

VIVIAN ANE LOPES CABRAL

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DA ETA UFV NA
MANUFATURA DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

C117a Cabral, Vivian Ane Lopes, 1989-
2013 Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na
manufatura de tijolos de solo-cimento / Vivian Ane Lopes
Cabral. – Viçosa, MG, 2013.
xix, 154f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.130-144.

1. Lodo residual - Reaproveitamento. 2. Solo-cimento.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

II. Título.


CDD 22. ed. 628.38

VIVIAN ANE LOPES CABRAL

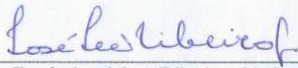
**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DA ETA UFV NA
MANUFATURA DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

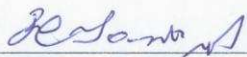
APROVADA: 22 de outubro de 2013.




Prof. Charles Luis da Silva



Prof. José Ivo Ribeiro Júnior
(Coorientador)



Profª Rita de Cássia S. S. Alvarenga
(Coorientadora)



Prof. Rafael Kopschitz Xavier Bastos
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Rafael Bastos por sua orientação brilhante e, em particular, pela confiança, apoio e atenção.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

À professora Rita de Cássia Alvarenga pelos conselhos durante todo o projeto.

Ao professor José Ivo Ribeiro Júnior que, de maneira prática, emprestou seu conhecimento na área da estatística.

Aos estagiários que me acompanharam nos trabalhos, uns por um período menor e outros até o fim das atividades: Benício, Kim, Érica e Rafael.

Aos técnicos de laboratório que me auxiliaram na execução das análises. Em especial, ao Julinho, por sua solicitude.

Ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da UFV por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização da pesquisa.

Ao professor Charles do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica e aos professores Maurício Fontes e Carlos Ernesto do Departamento de Solos que contribuíram para que algumas análises fossem realizadas.

Aos companheiros da pós-graduação pelo carinho e alegria, importante fonte de energia para o trabalho.

À minha mãe, Renir Cabral, por ser um exemplo de força e determinação. Ao meu pai e aos meus irmãos pelo incentivo e confiança. Aos meus familiares, amigos e pessoas de bem, que estão e que passaram em minha vida, que fazem parte de quem eu sou.

Obrigada a todos!

BIOGRAFIA

VIVIAN ANE LOPES CABRAL, filha de Narciso Lopes Cabral e Renir Aparecida Lopes Cabral, nasceu em 26 de fevereiro de 1989, em Barbacena – MG.

Em Março de 2007, iniciou o curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em 2011.

Em Março de 2012, ingressou no Mestrado em Engenharia Civil – área de concentração Sanitária e Ambiental – na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa em outubro de 2013.

Em Agosto de 2013 foi aprovada para ingresso no doutorado em Engenharia Civil – área de concentração Sanitária e Ambiental – na Universidade Federal de Viçosa, na modalidade doutorado direto. Com término previsto para o ano de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS	4
Hipótese	4
Objetivo Geral	4
Objetivos Específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Clarificação da água e geração de resíduos em ETAs convencionais	5
3.2. Tratamento de lodo de ETA	9
3.3. Características dos lodos de ETA	11
3.3.1. Granulometria.....	13
3.3.2. Limites de Liquidez e de Plasticidade	15
3.3.3. Composição química e mineralógica.....	17
3.4. Aproveitamento do lodo de ETA em materiais de construção.....	19
3.5. Tijolos de solo-cimento.....	24
3.5.1. Solo-cimento como material de construção.....	24
3.5.2. Processo de fabricação.....	27
3.5.3. Fatores interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento.....	29
3.5.3.1. Tipo de solo.....	29
3.5.3.2. Cimento	31
3.5.3.3. Umidade da massa e compactação	33
3.5.3.4. Método de mistura e cura dos tijolos.....	36
3.5.4. Incorporação de resíduos na manufatura de tijolos de solo-cimento	37
3.6. Planejamento e modelagem de estudos de misturas.....	38
3.6.2. Delineamento em rede simplex e modelos polinomiais canônicos para experimentos de mistura	41
3.6.3. Representação matricial.....	45

