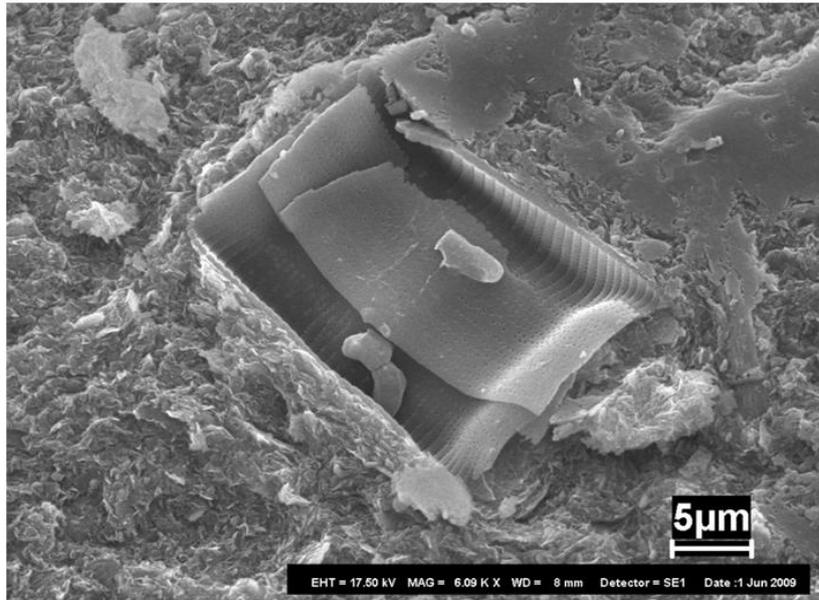


Figura 5.6: Diatomáceas presentes no lodo do lote nº 03.

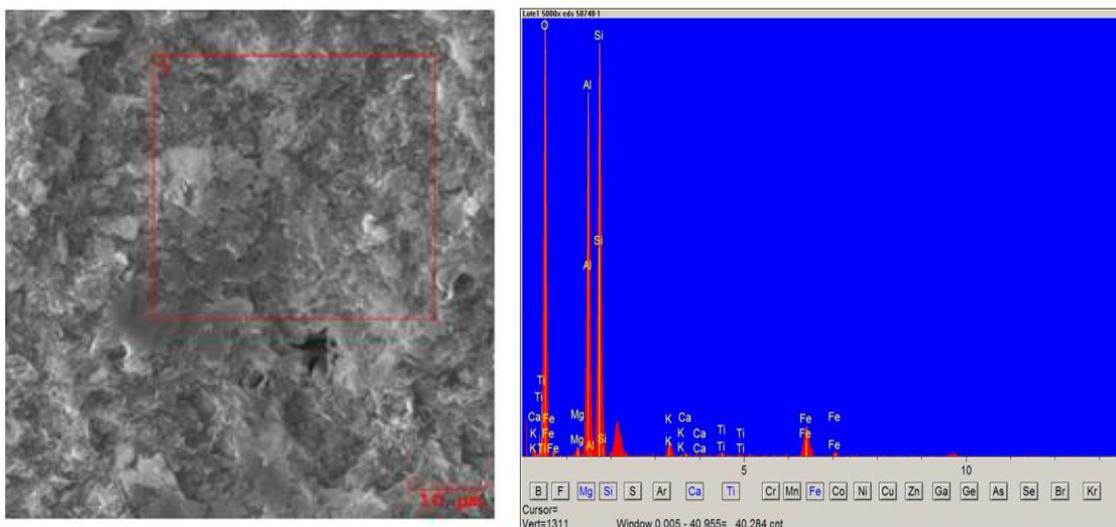


Figura 5.7: Amostra de lodo do lote nº 03- espectro de EDS da região indicada.

As imagens (micrografias) das amostras do lodo do lote nº 04 apresentaram, também, dimensões nanométricas ($< 0,2 \mu\text{m}$). Da mesma forma que no lodo do lote nº 03, estas, também apresentaram aglomerados similares a texturas observadas em argilominerais (Figura 5.8), sendo observada a presença de diatomáceas (algas) do tipo *Aulacoseira Granulata* (Figura 5.9). Para a amostra do lodo do lote nº 04 foi realizada análise de

EDS que mostrou a presença de elevados teores de Al, Si, e Fe, além de pequenas proporções dos elementos Mg, K, Ca e Ti. Na Figura 5.10 é apresentada Imagem de MEV da amostra do lodo do lote nº 04 e espectro de EDS das regiões analisadas.

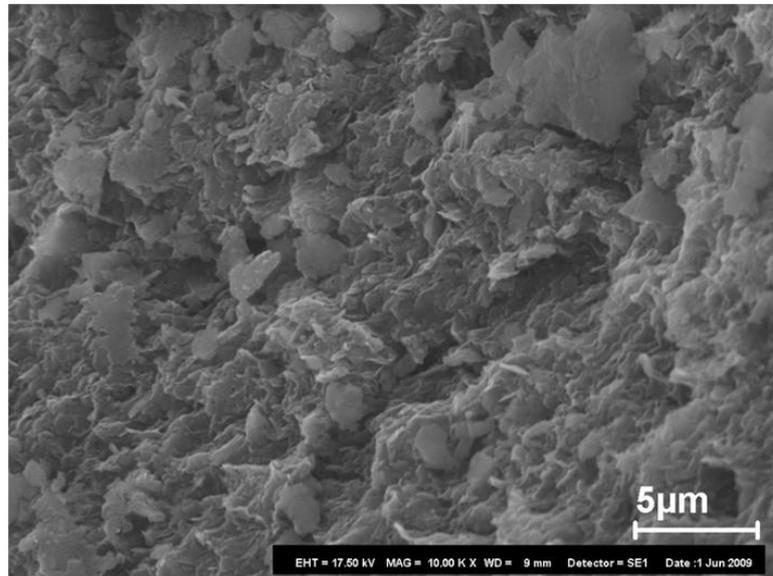


Figura 5.8: Imagem de MEV do lodo do lote nº 04

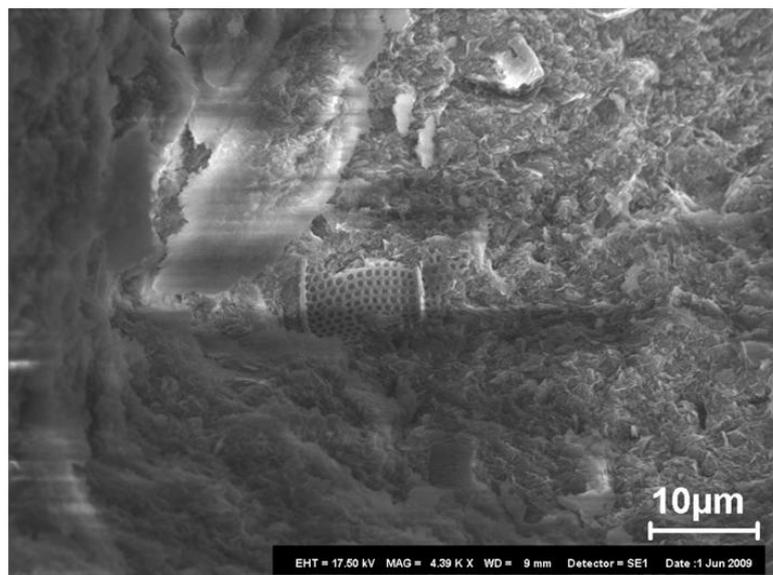


Figura 5.9: Diatomáceas presentes no lodo do lote nº 04.

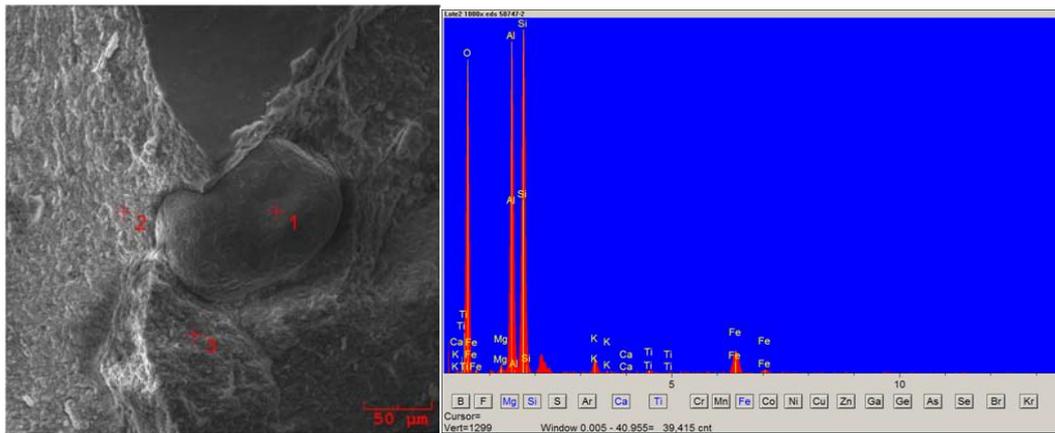


Figura 5.10: Imagem de MEV da amostra do lodo do lote nº 04 e espectro de EDS da região indicada.

As imagens (micrografias) das amostras da argila magra e gorda não apresentaram os *booklet* característicos das argilas. As amostras se apresentaram muito finas. Para as amostras da argila magra e gorda foram realizadas análises de EDS que mostraram a presença de elevados teores de Al e Si, além de pequenas proporções dos elementos Mg, K, Ca, Ti e Fe. Nas Figuras 5.11 e 5.12 são apresentadas imagens de MEV das amostras da argila magra e gorda e nas Figuras 5.13 e 5.14 são mostrados os espectros de EDS das regiões analisadas.

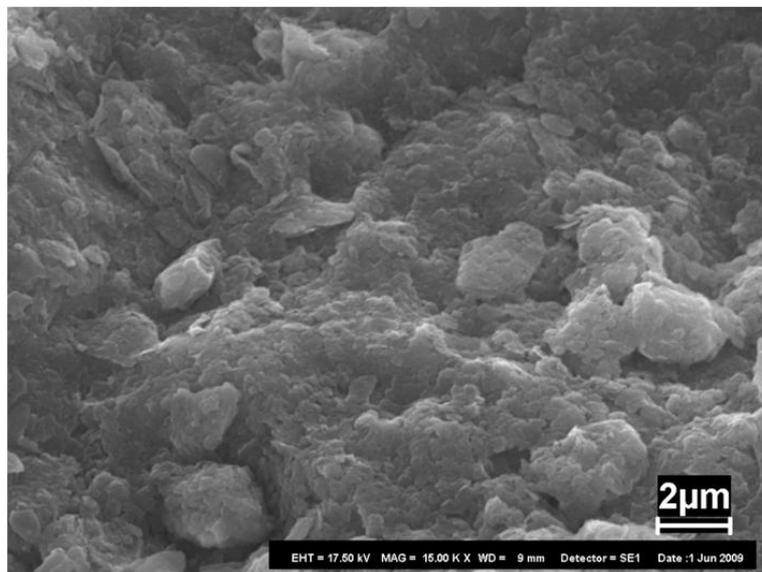


Figura 5.11: Imagem de MEV da argila magra.