3.6.4. Restrições experimentais e pseudocomponentes	45
4. MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1. Descrição geral do estudo	47
4.2. Preparação e caracterização dos materiais utilizados nas misturas solo-cimento-lodo	50
4.2.1. Origem e preparação dos materiais	50
4.2.1.1. Solo	50
4.2.1.2. Lodo do decantador da ETA UFV	51
4.2.1.3. Cimento	57
4.2.2. Caracterização dos materiais	58
4.2.2.1. Caracterização física	58
4.2.2.2. Caracterização mineralógica	60
4.2.2.3. Caracterização química e morfológica	62
4.3. Ensaio de compactação e estudo da umidade de prensagem	63
4.4. Produção dos tijolos	67
4.5. Ensaio tecnológicos dos tijolos	71
4.5.1. Análise dimensional	71
4.5.2. Ensaio de absorção de água	71
4.5.3. Ensaio de resistência à compressão simples	72
4.6. Definição dos intervalos de proporções dos componentes	74
4.7. Delineamento experimental	75
4.8. Escolha da umidade de prensagem	78
4.9. Análise estatística	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1. Características dos materiais utilizados na mistura solo-cimento-lodo	83
5.1.1. Características físicas do solo e do lodo	83
5.1.2. Características mineralógicas, químicas e morfológicas do solo e do lodo	89
5.1.3. Características do cimento	100
5.2. Umidade de prensagem dos tijolos	103
5.3. Avaliação dos tijolos do experimento de mistura	112
5.4. Modelo de mistura do experimento	115
5.5. Traço escolhido	126
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE A - Resultados dos ensaios tecnológicos para estudo da unidade de prensagem	145
APÊNDICE B - Resultados dos ensaios tecnológicos dos tijolos do experimento de mistura.....	151

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	significância do teste estatístico
μm	micrômetro
γ_{dmax}	peso específico seco máximo
w_{ot}	umidade ótima
C_3A	aluminato tricálcico
C_3S	silicato tricálcico (alita)
C_2S	silicato dicálcico (belita)
C_4AF	ferroaluminato tetracálcico (ferrita)
CH	hidróxido de cálcio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	análise de variância
ASCE	American Society of Civil Engineers
AWWA	American Water Works Association
BNH	Banco Nacional de Habitação
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CTC	capacidade de troca de cátions
DIC	delineamento inteiramente casualizado
EDS	Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy
Embrapa	Empresa brasileira de agricultura e pecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
L	limite inferior da proporção do componente na mistura

LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	matéria orgânica
MS	Ministério da Saúde
NE	não ensaiado
PCA	Portland Cement Association
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
S/A	Sociedade Anônima
TC	tempo de cura
TECPAr	Instituto de Tecnologia do Paraná
UNESCO Cultura	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
U	limite superior da proporção do componente na mistura
UM	umidade da massa

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Ilustração esquemática de uma ETA convencional, com indicação de locais de geração dos resíduos.	6
Figura 3.2	Lodo acumulado em decantador convencional.	7
Figura 3.3	Esquema de um leito de secagem (corte) de lodo de ETA.	10
Figura 3.4	Linhas de geração, tratamento e recirculação de resíduos de ETAs.	11
Figura 3.5	Ilustração das frações de água constituintes dos lodos de ETAs.	12
Figura 3.5	Diferentes tipos de tijolos de solo-cimento, produzidos em prensa.	27
Figura 3.6	Processo de fabricação de tijolos de solo-cimento.	28
Figura 3.7	Curva de compactação obtida via ensaio normal de Proctor.	35
Figura 3.8	Representação gráfica do espaço experimental para experimentos de mistura com dois (a) e três componentes (b).	40
Figura 3.9	Sistema de coordenada simplex para mistura de três componentes.	41
Figura 3.10	Exemplos de delineamento em rede simplex para três componentes ($q = 3$): <i>lattice</i> {3,2} (a) e <i>lattice</i> {3,3} (b).	42
Figura 3.11	Delineamento em rede simplex {3,2} aumentado.	43
Figura 4.1	Esquema ilustrativo do experimento de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV em tijolos de solo-cimento, com identificação das variáveis envolvidas.	48

Figura 4.2	Fluxograma com as etapas do estudo.	50
Figura 4.3	Aspecto do solo pronto para o uso (a) e do recipiente utilizado para acondicionamento do solo e manutenção do teor de umidade (b).	51
Figura 4.4	Estação de tratamento de água da Universidade Federal de Viçosa – floculador e decantador (a) e filtros (b).	52
Figura 4.5	Variação da turbidez da água bruta afluyente à ETA UFV, 2005 a 2010.	53
Figura 4.6	Operação de limpeza do decantador da ETA UFV (a) e descarga de fundo do lodo do decantador (b).	54
Figura 4.7	Leitos de secagem de lodo em escala piloto instalados nas dependências da ETA UFV.	55
Figura 4.8	Aspecto do lodo após período de desaguamento no leito de secagem piloto.	56
Figura 4.9	Aspecto do material seco antes da moagem (a) e moinho de bolas utilizado (b).	56
Figura 4.10	Detalhes do lodo pronto para uso (a) e do recipiente para armazenamento (b).	57
Figura 4.11	Determinação da retração do corpo-de-prova no ensaio prático da caixa.	60
Figura 4.12	Detalhes das etapas do ensaio de compactação para determinação da umidade ótima: homogeneização manual da amostra (a); compactação das camadas no molde cilíndrico com uso de soquete padrão (b); rasadura do corpo-de-prova (c) para pesagem e determinação da massa específica seca.	65