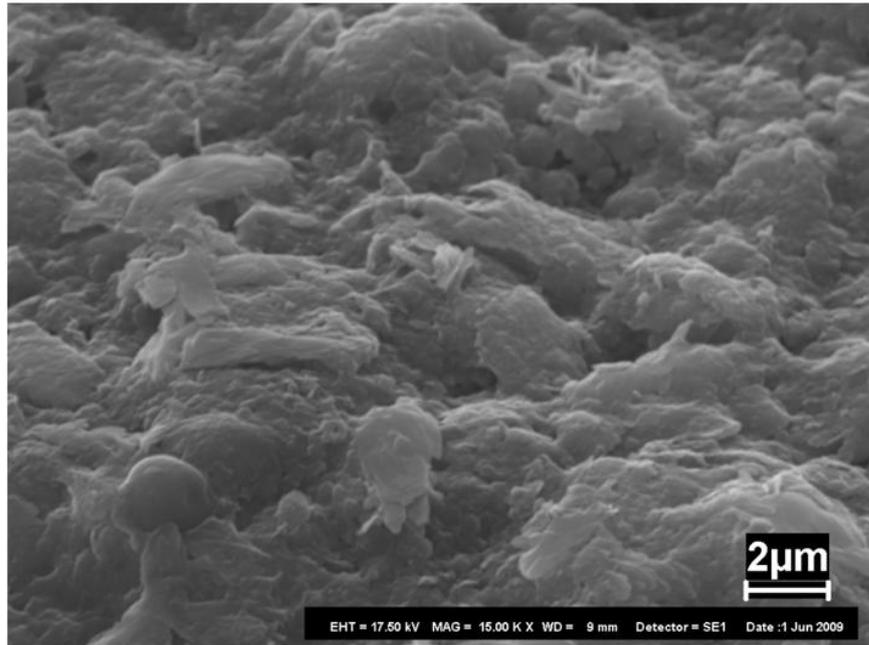


Figura 5.12: Imagem de MEV da argila gorda.

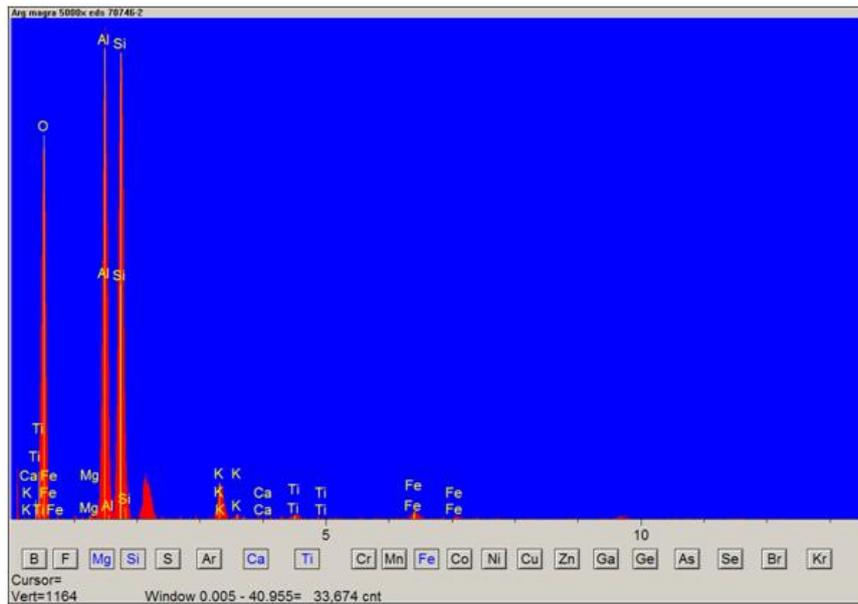


Figura 5.13: Espectros de EDS da amostra de argila magra

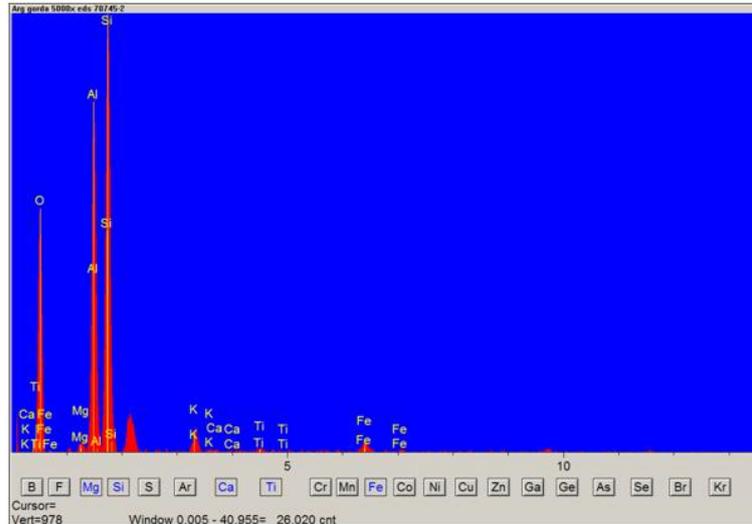


Figura 5.14: Espectro de EDS da amostra de argila gorda

5.6 Incorporação do Lodo da ETA Bolonha na Massa Cerâmica

5.6.1 Lote nº 03 (UDL1)

Foi necessária a adição (dosagem) de água no processo de homogeneização da massa cerâmica utilizada na fabricação dos tijolos. Os tijolos apresentaram aspectos estruturais adequados na linha de produção, pois visivelmente eles não sofreram deformações ao serem manuseados pelos operários da indústria.

5.6.1.1 Caracterização dos Tijolos - Lote nº 03

A etapa de caracterização foi realizada nos tijolos cerâmicos sem lodo (testemunho) e com acréscimo de lodo (10 e 12%), com o objetivo de verificar quais as influências que o lodo da ETA Bolonha teria nas propriedades mecânicas dos tijolos produzidos, assim como, as alterações na sua estrutura.

Segundo o Inmetro (Brasil, 2004) para um lote de 30 mil tijolos, a inspeção por medição direta deve ser realizada por dupla amostragem para 13 tijolos, devido a quantidade de tijolos produzidos no lote nº 03, para cada proporção de adição do lodo investigado não passar de 100 peças, optou-se

por coletar apenas 10 tijolos para amostragem, portanto, realizou-se a inspeção por medição direta para 10 tijolos, 6 foram utilizados para verificação da resistência à compressão e 4 para testes de absorção de água, para cada proporção estudada, mais o testemunho (sem adição do lodo).

Os resultados de desvio em relação ao esquadro e planeza, dimensões, resistências à compressão e inspeção visual são mostrados a seguir.

5.6.1.2 Dimensões dos Tijolos - Lote nº 03

As normas NBR 7171/1992 e NBR 8042/1992 foram utilizadas no processo de verificação das dimensões dos tijolos produzidos com e sem lodo. Na tabela 5.14 são apresentados os resultados obtidos na inspeção por medição direta.

De acordo com a NBR 7171/92, os tijolos cerâmicos para que sejam enquadrados na categoria de aprovados (Tipo 10cmx20cmx20cm) devem estar dentro das dimensões nominais de 90 mm largura (L), 190 mm de altura (H) e 190 mm de comprimento (C) com uma tolerância de ± 3 mm para todas as dimensões, caso não estejam dentro destas dimensões são considerados reprovados. Os tijolos cerâmicos do lote nº 03 com e sem incorporação de lodo não atenderam as especificações da NBR 7171/92 na questão das dimensões nominais de largura, altura e comprimento. As diferenças encontradas podem ser atribuídas ao corte dos tijolos que necessitam de ajustes no processo de fabricação. Dessa forma, enfatiza-se, aqui, a necessidade de controle de qualidade em indústrias cerâmicas do Brasil.

Tabela 5.14 Dimensões dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 03

LOTE Nº 03									
DIMENSÃO DOS TIJOLOS									
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo			Tijolo com 12% de Lodo			Tijolo-Testemunho		
	L (mm)	H (mm)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	C (mm)
1	105	202	172	105	202	172	100	195	186
2	107	202	180	107	202	180	103	200	185
3	106	202	192	106	202	192	103	188	185
4	105	201	191	105	201	191	100	195	186
5	105	203	188	105	203	188	102	200	186
6	105	201	190	105	201	190	102	200	185
7	104	201	194	104	201	194	101	195	185
8	105	200	190	105	200	190	101	196	185
9	105	200	190	105	200	190	102	197	186
10	105	200	193	105	200	193	101	195	185
NBR 7171/92 Tipo (10x20x20) cm	90±3	190±3	190±3	90±3	190±3	190±3	90±3	190±3	190±3
OBS:	Reprovado			Reprovado			Reprovado		

5.6.1.3 Esquadro e Planeza das Faces – Lote nº 03

Na tabela 5.15 são apresentados os resultados referentes ao esquadro e planeza das faces para os tijolos produzidos com e sem lodo, segundo a NBR 7171/92, onde observam-se que todas as amostras estão devidamente enquadradas, portanto consideradas aprovadas conforme tal critério.

Tabela 5.15: Esquadro e planeza das faces dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 03

LOTE Nº 03						
ESQUADRO E PLANEZA DAS FACES DOS TIJOLOS						
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo		Tijolo com 12% de Lodo		Tijolo-Testemunho	
	Esquadro	Planeza	Esquadro	Planeza	Esquadro	Planeza
1	A	A	NA	A	A	A
2	NA	A	A	A	A	A
3	A	A	A	NA	NA	A
4	A	A	A	A	A	A
5	A	A	A	A	A	A
6	A	A	A	A	A	A
7	A	A	A	A	A	A
8	A	A	A	A	A	A
9	A	A	A	A	A	A
10	A	A	A	NA	A	A
Total NA	1	0	1	2	1	0
Conclusão	Esquadro e Planeza aprovados		Esquadro e Planeza aprovados		Esquadro e Planeza aprovados	

A-Aprovado: Indica que o desvio em relação ao esquadro ou flecha foi inferior ou igual a 3 mm.

NA-Não Aprovado: Indica que o desvio em relação ao esquadro ou flecha foi superior a 3 mm.

De acordo com a NBR 7171/92 que estabelece os limites de desvio em relação ao esquadro e planeza das faces para que os tijolos cerâmicos sejam aprovados, tem como tolerância máxima de fabricação que o desvio em relação ao esquadro e planeza das faces devam ser de 3 mm.

5.6.1.4 Absorção de Água – Lote nº03

Na tabela 5.16 são apresentados os valores encontrados para os tijolos confeccionados sem e com adição de lodo (10% e 12%) referente aos testes de absorção de água.

Tabela 5.16: Absorção de água dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 03

LOTE Nº 03						
ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA OS TIJOLOS						
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo		Tijolo com 12% de Lodo		Tijolo-Testemunho	
	Absorção	Adequado	Absorção	Adequado	Absorção	Adequado
1			14,84	SIM		
2			15,48	SIM		
3	16,12	SIM				
4	15,55	SIM				
5			15,65	SIM	12,03	SIM
6	16,04	SIM			12,69	SIM
7	16,16	SIM	15,60	SIM		
8						
9					12,65	SIM
10					11,88	SIM
média	15,97		15,39		12,31	

NBR 7171/92: Absorção de Água para os Tijolos de 8 à 25%.

Os tijolos com e sem lodo foram todos aprovados nos testes de absorção de acordo com a NBR 7171/92, conforme tabela 5.16 e observado no gráfico da figura 5.15.

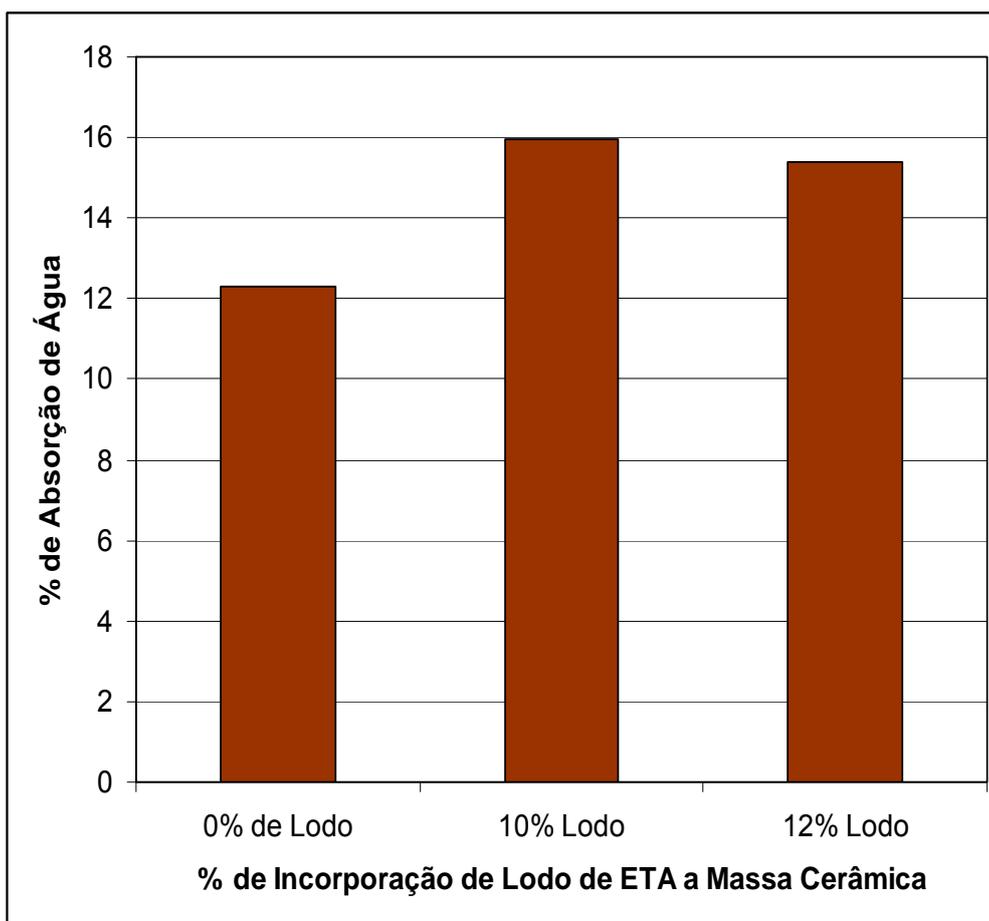


Figura 5.15: Valores encontrados de absorção de água para os tijolos cerâmicos com 0% de lodo (tijolo testemunho), 10% e 12% de lodo proveniente do lote nº 03 da ETA Bolonha.

5.6.1.5 - Resistência à Compressão – Lote nº 03

Nas tabelas 5.17 estão os resultados referentes a resistência à compressão dos tijolos sem e com adição de lodo. A classe a que se destina cada amostra de tijolo cerâmico foi determinada pela norma da ABNT NBR 7171/92. Os dados dos ensaios de resistência encontram-se no anexo B.

Tabela 5.17: Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo – lote nº 03

LOTE nº 03				
Resistência a Compressão para os Tijolos - Testemunho				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
1	186,00	7506	3,96	25
2	190,55	6003	3,09	25
3	190,55	5010	2,58	25
4	186,00	9345	4,93	25
7	186,85	3303	1,73	15
8	186,85	6026	3,16	25
Média:			3,24	
LOTE nº 03				
Resistência a Compressão para os Tijolos com 10% de Lodo				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
1	180,60	4799	2,61	25
2	192,60	3989	2,03	15
5	197,40	4041	2,01	15
8	199,50	4002	1,97	15
9	199,50	3609	1,77	15
10	202,65	4384	2,12	15
Média:			2,085	
LOTE nº 03				
Resistência a Compressão para os Tijolos com 12% de Lodo				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
3	199,50	3926	1,93	15
4	201,60	4596	2,28	15
6	199,50	4315	2,12	15
8	202,65	2914	1,41	10
9	202,80	4664	2,26	15
10	204,75	5287	2,53	25
Média:			2,088	

OBS: De acordo com a NBR 7171/92 a pressão mínima deve ser de 1 MPa

A adição de lodo à massa cerâmica na proporção de 10% diminuiu a resistência dos tijolos, embora os valores obtidos estejam dentro dos limites

estipulados pela norma NBR 6461/83, entretanto, ainda se encontram abaixo dos valores encontrados para os tijolos testemunho.

O gráfico da figura 5.16 apresenta as variações da resistência do tijolo cerâmico com lodo em relação ao tijolo-testemunho. Nota-se que não há variação praticamente na resistência à compressão do tijolo de 10% de lodo em relação ao tijolo produzido com 12% de lodo da ETA Bolonha. Vale lembrar que não havia lodo suficiente para a produção de tijolos com outras proporções, no entanto, os tijolos produzidos estão em conformidade com as normas e classificam-se como adequados ao uso.

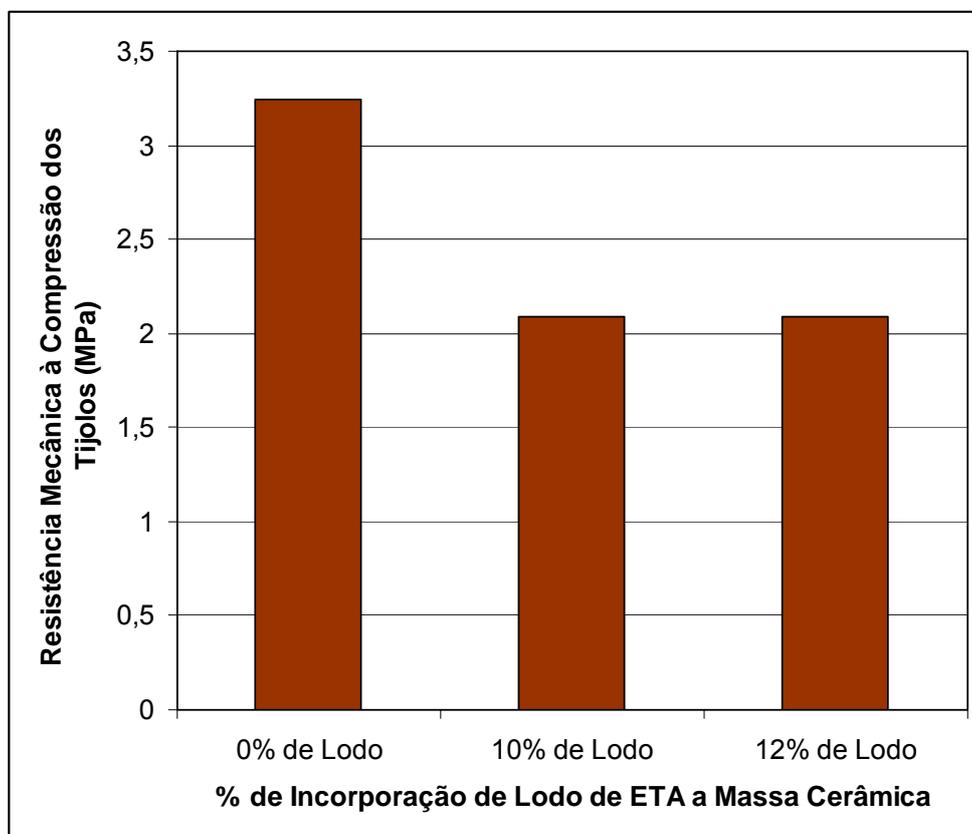


Figura 5.16: Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo a massa cerâmica.

5.6.1.6 Inspeção Visual – Lote nº 03

Todos os tijolos cerâmicos com e sem adição de lodo que foram avaliados visualmente passaram nos testes de acordo com as condições estabelecidas na NBR 7171/92, quanto à uniformidade do processo de queima, a cor aparente, a presença ou ausência de trincas, arestas e cantos e conformação dos furos.

5.6.2 Lote nº 04 (UDL2)

A massa cerâmica produzida com adição do lodo do lote nº 04 estava mais plástica do que a do lote nº 03. No processo de fabricação dos tijolos foi necessária a interrupção da dosagem de água na homogeneização da massa cerâmica. Ainda assim, a massa cerâmica apresentou uma umidade acima do desejado. Durante a fabricação dos tijolos cerâmicos, estes, quando adicionados 20% de lodo a massa cerâmica, não conseguiam ser manuseados no vagonete. Deformavam e caíam ao chão assim que a máquina de corte passava. De forma geral, a maioria dos tijolos extrusados na proporção de 10% e 12% estava de acordo com a aparência dos tijolos normalmente fabricados.

5.6.2.1 Caracterização dos Tijolos - Lote nº 04

Devido a quantidade de tijolos produzidos no lote nº 04 para cada proporção de adição do lodo investigada não passar de 120 peças, optou-se por coletar apenas 12 tijolos para amostragem. Portanto, realizou-se a inspeção por medição direta para 12 tijolos, sendo que 7 foram utilizados para verificação da resistência à compressão e 5 para testes de absorção de água, para cada proporção estudada, mais o testemunho (tijolo sem adição do lodo). Os resultados de desvio em relação ao esquadro e planeza, dimensões e resistências à compressão e inspeção visual são mostrados a seguir para os tijolos produzidos no lote nº 04, para cada proporção de adição de lodo investigada. Ressalta-se que o total da amostragem supera

em muito as recomendações da NBR 7171/92 que para um lote de 30 mil tijolos a inspeção por medição direta deve ser realizada por dupla amostragem para no mínimo 13 tijolos.

5.6.2.2 Dimensões dos Tijolos - Lote nº 04

As normas NBR 7171/92 e NBR 8042/92 foram utilizadas no processo de verificação das dimensões dos tijolos produzidos com e sem lodo. Na tabela 5.19, são apresentados os resultados obtidos na inspeção por medição direta.