Figura 4.13	Prensa manual utilizada para a fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento-lodo.....	67
Figura 4.14	Ilustração esquemática da produção dos tijolos de solo-cimento-lodo.	70
Figura 4.15	Tijolos imersos em água para determinação da absorção de água segundo método da NBR 8492 (ABNT, 2012).	72
Figura 4.16	Detalhes do gabarito utilizado no capeamento, para obter a espessura especificada na norma NBR 8492 (ABNT, 2012) (a) e do rompimento do corpo-de-prova na máquina de ensaio de compressão (b).....	73
Figura 4.17	Prensa mecânica utilizada para os ensaios de resistência à compressão dos tijolos.....	73
Figura 4.18	Sub-região delimitada pelas restrições experimentais, apresentando os pontos do delineamento.	76
Figura 4.19	Esquema ilustrativo do experimento de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV em tijolos maciços de solo-cimento, apresentando os níveis das variáveis envolvidas.	79
Figura 5.1	Curva granulométrica do solo (as linhas vermelhas pontilhadas representam os limites para as classes granulométricas de acordo com classificação ABNT (NBR 6502) – da esquerda para a direita: argila, silte, areia e pedregulho – e as linhas pretas pontilhadas indicam o diâmetro das partículas referente a 90%, ou D_{90} , e 50%, ou D_{50} , da distribuição de frequência acumulada).	83
Figura 5.2	Curva granulométrica do lodo do decantador da ETA UFV (as linhas vermelhas pontilhadas representam os limites para as classes granulométricas de acordo com	

	classificação ABNT (NBR 6502) – da esquerda para a direita: argila, silte, areia e pedregulho – e as linhas pretas pontilhadas indicam o diâmetro das partículas referente a 90%, ou D_{90} , e 50%, ou D_{50} , da distribuição de frequência acumulada).....	84
Figura 5.3	Diagrama de Atterberg para classificação textural de amostras de solo com indicação dos resultados das análises granulométricas das amostras do solo e do lodo utilizados na mistura solo-cimento-lodo (■ lodo; ▲ solo).....	86
Figura 5.4	Ensaio da caixa para o solo (a) e para o lodo (b).	88
Figura 5.5	Difratogramas das frações granulométricas do lodo da ETA UFV: areia (a), silte (b), argila (c) e argila desferrificada (d).	91
Figura 5.6	Unidade cristalográfica da caulinita, mostrando o conjunto 1:1.....	92
Figura 5.7	Diferentes feições estruturais de solos	93
Figura 5.8	Imagem de MEV do lodo – estrutura granular do lodo.....	94
Figura 5.9	Imagem de MEV do lodo, com detalhe de agregado, possivelmente de caulinita – observa-se a estrutura pseudo-hexagonal alterada pelo intemperismo.	94
Figura 5.10	Imagem de MEV do solo – presença de quinas intactas típicas de material mais resistente ao intemperismo, como o quartzo.....	99
Figura 5.11	Imagem de MEV do solo – formas planares típicas de micas.....	100
Figura 5.12	Curvas de compactação dos ensaios realizados para verificar o efeito da composição das misturas sobre a	

	umidade ótima de compactação, para os três traços da Tabela 5.9: traço 1 (a), traço 2 (b) e traço 3 (c).	104
Figura 5.13	Tijolos produzidos para avaliar o efeito do teor de umidade sobre as propriedades dos tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo de ETA (traço 1).	106
Figura 5.14	Detalhe de um dos corpos-de-prova do traço 1 em preparação para ensaio de resistência à compressão (em vermelho, quina quebrada durante a manipulação).	107
Figura 5.15	Tijolos do traço 1 durante (a) e após (b) ensaio de absorção de água.	107
Figura 5.16	Resíduos padronizados vs. ordem das observações.	118
Figura 5.17	Resíduos padronizados vs. valores estimados pelo modelo de mistura	118
Figura 5.18	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizados	119
Figura 5.19	Gráfico com linhas de contorno de isorresistência, estimadas pelo modelo, para misturas dentro da região experimental.	120
Figura 5.20	Superfície de respostas estimadas pelo modelo de mistura.	121
Figura 5.21	Níveis de cimentação que ocorrem em areia estabilizada com cimento: cimentação fraca em que os produtos de hidratação do cimento recobrem parcialmente a superfície das partículas de areia (a); cimentação média, em que a maior parte das partículas de areia está unida pela cimentação (b); e forte, onde os produtos cimentantes ocupam quase todos os espaços vazios (c).	122