Como já frisado anteriormente, as dimensões dos tijolos cerâmicos devem estar dentro dos limites dimensionais de largura, altura e comprimento estabelecidos pela NBR 7171/92 para a fabricação de tijolos Tipo 10cmx20xcmx20cm com uma tolerância de ± 3 mm. A tabela 5.18 compara uma amostragem de 12 tijolos que correspondem a 10% do total de tijolos fabricados com os padrões da NBR 7171/92. Constatou-se que todos os tijolos foram reprovados (0%, 10% e 12% de lodo) em relação às especificações da referida norma.

Estes resultados podem ser atribuídos ao erro no corte dos tijolos no processo de fabricação. Todavia, pode-se dizer que o acréscimo de lodo aos tijolos nas proporções investigadas não provocou alterações significativas nas dimensões dos materiais analisados. Estes resultados não estão de acordo com as normas na questão de inspeção por medição direta e podem ser corrigidos através de ajustes na máquina que realiza o corte dos tijolos.

Tabela 5.18: Dimensões dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 04

LOTE Nº 04									
DIMENSÕES DOS TIJOLOS									
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo			Tijolo com 12% de Lodo			Tijolo-Testemunho		
	L (mm)	H (mm)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	C (mm)
1	105	204	191	105	201	191	104	199	188
2	105	201	190	105	201	189	103	197	184
3	101	201	190	105	201	191	105	197	184
4	105	201	191	105	202	191	104	193	186
5	105	201	191	105	201	190	103	196	185
6	105	201	190	105	202	191	103	197	185
7	105	201	190	105	201	189	103	198	188
8	105	201	190	105	201	190	103	198	190
9	105	201	190	105	201	192	102	197	186
10	105	201	189	105	201	190	103	195	186
11	105	201	190	104	200	190	104	196	185
12	105	201	190	105	200	190	103	198	186
NBR 7171/92 Tipo (10x20x20) cm	90±3	190±3	190±3	90±3	190±3	190±3	90±3	190±3	190±3
OBS:	Reprovado em L e H			Reprovado em L e H			Reprovado em L, H e C		

5.6.2.3 Esquadro e Planeza das Faces – Lote nº 04

Na tabela 5.19 são apresentados os resultados referentes ao esquadro e planeza das faces para os tijolos produzidos com e sem lodo, seguindo as recomendações da NBR 7171/92.

Tabela 5.19: Esquadro e Planeza das faces dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 04

LOTE Nº 04						
ESQUADRO E PLANEZA DAS FACES DOS TIJOLOS						
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo		Tijolo com 12% de Lodo		Tijolo-Testemunho	
	Esquadro	Planeza	Esquadro	Planeza	Esquadro	Planeza
1	A	A	A	A	A	A
2	A	A	NA	A	A	A
3	A	A	A	A	NA	A
4	A	A	A	A	A	A
5	A	A	A	A	A	A
6	A	A	A	A	A	A
7	A	A	NA	A	A	A
8	A	A	A	A	A	A
9	A	A	A	A	A	A
10	A	A	A	A	A	A
11	A	A	A	A	A	A
12	NA	A	A	A	A	A
Total NA	1	0	2	0	1	0
Conclusão	Esquadro e Planeza aprovados		Esquadro e Planeza aprovados		Esquadro e Planeza aprovados	

A -Aprovado: Indica que o desvio em relação ao esquadro ou flecha foi inferior ou igual a 3 mm.

NA - Não Aprovado: Indica que o desvio em relação ao esquadro ou flecha foi superior a 3 mm.

De acordo com a NBR 7171/92 que estabelece os limites de desvio em relação ao esquadro e planeza das faces para que os tijolos cerâmicos sejam aprovados, tem como tolerância máxima de fabricação que o desvio em relação ao esquadro e planeza das faces devam ser de 3 mm. Analisando os resultados observa-se que todos os tijolos cerâmicos produzidos com e sem lodo foram aprovados para desvio em relação ao esquadro e planeza das faces.

5.6.2.4 Absorção de Água – Lote nº 04

Na tabela 5.20 são apresentados os valores encontrados para os tijolos confeccionados sem adição de lodo e com adição de lodo (10% e 12%) referente aos testes de absorção de água.

Tabela 5.20: Absorção de água dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 04

LOTE Nº 04						
ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA OS TIJOLOS						
Tijolo	Tijolo com 10% de Lodo		Tijolo com 12% de Lodo		Tijolo-Testemunho	
	Absorção	Adequado	Absorção	Adequado	Absorção	Adequado
1	-	-	17,45	SIM	12,76	SIM
2	-	-	-	-		
3	17,56	SIM	-	-		
4	-	-	17,29	SIM	11,34	SIM
5	-	-	-	-		
6	-	-	-	-		
7	-	-	-	-		
8	-	-	18,35	SIM	12,21	SIM
9	17,59	SIM	17,50	SIM	11,30	SIM
10	18,60	SIM	-	-		
11	18,89	SIM	-	-		
12	16,93	SIM	17,65	SIM	10,58	SIM
Média	17,91		17,65		11,64	

NBR 7171/92: Absorção de Água para os Tijolos de 8 à 25%.

Os tijolos cerâmicos produzidos com incorporação de lodo de 10% e 12% apresentaram valores de absorção acima dos encontrados para os tijolos testemunho, entretanto, todos os tijolos atenderam as especificações da NBR 7171/92.

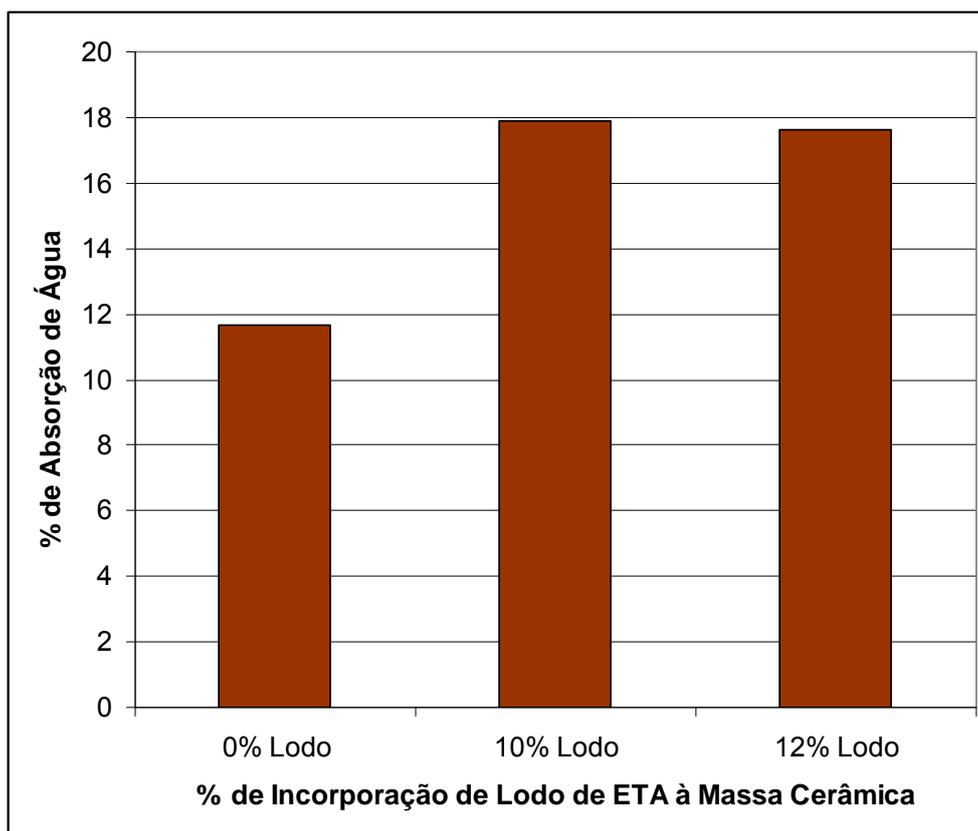


Figura 5.17: Valores encontrados de absorção de água para os tijolos cerâmicos com 0% de lodo (tijolo testemunho), 10% e 12% de lodo proveniente do lote nº 04 da ETA Bolonha.

5.6.2.5 Resistência à Compressão – Lote nº 04

Na tabela 5.21 são apresentados os resultados referentes à resistência à compressão dos tijolos sem e com adição de lodo. A norma NBR 7171/92 foi utilizada no processo de verificação da resistência à compressão dos referidos tijolos. Como já comentado anteriormente, as medições foram realizadas através de prensa hidráulica MUE 100, marca EMIC. Observou-se que, com a adição de lodo, houve uma perda da resistência mecânica em relação ao tijolo testemunho, mas, analisando as proporções de 10% e 12% não houve variação na resistência média dos tijolos (figura 5.18), fato este que pode ser devido ao lodo da ETA Bolonha ter características de material plástico. Ressalta-se que os valores de resistência encontrados estão dentro dos limites aceitáveis da referida norma. Os dados dos ensaios de resistência estão no anexo B.

Tabela 5.21: Resistência à compressão dos tijolos com e sem adição de lodo – Lote nº 04

LOTE nº 04				
Resistência a Compressão para os Tijolos - Testemunho				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
2	189,52	6401	3,31	25
3	193,20	6566	3,33	25
5	190,55	7077	3,64	25
6	190,55	6553	3,37	25
7	193,64	6665	3,38	25
10	191,58	7239	3,71	25
11	192,40	6926	3,53	25
Média:	3,47			
LOTE nº 04				
Resistência a Compressão para os Tijolos com 10% de Lodo				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
2	199,50	4476	2,20	15
3	191,00	4104	2,10	15
5	200,55	4628	2,26	15
6	199,50	4091	2,01	15
7	199,50	4612	2,27	15
10	198,45	4259	2,10	15
11	199,50	3797	1,87	15
Média:	2,11			
LOTE nº 04				
Resistência a Compressão para os Tijolos com 12% de Lodo				
Tijolo	Área (cm²)	Força Max (Kgf)	Pressão (MPa)	Classe NBR 7171/92
1	200,55	4252	2,08	15
2	198,45	4526	2,24	15
4	200,55	4262	2,08	15
5	199,50	3998	1,97	15
6	200,55	5320	2,60	25
7	198,45	4677	2,31	15
8	199,50	3191	1,57	15
Média:	2,12			

OBS: De acordo com a NBR 7171/92 a pressão mínima deve ser de 1 MPa

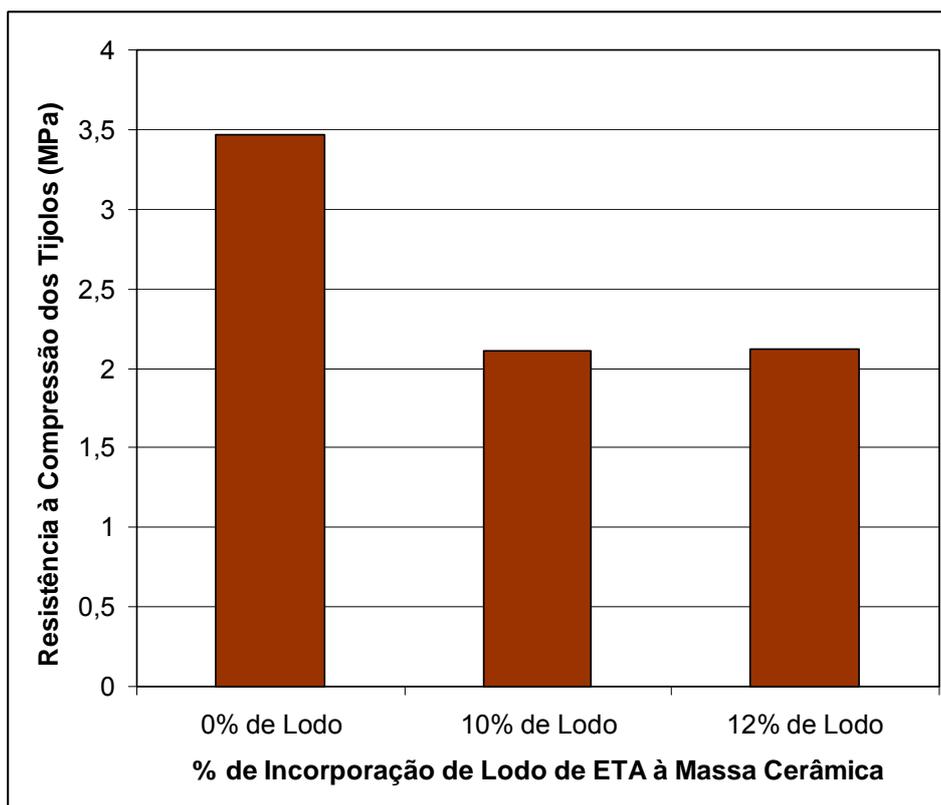


Figura 5.18: Resistência à Compressão dos tijolos com e sem adição de lodo a massa cerâmica.

5.6.2.6 Inspeção Visual – Lote nº 04

Todos os tijolos cerâmicos fabricados com e sem adição de lodo e que foram avaliados visualmente passaram nos testes, quanto à uniformidade do processo de queima, a cor aparente, a presença ou ausência de trincas, arestas e cantos e conformação dos furos segundo a NBR 7171/92.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de verificação dimensional, esquadro e planeza das faces, absorção d'água, resistência a compressão e inspeção visual realizada nos tijolos cerâmicos com adição de lodo de ETA, objeto de estudo deste trabalho, concluiu-se que os mesmos classificam-se como tijolos de vedação especial (classe 15), enquanto que o tijolo testemunho classifica-se como de vedação especial (classe 25) de acordo com a norma da ABNT a NBR 7171/92.

6. CONCLUSÃO

Apresentam-se a seguir as conclusões mais relevantes encontradas neste trabalho:

- Considera-se que os leitos de drenagem que foram implantadas e operacionalizadas na ETA Bolonha são eficientes no processo de desaguamento do lodo de decantador. Os teores de sólidos da massa seca do lodo encontrado na UDL1 foi de 27,9% e na UDL2 de 23,4%.
- O lodo retirado da válvula de fundo do decantador nº 04 durante o processo de lavagem, apresentou alto teor de sólidos totais (27,9%) em relação ao lodo coletado diretamente do fundo (23,4%). A consistência do lodo contido na UDL2 foi bem melhor e apresentou, após desaguamento, um volume superior ao obtido na UDL1, respectivamente, 280 Kg e 80 Kg.
- A massa seca do lodo da ETA-Bolonha apresentou um teor de carbono orgânico entre 2,35 e 2,45%.
- As caracterizações mineralógicas das amostras do lodo da ETA Bolonha definiram como principais constituintes a caulinita e a gibsita. A argila gorda apresentou a caulinita, o quartzo e muscovita em sua composição mineralógica, com predominância de caulinita. O lodo e a argila gorda podem ser caracterizados como materiais plásticos.
- Os ensaios realizados de caracterização física e mineralógica das matérias-primas cerâmicas e do lodo da ETA Bolonha possibilitaram verificar a compatibilidade entre os materiais, o que ocasionou a confecção de tijolos cerâmicos de qualidade adequada com as especificações das normas técnicas da ABNT.
- O coagulante utilizado na ETA Bolonha (Cloreto de Polialumínio) ocasionou uma coloração mais clara nos tijolos

com incorporação de lodo em relação ao tijolo testemunho, enquanto em outros trabalhos realizados no país com o coagulante de sulfato ferroso ou cloreto férrico, observa-se que a adição de lodo provoca uma coloração mais avermelhada nos tijolos.

- Realizar manutenção periódica das máquinas envolvidas no processo de fabricação dos tijolos cerâmicos, principalmente durante o corte, pois as amostras ensaiadas não passaram nos testes de verificação das dimensões quando comparadas aos recomendados pelas normas da ABNT.
- Ao incorporar 20% de lodo à massa cerâmica não foi possível a moldagem dos tijolos cerâmicos, devido o lodo ter apresentado características de um material plástico (rico em argilo minerais com leve registro de silte).

Resolver a questão da disposição final do lodo gerados em ETA's de forma a reduzir os impactos gerados ao meio ambiente não é uma tarefa fácil, mesmo à luz de novas tecnologias que foram desenvolvidas ao longo do tempo, desde o processo de retirada do lodo do decantador à fabricação dos tijolos, novas metodologias devem ser desenvolvidas com o objetivo de otimizar todo o processo. Sabe-se que, pelos resultados encontrados neste trabalho, e de outros na literatura, é possível a sua incorporação na massa cerâmica em até 12% de lodo em escala real. Este percentual pode ser considerado como satisfatório e usá-lo pode reduzir substancialmente sua presença nos mananciais. A construção civil é uma alternativa promissora ao aproveitamento do lodo de ETA's utilizando tijolos fabricados com esse resíduo. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mecânica e absorção d'água dos tijolos cerâmicos que incorporaram o lodo mostraram-se dentro dos limites aceitáveis da NBR 7171/92.

7. RECOMENDAÇÕES DESTE TRABALHO

Recomenda-se que sejam aplicados os seguintes procedimentos para pesquisas futuras:

- ✓ Utilizar a metodologia proposta neste trabalho para outras ETA's na região a fim de obter novos parâmetros de comparação.
- ✓ Caracterizar o lodo de ETA Bolonha ao longo de um ano ou mais (ciclo completo), para entender melhor seu comportamento e obter um lodo com melhores características para a indústria cerâmica
- ✓ Estudar a incorporação do lodo de ETA's à outros produtos cerâmicos
- ✓ Avaliar a viabilidade ambiental, ou seja, se os produtos fabricados com lodo de ETA's produzem poluentes no processo de queima dos tijolos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ANDRADE**, Patrícia de Souza, Avaliação do Impacto Ambiental da Utilização de Resíduos de Estações de Tratamento de Água em Indústrias de Cerâmica Vermelha: Estudo de Caso, Di Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2005.
2. **BABATUNDE** A. O. and **ZHAO**, Y. Q., Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses., Critical Reviews in Environmental Science and Technology, vol. 37, p. 129-164, 2007.
3. **BAUER**, L. A. F., Materiais de Construção. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.
4. **BARROSO**. M. M., Influência das Micro e Macro propriedades dos Lodos de Estações de Tratamento de Águas no Desaguamento por Leito de Drenagem. Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, campus da USP, São Carlos, SP. 2007.
5. **BRASIL**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6461, Bloco cerâmico para alvenaria: verificação da resistência à compressão; São Paulo: ABNT, 1983.
6. **BRASIL**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7171. Bloco cerâmico para alvenaria: especificação, São Paulo: ABNT, 1992
7. **BRASIL**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8042 (1992) - Bloco cerâmico para alvenaria: formas e dimensões, São Paulo: ABNT, 1992

8. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8043. Bloco cerâmico para alvenaria: determinação de área líquida. Rio de Janeiro: ABNT.1993
9. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8947 - Telha cerâmica: determinação da massa e de absorção de água. São Paulo: ABNT. 1985
10. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5734. Solo: Peneiras para ensaio – especificação; Rio de Janeiro: ABNT, 1984
11. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459. Solo: determinação do limite de liquidez; Rio de Janeiro: ABNT, 1984
12. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502. Rochas e solos: Terminologia. São Paulo: ABNT. 1995.
13. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180. Solo, determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984
14. **BRASIL.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181. Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
15. **CANTO, J. ARMENTER, J. L.; CRISTIÁ, J.; ARTEAGA, F.; CREMADES, L.V.; CUSIDÓ, J. A.** Raw Material Production for Ceramic Lining industry from Drinking Water Treatment Sludges: Case of Sant Joan Despi (Barcelona) Plant In: Mangement of Wastes from Drinking Water Treatment. London, 2002. Proceedings. London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002.
16. **CAPUTO, Homero Pinto,** “Mecânica dos Solos e suas Aplicações Fundamentais”, 4ª ed. Livros Técnicos e Científicos, São Paulo.

17. **CARVALHO**, João Batista Queiroz de, “Fundamentos da Mecânica dos Solos”, Ed. Marconi, Campina Grande, Paraíba, 1997.
18. **COSANPA**, Companhia de Saneamento do Pará, Disponível em: <<http://www.consanpa.pa.gov.br>> acesso em 19 de agosto de 2008.
19. **CORDEIRO**, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de água. São Paulo. Cap 1, p. 03, 1999.
20. **COSIN**, S., Kozevitch, F. J., Moreno. M. T. Souza santos, P. F. R. Valenzuela Diaz. Estudos Visando a Incorporação de Lodo de ETA em Massas de Cerâmica Vermelha, Anais do 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 2002.
21. **CORNWELL**, D. A; Bishop, M. M; Gould, R. G.; Vandermeijden, C. Water treatment plant waste management. Journal of American Water Works Associations Research Foundation, USA, 1987.
22. **DAS**, Braja, M. “Fundamentos de Engenharia Geotécnica”, 6ª ed., Thomson Learning, São Paulo, 2007
23. **DIAS**, L. M. Batalione, G., Morais, F. U., Sobrinho, J. F., Ribeiro, M. C, Lisboa, M. S. Alternativa de Destinação Final do lodo de Estação de tratamento de Água – Fabricação de Blocos Cerâmicos. 2008
24. **DOE**, P. W. Water treatment Plant Waste Management. In: PONTIUS. F. W., Ed. Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. 4 ed. New York: American Water Works Association, McGraw-Hill, 1990

25. **FIGUEIREDO**, F. F. e Nuvolari, A. Uso do lodo de Estação de Tratamento de Água em Tijolos Cerâmicos Maciços. In: Anais (em CD-ROOM) do I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em resíduos e Desenvolvimento Sustentável, SC. 2004.
26. **FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE**, MINISTÉRIO DA SAÚDE, Manual de Saneamento, Brasília. 3ª Ed., 1999.
27. **LOPES**, J. L & **ACCHAR**, W. “Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas de Blocos Sinterizados à Lenha e a Gás Natural”, 17º CBEC – MAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
28. **MACHADO**, L. G. T. Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Gerenciamento de Resíduos – O caso da ETA- Bolonha., Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, 2003.
29. **MAGALHÃES**, P. F. Estudo de Viabilidade de Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água na Produção de Cerâmica Vermelha, dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências dos Materiais e metalurgia, Rio de Janeiro, 2003.
30. **MORITA**, D. M. Sampaio, A. O., Miki, M. K., David, A. C.. Incorporação de Lodos de Estações de tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. In: Simpósio luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 10, 2002. Braga. Anais Eletrônico. Braga. APESB, 2002, p 1-15.
31. **NOVAES**, R. M. , Viabilidade Técnica da Incorporação de Lodos das Estações de Tratamento de Água do Município de Campinas em

Blocos Cerâmicos. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.