Figura 5.22	Gráfico de resposta de componentes individuais partindo do ponto central ou centroide do delineamento (mistura referência – 82,5 % de solo, 5% de lodo e 12,5% de cimento).....	124
Figura 5.23	Região experimental com representação das misturas solo-cimento-lodo para produção de tijolos que atendam ao limite mínimo de especificação para a resistência à compressão de acordo com a norma NBR 8492 (área hachurada).....	125
Figura 5.24	Traço indicado para a fabricação dos tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo do decantador da ETA UFV e a localização da região experimental no simplex original para misturas ternárias (representada pelo triângulo pontilhado).....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Distribuição granulométrica de lodos de ETA obtida com os métodos de análise da NBR 7181 (ABNT, 1984).....	15
Tabela 3.2	Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índices de Plasticidade (IP) de lodos de ETA, determinados com base nas normas NBR 6459 e NBR 7180.....	16
Tabela 3.3	Requisitos físicos e mecânicos exigidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012) para tijolos de solo-cimento.....	29
Tabela 3.4	Critérios para a seleção de solos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento, segundo a NBR 10833 (ABNT, 2012).....	31
Tabela 3.5	Faixas de porcentagens dos principais componentes do cimento e suas propriedades.....	32
Tabela 4.1	Análises para a caracterização do solo e do lodo.....	58
Tabela 4.2	Ensaio realizado para caracterização física do solo e do lodo.....	59
Tabela 4.3	Composição dos traços do ensaio de compactação para obtenção da umidade ótima.....	64
Tabela 4.4	Limites inferior e superior para os componentes da mistura no delineamento.....	75
Tabela 4.5	Delineamento experimental em rede simplex {3,3} aumentado com os pontos axiais, instalado sob o DIC, para o experimento de incorporação de lodo da ETA UFV em solo-cimento.....	77
Tabela 5.1	Composição granulométrica do solo e do lodo, de acordo com classificação ABNT.....	85
Tabela 5.2	Intervalos de tamanho para as classes granulométricas, de acordo com NBR 6502 (ABNT, 1995).....	85

Tabela 5.3	Caracterização física do solo e do lodo do decantador da ETA UFV.....	87
Tabela 5.4	Caracterização física de misturas de solo e lodo.....	89
Tabela 5.5	Composição química do lodo do decantador da UFV.....	97
Tabela 5.6	Características químicas do solo e do lodo da ETA UFV – teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC) e pH.....	99
Tabela 5.7	Ensaio físico de cimento portland de alto-forno resistente a sulfatos (CP III-RS) – ABNT NBR 5737:1992....	101
Tabela 5.8	Ensaio químico de cimento portland de alto-forno resistente a sulfatos (CP III-RS) – ABNT NBR 5737:1992....	101
Tabela 5.9	Resultados dos ensaios realizados para verificar o efeito de diferentes composições sobre a umidade ótima de compactação de misturas solo-cimento-lodo.....	103
Tabela 5.10	Médias dos ensaios realizados para avaliar a influência do teor de umidade de prensagem na qualidade dos tijolos.....	108
Tabela 5.11	ANOVA para as regressões linear e quadrática da resistência à compressão em função da umidade de prensagem dos tijolos.....	110
Tabela 5.12	ANOVA para as regressões linear e quadrática da absorção de água em função da umidade de prensagem dos tijolos.....	110
Tabela 5.13	Médias da resistência à compressão dos tijolos do experimento de mistura (médias e desvios-padrão).	113
Tabela 5.14	Médias da massa específica aparente dos tijolos do experimento de mistura.....	114
Tabela 5.15	Dados utilizados para o ajuste dos modelos de misturas	116

Tabela 5.16	Resumo da análise estatística dos ajustes dos modelos de mistura aos dados experimentais.....	116
-------------	---	-----

RESUMO

CABRAL, Vivian Ane Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2013. **Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento.** Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Coorientadores: Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga e José Ivo Ribeiro Júnior.