32. **NUNES**, M.S.; **SARTORI**, H. J.F. “Caracterização Geotécnica de Lodos Provenientes de Estações de Tratamento de Água e de Esgotos Sanitários. In: Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19. Foz do Iguaçu, 1997. Anais. Rio de Janeiro: ABES, 1997.
33. **OLIVEIRA**, A. P. N., **MONTEDO**, O.R.K., **PIZETE**, J., **CASAGRANDE**, M., “ Matérias-Primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre o produto final. Centro de Tecnologia em Materiais.Criciúma, 2004.
34. **PETRUCCI**, Eladio. G. R. “ Materiais de Construção”, 12 ed. Editora Globo, 2ª reimpressão, São Paulo.
35. **PINTO**, Carlos de Sousa, “ Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas”, São Paulo, Oficina de Textos, 2000.
36. **REALI**, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETA’s.In: Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água, Marco Antônio Penalva Reali (coord.), Rio de Janeiro, ABES, pp 21-39.
37. **SILVA**, M. R., “Materiais de Construção”, 2ª edição revisada, PINI, 1991, São Paulo.
38. **TALLINI. JUNIOR**, V. M, **MYMRINE**, V., **RIBEIRO**, R. A. C, **PONTE**, H. A. Utilização de Lodo de ETA no Desenvolvimento de Novos Compostos Cerâmicos. 17º CBEC-Mat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, nov. 2006.

39. **TEIXEIRA**, S. R., **SOUZA**, S. A de, **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. Revista Cerâmica vol. 52, 2006 p 215-220.
40. **UENO**, O. K.; **LEITE**, V. M. B.; **FURUKAWA**, P. M. S.; **FILHO**, J. L., Estudo de Viabilidade Técnica de Incorporação do Lodo Proveniente do Processo de Tratamento de Água para Abastecimento na Confecção de Produtos de Cerâmica Vermelha, 2005. Apresentação de trabalho.
41. **VARGAS**, Milton, "Introdução à Mecânica dos Solos", Ed. MacGraw-Hill do Brasil, EDUSP, 1977, São Paulo.

ANEXO A
Metodologia para Caracterização Física das Amostras
das Argilas, Lodo e da Mistura Lodo/Argila.

ENSAIO 1 -PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO

1 - Objetivo

Estabelecer um procedimento padrão para preparação de amostras de solos para a realização nos seguintes ensaios:

- a) Análise granulométrica: peneiramento e sedimentação;
- b) Limites de liquidez e plasticidade;
- c) Densidade dos grãos de um solo;
- d) Determinação da umidade higroscópica de um solo.

2 – Equipamentos

- a) Peneiras de # 2,0 mm e de # 0,42 mm, de acordo com especificação da ABNT EB - 22R;
- b) Balanças com capacidade de 5 kg e 1 kg, com precisão respectivamente de 5 g e 0,01 g;
- c) Almofariz, com capacidade para 5 kg de solo, e Mão-de-gral recoberta de borracha;
- d) Tabuleiros de chapa de ferro galvanizado;
- e) Quarteador;
- f) Estufa

3 - Operações Iniciais

- a) Espalhar a amostra de solo recebida do campo nos tabuleiros descritos nos item 2.d;
- b) Desagregar completamente os torrões de solo com a mão-de-gral recoberta de borracha, evitando-se a redução do diâmetro ou quebra de grãos;
- c) Através do repartidor de amostras ou pelo quarteamento, homogeneizar o solo até obter-se uma amostra representativa para a realização dos ensaios necessários. Cerca de 2.000 g para solos arenosos e 1.500 g no caso de solos argilosos;
- d) O peso da amostra representativa, obtido de acordo com o item 2..c, passa a ser considerado como sendo o peso da amostra total seca ao ar;
- e) Passar esta amostra seca ao ar na peneira de # 2,0 mm. Tomar o cuidado de assegurar a retenção apenas dos grãos maiores do que a abertura da malha desta peneira.

4 - Preparação das Amostras

4.1 - Para análise granulométrica com sedimentação, umidade higroscópica e densidade de solos.

a) A fração da amostra retida na peneira # 2,0 mm será lavada nesta peneira, de modo a eliminar o material fino aderente às partículas de diâmetro maiores que 2,0 mm, com posterior secagem em estufa a 105^oC - 110^oC, até atingir constância no peso (aproximadamente por 24 hs). Este material seco servirá para análise granulométrica dos grãos maiores que 2,0 mm (n^o 10).

b) Do material seco ao ar que passou na peneira n^o 10 (# 2,0 mm) separa-se:

b.1) Aproximadamente 50 g para determinação da umidade higroscópica;

b.2) Aproximadamente 100 g para análise granulométrica das frações da amostra menores que 2,0 mm;

b.3) Aproximadamente 100 g para o ensaio de determinação da densidade dos grãos sólidos.

4.2 - Para determinação dos limites de plasticidade, de liquidez e fator de contração

a) Passa-se a fração restante da amostra que passou na peneira n^o 10 (# 2,0 mm) na peneira 0,42 mm;

b) Do material que passou na peneira de 0,42 mm separa-se aproximadamente 200 g de solos para a realização dos seguintes ensaios:

b.1) Aproximadamente 70 g para o ensaio de determinação do limite de liquidez;

b.2) Aproximadamente 50 g para o ensaio de determinação do limite de plasticidade;

b.3) Aproximadamente 50 g para determinação do fator de contração.

ENSAIO 2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA (PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO DE UM SOLO)

1 - Objetivo

O objetivo deste ensaio é a obtenção da curva granulométrica de um solo.

2 - Equipamentos

- a) Conjunto de peneiras
- b) Peneirador mecânico
- c) Densímetro
- d) Proveta
- e) Dispensor mecânico

3 - Preparação da Amostra

Conforme ensaio 1.

4 - Peneiramento de Fração Maior que 2,0 mm (# 10)

4.1 - Procedimento

- a) Lavar o material retido na peneira nº 10 com auxílio de jato d'água, com a finalidade de remover qualquer grão com dimensão menor que 2,0 mm;
- b) Transferir o material lavado para o recipiente e secar em estufa a 105 - 110 °C até constância de peso;
- c) Realizar o peneiramento do material seco na série de peneiras desejada (ver Tabela 1), pesando posteriormente a fração retida em cada peneira;

Deve ser utilizado o peneirador mecânico por cerca de 10 minutos.

Tabela 1: Relação de peneiras disponíveis com abertura superior a 2,0 mm.

#	abertura da malha (mm)
1 1/2"	38.10
3/4 "	19.10
3/8 "	9.52
1/16 "	7.93
1/4"	6.35
4	4.76
8	2.38
10	2.00

4.2 - Cálculos

- a) Peso total da amostra seca ao ar - P_1
- b) Determinar a umidade higroscópica do material, seco ao ar, que passou na peneira nº 10;
- c) Somar os pesos das frações, retidas em cada peneira utilizada no peneiramento, obtendo-se o “peso do material seco retido” na peneira nº 10 (2,0 mm);
- d) A diferença $P_1 - P_2$ é o peso da fração da amostra seca ao ar que passa na peneira nº 10 - P_3 ;
- e) Calcula-se o fator de correção da umidade pela fórmula:

$$f = \frac{100}{100 + h\%}, \text{ onde } h\% = \text{umidade higroscópica} \quad (01)$$

- f) O produto de f por P_3 corresponde ao peso do material seco passando na peneira nº 10 - P_4 ;
- g) A soma dos pesos P_2 e P_4 é o peso da amostra total seca - P ;
- h) A porcentagem da amostra total seca retida em cada peneira é obtida dividindo-se, o peso do material retido, por P ;
- i) A porcentagem de material seco passando em cada peneira é obtida subtraindo-se, de 100, a porcentagem acumulada em cada peneira.

5 - Sedimentação da Fração que Passa na # 10

5.1 - Procedimentos

- a) Separar cerca de 100 g da fração da amostra seca ao ar que passa na peneira nº 10. Se o solo for muito argiloso, utilizar cerca de 70 g;
- b) Pesar com aproximação de 0,01 g, o material e imergi-lo em 125 ml de uma solução defloculante de hexametáfosfato de sódio a uma concentração de 45,7 g e tamponado com bicarbonato de sódio de modo a ficar com um pH entre 8 e 9. Deixar em repouso por 24 horas;
- c) Após 24 horas, verter a mistura no copo do dispersor, adicionar um pouco de água destilada e submeter a solução à ação do dispersor mecânico por 5 e 15 minutos. Caso o solo seja muito micáceo, dispersar o material por apenas 1 minuto;
- d) Em seguida, transferir a mistura para a proveta de 1000 ml, tendo o cuidado de não deixar material no copo, juntando água destilada até completar os 1000 ml;
- e) Tapando a boca da proveta com uma das mãos, executam-se movimentos semicirculares de modo que a boca passa de cima para baixo, e vice versa, durante 1 minuto;

f) Imediatamente após a agitação, coloca-se a proveta em um local não sujeito a vibrações, anota-se a hora como sendo a do início do ensaio e mergulha-se cuidadosamente o densímetro na solução;

g) Fazer as leituras correspondentes aos tempos de 30 segundos, 1 min. e 2 minutos;

h) Repetir as etapas e, “f” e g por mais duas vezes. Se as leituras no densímetro forem aproximadamente iguais nas três vezes, passar para a etapa “i”. Caso contrário, repetir estas etapas “e”, “f” e g até ocorrer coincidências de leituras.

i) Fazer as leituras correspondentes a 4, 8, 15, 30 min e 1, 2, 4, 8, 24 horas, observando-se que o densímetro deve ser colocado na solução 15 segundos antes de cada leitura. Mergulhando um termômetro na solução, obter a temperatura correspondente a cada leitura.

5.2 - Cálculos

a) Porcentagem do material em suspensão:

A porcentagem de material em suspensão, correspondente a cada leitura do densímetro, é referida à amostra total seca, através da seguinte fórmula:

$$q = N \times \frac{L_c}{P_s} \times \frac{\delta}{(\delta - 1)} \quad (02)$$

Onde: N = porcentagem de amostra total que passa na peneira de n^o 10

P_s = peso do solo seco da amostra utilizada na sedimentação;

L_c = leitura corrigida do densímetro que vale:

L_c = L - correção inicial (c_i) + correção devida à temperatura (c_t).

A correção inicial corresponde ao valor lido no densímetro colocado na proveta com água destilada e solução de hexametáfosfato de sódio, sem o solo.

A correção devida à temperatura (c_t) é devida à variação da densidade da água com a temperatura e é fornecida pela Tabela 2:

Tabela 2: Variação da densidade da água em relação à temperatura.

T ^o C	c _t	T ^o C	c _t	T ^o C	c _t
15	-1.10	20	0.0	25	+1.30
16	-0.90	21	+0.20	26	+1.65
17	-0.70	22	+0.40	27	+2.00
18	-0.50	23	+0.70	28	+2.50
19	-0.30	24	+1.00	29	+3.05

b) Diâmetro das partículas do solo em suspensão

O diâmetro máximo das partículas em suspensão, num determinado instante “t”, é dado pela lei de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{30n}{980(\gamma_g - \gamma_a)}} \times \frac{L}{T} \quad (03)$$

Onde: D = diâmetro, em mm

n = viscosidade da água, em poise

γ_g = peso específico dos grãos sólidos, em g/cm³

γ_a = peso específico da água, em g/cm³

L = altura de queda das partículas, em cm

T = tempo, em minutos

A altura da queda L das partículas é obtida através da curva de calibração do densímetro, a qual relaciona a distância entre o ponto de leitura e o centro de volume do bulbo do densímetro, com leitura corrigida devido ao menisco (R_{CDM}).

A leitura corrigida, devido ao menisco, vale:

$$R_{CDM} = R + 1$$

6 - Peneiramento da Fração Menor que 2,0 mm e Maior que 0,075 mm

6.1 - Procedimentos

a) Terminando o ensaio de sedimentação, verte-se a mistura na peneira nº 200 (0,075 mm) e lava-se com água destilada;

b) Transfere-se o material lavado para um recipiente e seca-se em estufa a 105 - 110 °C;

c) Realiza-se, a seguir, o peneiramento do material seco na série de peneiras indicada na Tabela 3, pesando-se a fração retida em cada peneira.

Tabela 3: Especificações das peneiras.

Peneira	Abertura da malha (mm)
40	0.420
60	0.250
100	0.149
200	0.075

6.2 - Cálculos

a) Peso da amostra parcial úmida: é o peso do material utilizado na sedimentação, determinado no item 5.1.b - (P₅);

b) Peso da amostra parcial seca: é o produto do peso P_5 pelo fator de correção $f - (P_6)$;

c) Porcentagem da amostra parcial retida em cada peneira: é obtida dividindo-se o peso da fração retida em cada peneira (item 6.1.c), pelo peso P_6 ;

d) Porcentagens da amostra parcial acumulada em cada peneira: é obtida somando-se, à porcentagem retida em cada peneira, as porcentagens retidas nas peneiras anteriores;

e) Porcentagens da amostra parcial que passa em cada peneira: obtém-se subtraindo de 100 a porcentagem acumulada em cada peneira;

f) Porcentagem da amostra total que passa em cada peneira: é obtida multiplicando-se a porcentagem determinada no item anterior pela porcentagem da amostra total que passa na peneira nº 10.

ENSAIO 3 - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

1 - Objetivo

O objetivo deste ensaio é a determinação do teor de umidade do solo, definido pela relação entre o peso da água e o peso do solo seco, expressa em porcentagem:

$$h\% = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

2 - Procedimento

a) coloca-se em uma cápsula de alumínio uma quantidade de solo (em geral de 10 a 50 g), pesa-se o conjunto e anota-se o peso (P_1);

b) leva-se o conjunto para uma estufa regulada entre 105°C e 110°C. Após 6 horas pesa-se novamente, obtendo-se o peso (P_2);

c) pesa-se a cápsula (P_c).

3 - Cálculos

Obs.: As pesagens são feitas com aproximação de 0,01 g (Tabela 1)

Tabela 1: Parâmetros de amostragem

CÁPSULA N ^o	C
CÁP. + SOLO + ÁGUA	P_1
CÁP. + SOLO	P_2
ÁGUA	$P_a = P_1 - P_2$
CAPS	P_c
SOLO	$P_s = P_2 - P_c$
UMIDADE - h%	P_a / P_s

Obs.: Para se obter um bom valor do teor de umidade recomenda-se o uso da mesma balança para todas as determinações de peso.

ENSAIO 4 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DOS GRÃOS DO SOLO PELA BOMBA DE VÁCUO

1 - Objetivo

Determinação da densidade das partículas que constituem um determinado solo.

2 - Equipamentos

- a) Picnômetro com volumes de 50 ml ou 250 ml ou 500 ml;
- b) Bomba de vácuo;
- c) Balança com precisão de 0,01 g;
- d) Estufa regulada entre 105 e 110⁰ C;
- e) Banho Maria;
- f) Termômetro para medições entre 0 e 60⁰ C.

3 - Preparação da Amostra

Ver ensaio 1 referente à preparação da amostra para o ensaio de caracterização.

4 - Comentários Gerais

a) A densidade de qualquer substância é definida como sendo o peso específico do material dividido pelo peso específico da água a 4⁰ C.

Portanto, no caso dos grãos de uma massa de solo, temos:

$$G_s = \frac{\gamma_g}{\gamma_{a4^0C}} \quad (01)$$

Onde:

γ_g = peso específico dos grãos

γ_a = peso específico da água a 4⁰ C

Se considerarmos um volume de água igual ao volume de sólidos em questão, a equação (01) pode ser escrita como:

$$G_s = \frac{P_{\text{sólidos}}/V_{\text{sólidos}}}{P_{\text{água}}/V_{\text{água}}} = \frac{P_{\text{sólidos}}}{P_{\text{água}}} \quad (02)$$

A equação acima é particularmente interessante pois, em laboratório, é mais simples medir pesos do que volume. O problema de determinar a densidade dos grãos de um solo consiste, então, em obter o volume de um peso conhecido de grãos sólidos. A seguir, divide-se este peso pelo peso de um volume de água igual ao volume dos grãos sólidos.

Para isto será utilizado um recipiente de volume conhecido: no caso será o picnômetro.

b) Curva de calibração do picnômetro

A calibração de um picnômetro consiste em obter uma curva que relacione a variação de peso do conjunto picnômetro + água (até a marca de calibração) com a temperatura. Esta variação no peso do conjunto se deve à variação do picnômetro com a temperatura.

Esta curva de calibração será utilizada para a obtenção do peso P_1 do conjunto picnômetro + água (até a marca de calibração), na temperatura do ensaio.

c) Dedução da fórmula a ser usada nos cálculos

A situação (a) na Figura 1 indica um picnômetro com água até a marca de calibração e o peso deste conjunto, a uma temperatura T , é igual a P_1 .

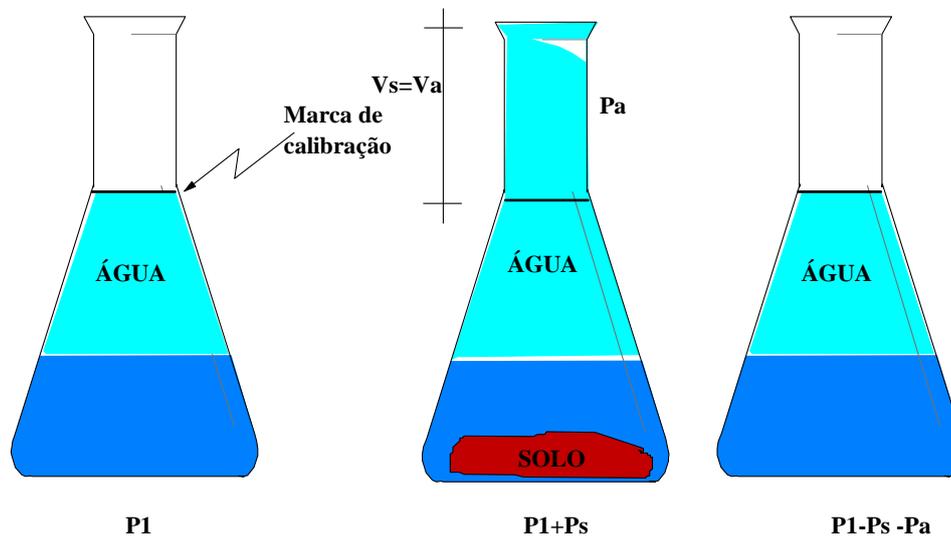


Figura 1: Picnômetro e água

Seja P_s o peso do solo seco que será utilizado na determinação da densidade dos grãos; se vertermos este material no picnômetro, será deslocado o volume de água (V_a), indicado na situação (b) da figura 1. Este volume de água (V_a), de acordo com o princípio de Arquimedes, será igual ao volume de sólidos (V_s), colocado dentro do picnômetro.

O peso (P_a) deste volume de água será igual a:

$$P_a = P_1 + P_s - P_2 \quad (03)$$

Onde: P_2 é o peso do picnômetro + solo + água até a marca de calibração (ver situação c), na temperatura T do ensaio.

Então, de acordo com a equação, teremos:

$$G_s = \frac{P_{\text{solidos}}}{P_{\text{agua}}} = \frac{P_s}{P_a} = \frac{P_s}{P_1 + P_s - P_2} \quad (04)$$

Esta é a equação a ser utilizada nos cálculos.

Obs.: Usualmente indica-se o valor de G_s correspondente à temperatura de 20^o C. A equação 1 fornece o valor de G_s na temperatura T do ensaio. Para obter-se o valor correspondente a 20^o C é necessário multiplicar por um fator de correção igual a:

$$a = \frac{\gamma_a(T)}{\gamma_a(20^{\circ}\text{C})}$$

Onde: $\gamma_a(T)$ é peso específico da água a temperatura do ensaio.

5 - Procedimentos de Ensaio

5.1 - Generalidades

O ensaio da determinação da densidade dos grãos sólidos de um solo pode ser realizado com amostras na umidade natural, com amostras secas ao ar ou em estufa.

Se o solo é seco em estufa antes do ensaio, é conveniente obter o peso do solo antes do ensaio.

Se for utilizada uma amostra seca ao ar, é conveniente determinar inicialmente o peso seco ao ar e, a seguir obter o peso seco corrigido com o valor da umidade higroscópica.

Com o solo na umidade natural, é mais conveniente secar em estufa o conteúdo do picnômetro depois do ensaio, de modo a obter P_s , ou então corrigir o valor do teor de umidade.

Solos arenosos e siltosos são freqüentemente secos em estufa antes do ensaio, uma vez que a secagem em estufa raramente muda a densidade dos grãos de uma quantidade significativa.

O peso de solo utilizado neste caso deve ser obtido pela diferença entre o peso do picnômetro + solo seco e o peso do picnômetro vazio.

Solos argilosos não devem ser secos em estufa antes da determinação de sua densidade, porque mudanças significativas das propriedades destes solos podem ocorrer devido ao processo de secagem. Nesses casos devem ser utilizadas amostras secas ao ar.

Caso seja utilizada uma amostra de solo na umidade natural, é conveniente adicionar, à amostra, uma pequena quantidade de água e levar a um dispositivo mecânico, antes de vertê-lo no picnômetro.

5.2 - Solos arenosos e siltosos

a) Transferir para o picnômetro uma quantidade do material seco em estufa, de acordo com as seguintes indicações:

Picnômetro 50 ml - aproximadamente 10 g

Picnômetro 250 ml - aproximadamente 25 g

Picnômetro 500 ml - aproximadamente 50 g

b) Obter P_s (peso do solo seco) por diferença entre o peso do picnômetro + solo seco e o peso do picnômetro vazio;

c) Verter água destilada no picnômetro até uma altura um pouco acima do material, e aplicar vácuo ao conjunto, no mínimo por 10 minutos, agitando levemente o picnômetro, de modo a retirar o ar porventura aprisionado entre as partículas;

d) Completar com água o conteúdo do picnômetro até sua marca de calibração. Pesar o conjunto e anotar como P_2 . Medir a temperatura, T , do conteúdo do picnômetro;

e) Com o valor de T , obter o valor P_1 através da curva de calibração do picnômetro;

f) Aplicar a equação (6.4) e obter o valor de G_s ;

g) Repetir toda a operação pelo menos 3 vezes. O valor médio dos resultados será dito ser a densidade dos grãos, desde que o erro entre os valores obtidos seja menor que 2 %, ou seja:

$$0,02 * (\text{maior valor obtido}) + \text{menor valor obtido} \geq \text{maior valor obtido}.$$

5.3 - Solos argilosos

O procedimento é muito semelhante ao anterior, a menos dos seguintes detalhes:

a) O material utilizado é seco ao ar livre, e não seco em estufa;

b) Suas proporções, em relação a capacidade do picnômetro, são indicadas a seguir:

Picnômetro 50 ml - aproximadamente 15 g

Picnômetro 250 ml - aproximadamente 30 g

Picnômetro 500 ml - aproximadamente 50 g

c) Deve ser determinada a umidade higroscópica do material;

d) Durante a aplicação do vácuo, além da leve agitação, o picnômetro deve ser aquecido a, no máximo, 60°C , a fim de auxiliar a retirada do ar aprisionado.

O objetivo de aquecer o conjunto é porque o material argiloso possui vazios muito pequenos, tendo, portanto, maior capacidade de retenção de ar. O aquecimento ajuda o desprendimento desse ar.

No mais, todos os procedimentos devem ser rigorosamente os mesmos já definidos para materiais arenosos e argilosos.

ENSAIO 5 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE REAL DOS GRÃOS DO SOLO PELO PICNÔMETRO POR AQUECIMENTO

1 - Objetivo

Determinação da densidade das partículas sólidas que constituem um determinado solo

2 - Equipamentos

- a) Picnômetro com capacidade de 500 ml;
- b) Peneiras de 2,0 mm e 0,074 mm respectivamente, peneiras nº 10 e 200;
- c) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 e 110 °C;
- d) Balança com capacidade para 2 kg, sensível a 0,1 g;
- e) Fogão, bico de bussen, placa elétrica, etc.

3 - Preparação da Amostra Para o Ensaio

Segue o mesmo princípio adotado para o método do picnômetro pela bomba a vácuo, anteriormente descrito.

4 - Procedimentos do Ensaio

a) A massa específica real através do aquecimento procede-se de maneira idêntica ao da bomba a vácuo, com a diferença de que o ar será extraído pelo aquecimento.

b) Pesa-se o picnômetro vazio e seco, anotando-se esse peso como recipiente a P1. Coloca-se a quantidade de solo conforme os itens 2.a, para solos argilosos, e 3.b para solos arenosos, dentro do picnômetro e anota-se como P2.

c) Coloca-se água destilada no picnômetro até cobrir com excesso e coloca-se o conjunto no aquecedor.

d) Após o início da fervura, conta-se 15 min, agitando-se a amostra no picnômetro para evitar um superaquecimento. A finalidade de ferver a amostra e expulsar totalmente o ar contido nos poros dos grãos.

e) Terminando o tempo de fervura retira-se o picnômetro do aquecedor, deixa-se esfriar ao ambiente, depois coloca-se no banho - maria, até que a temperatura do material se iguale ao do ambiente. Completa-se o volume do picnômetro com água destilada até o traço de referência do picnômetro, enxuga-se externamente, pesa-se e anota-se como P3.

f) Joga-se fora todo material do picnômetro, lava-se e enche-se o picnômetro com água destilada até o traço de referência, enxuga-se externamente, pesa-se e anota-se como P4.

g) A massa específica real pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$Gr = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (01)$$

ENSAIOS 6 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA

1 - Objetivo

Determinação dos limites de liquidez e plasticidade.

2 - Preparação das Amostras

A amostra de solo utilizada na realização dos “limites de Atterberg” não devem ser previamente secas em estufa, e sim apenas deixadas secar ao ar.

Os ensaios dos limites de liquidez e plasticidade devem ser realizados no material que passa na peneira n^o 40, de abertura da malha de 425 µm, retirando-se aproximadamente 120 g, das quais serão utilizadas:

- i) cerca de 70 g para a determinação do LL;
- ii) cerca de 50 g para a determinação do LP.

3 - Determinação do Limite de Liquidez

3.1 - Equipamentos

- a) Aparelho de Casagrande, com concha caindo de uma altura de queda de exatamente 10 mm sobre uma base padronizada de ebonite;
- b) Cinzel de Casagrande para solos argilosos conforme figura 7.01;
- c) Cinzel padronizado da ASTM para solos siltosos e arenosos conforme figura 7.02;
- d) Balança com capacidade 200 g, sensível a 0,01 g;
- e) Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml; ou placa de vidro plana com as bordas arredondadas;
- f) Duas espátulas flexíveis, com 200 mm de comprimento e 25 mm de largura;
- g) Aparelhagem básica para obtenção do teor de umidade.

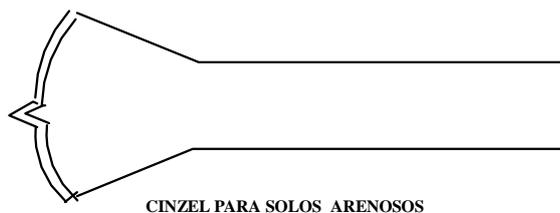
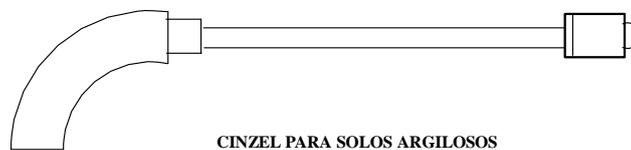


Figura 1 e 2: Cinzel de Casagrande para solos argilosos.
Cinzel padronizado da ASTM para solos siltosos e arenosos.

3.2 - Procedimentos

a) Com o auxílio de um espaçador graduado ou o cabo do cinzel de Casagrande, faz-se a calibração da altura de queda da concha do aparelho, correspondente à 10 mm. Esta verificação deve ser feita exatamente no ponto em que a concha toca a base;

b) Verificar se a superfície da concha está limpa e seca;

c) Coloca-se 70 g de solo na cápsula de porcelana, ou na placa de vidro plana, juntamente com uma quantidade de água destilada suficiente para se obter uma massa pastosa. Esta primeira quantidade deve ser tal que, em aproximadamente 50 golpes através do Aparelho de Casagrande, a ranhura se feche;

d) Procede-se com o auxílio da espátula a mistura da amostra, até obter-se uma mistura com coloração homogênea;

e) Com a concha devidamente repousando sobre a base de ebonite, deposite a mistura dentro da mesma, pressionando a amostra do ponto médio para fora, com o propósito de prevenir contra o surgimento de qualquer bolha de ar no seu interior. A menor espátula é a mais indicada neste caso. A superfície do solo deve estar lisa e paralela a base, com uma profundidade igual à do cinzel com o qual se abre a ranhura;

f) Com o cinzel adequado para o tipo de solo, separa-se a massa de solo em duas partes abrindo-se uma ranhura segundo o eixo de simetria da concha:

f. 1) cinzel de Casagrande : tem-se o cuidado de que esteja perpendicular à tangente instantânea da concha;

f. 2) cinzel da ASTM : utiliza-se uma espátula para abertura inicial da ranhura, fazendo-se o acabamento final com a cinzel ASTM.

g) Golpeia-se a concha fazendo girar a manivela com uma velocidade constante de 2 golpes por segundo;

h) Ao se constatar no solo o fechamento ao longo da ranhura de um trecho de $\frac{1}{2}$ ", o ensaio é paralisado;

i) Coleta-se imediatamente uma amostra de solo da região da ranhura, junto às bordas que se uniram, e determina-se o teor de umidade do material;

j) Limpa-se a concha, lavando e secando, com a transferência do restante do solo para a cápsula de porcelana para a repetição de todas as operações anteriores, porém adicionando-se água a mistura, em tal quantidade que o número de golpes necessários para o fechamento das ranhuras subseqüentes correspondam aproximadamente a 50, 30, 20 e 10

golpes. Recomenda-se pelo ao menos 4 determinações, sendo mais aconselhável realizar 5 determinações.

k) Calcula-se o valor do LL através do traçado do gráfico semilogaritmico relacionando-se na abcissa, o n^o de golpes e na ordenada o teor de umidade, sendo o limite de liquidez igual ao teor de umidade correspondente a 25 golpes, ou seja o ponto no qual o solo começa a adquirir uma resistência ao cisalhamento de aproximadamente de 1.7 kN/m².

4 - Determinação do Limite de Plasticidade

4.1 - Equipamentos

a) A parte mais importante de todo o aparato para este ensaio é a mão do operador, a qual deve estar limpa e isenta de gordura;

b) Placa de vidro de superfície esmerilhada;

c) Um pequeno cilindro de metal de 3 mm de diâmetro com 10 cm de comprimento, considerado útil, porém não essencial;

d) Cápsula de porcelana;

e) Espátula flexível;

f) Aparelhagem padrão para determinação do teor de umidade;

4.2 - Procedimentos

a) Deposita-se a amostra de solo, cerca de 50 g, na cápsula de porcelana, adicionando-se água destilada em quantidade suficiente para se obter uma massa plástica. Deve-se adicionar a água aos poucos, misturando-se continuamente com a espátula até completa homogeneização da massa;

b) Usando-se uma pequena quantidade de material, faz-se, rolando sobre a placa de vidro com a superfície esmerilhada, um cilindro de dimensões idênticas às do gabarito. Observar que este cilindro começa a trincar quando atinge o diâmetro do mesmo;

c) Caso contrário, secar o material ao ar, ou adicionar água e repetir o procedimento acima;

d) Ao se conseguir um cilindro que começa a fissurar exatamente quando atingir o diâmetro de 3 mm, determina-se o teor de umidade, e este será o limite de plasticidade;

e) Devem ser feitas pelo menos 3 determinações. O valor adotado será a média dos valores, eliminados aqueles que se afastam mais de 10 % da média.

Obs.: Quando o solo é plástico o suficiente, faz-se então a sua moldagem em forma de bolas, com o auxílio dos dedos, rolando-se entre as

palmas das mãos até que o calor das mesmas consiga secá-las lentamente. Quando pequenas trincas começarem a surgir na superfície, divide-se a bola em duas porções com quantidades iguais de materiais. Em seguida divide-se cada porção em quatro partes iguais e inicia-se a rolagem sobre a placa de vidro esmerilhada.

ANEXO B

Resultados dos Ensaio de Limite de Consistência, Granulometria e Resistência à Compressão