Neste trabalho foi avaliada a possibilidade de incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na manufatura de tijolos de solo-cimento, na perspectiva de preservação ambiental e aproveitamento de um resíduo como matéria prima em aplicação produtiva. Por meio de delineamento experimental de misturas foram avaliados vários traços de composições solo-cimento-lodo: solo com características arenosas, proveniente da jazida Nô Silva na microrregião de Viçosa, MG; lodo do decantador da ETA da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e cimento Portland tipo CP III-40-RS. A aptidão do lodo para aplicação em solo-cimento foi inicialmente avaliada com base em caracterização física (granulometria e limites de Atterberg, dentre outras), mineralógica (difração de raios-X), química (análise de raios-X por dispersão de energia – EDS) e morfológica (microscopia eletrônica de varredura – MEV). As características granulométricas e de consistência do lodo (material predominantemente fino, com limites de liquidez e de plasticidade elevados), além da presença de teores relativamente elevados de matéria orgânica, sugerem que a incorporação do lodo em tijolos de solo-cimento deva se dar em baixas proporções. Com efeito, os testes com tijolos preparados com diversos traços de mistura solo-cimento-lodo revelaram que a resistência mecânica diminuiu com o incremento de lodo e que o requisito da norma NBR 8491 para aceitação do tijolo em obras de alvenaria sem função estrutural (2,0 MPa) seria atendido com traços com 6% de lodo (substituindo parcialmente o solo) e no mínimo 15% de cimento. Sugere-se a continuidade dos estudos na busca de opções que viabilizem a incorporação de proporções mais elevadas de lodo e tornem os tijolos de solo-cimento-lodo uma opção mais atrativa do ponto de vista econômico.

ABSTRACT

CABRAL, Vivian Ane Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2013. **Evaluation of adding sludge from the UFV water treatment plant in the manufacture of soil-cement bricks.** Adviser: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Co-advisers: Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga and José Ivo Ribeiro Júnior.

In this work, with a view of environmental protection and the use of a waste residue as a raw material for productive applications, the possibility of using water treatment plant (WTP) sludge in the making of soil-cement bricks was evaluated. By means of a mixture experimental design, several soil-cement-sludge compositions were tried, using: a sand soil from 'Nô Silva' field, located in the surroundings of Viçosa-MG; and a Portland cement type CP III-40-S. The suitability of WTP sludge for being used in soil-cement was initially evaluated in the basis of its physical (e.g. granulometric composition and Atterberg limits), mineralogical (X-ray diffraction), chemical (energy dispersive X-ray analysis – EDS) and morphological (scanning electron microscopy – SEM) characterization. Some of the physical characteristics of the sludge (e.g. high proportions of fine particles, and high liquid and plastic limits) as well as the relatively high organic matter content, suggested from the beginning that the incorporation of WTP sludge in soil-cement bricks should be done in small proportions. In effect, the trials carried out with bricks that were prepared with different proportions of soil, cement and sludge showed that the higher the sludge fraction the lesser the bricks mechanical resistance. The results also indicated that Brazilian standard of 2,0 MPa mechanical resistance for soil-cement bricks with no structural function would be attained only with mixtures containing 6% of sludge (partially replacing the soil) and a minimum of 15% of cement. It is suggested that further experiments should look at solutions that make it possible to add higher fractions of sludge, turning soil-cement-sludge bricks a more attractive option from the economic point of view.

1. INTRODUÇÃO

O tratamento da água, principalmente aquela captada em cursos d'água superficiais, é praticamente indispensável para a garantia da qualidade adequada ao consumo humano, atendendo ao padrão de potabilidade especificado em norma do Ministério da Saúde – a Portaria MS nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011).

A maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs) em operação no Brasil utiliza o tratamento em ciclo completo, também denominado convencional, para o tratamento da água captada em cursos d'água superficiais. Essa técnica de tratamento incorpora o condicionamento químico da água (coagulação) com vistas à otimização de etapas de separação de fases líquido-sólido (decantação, ou, alternativamente, flotação, e filtração); gera, portanto, resíduos (lodo de decantador e água de lavagem de filtros) onde são concentradas partículas em suspensão ou em dispersão coloidal, microrganismos e compostos químicos presentes na água bruta, além de compostos químicos incorporados ao tratamento, como os agentes coagulantes (geralmente sais de alumínio ou ferro e, eventualmente, polímeros), alcalinizantes ou acidificantes para controle do pH, quando necessário.

De forma ambientalmente incorreta, esses resíduos têm sido lançados nos corpos d'água mais próximos à estação, comprometendo as características da água, podendo causar assoreamento do corpo d'água e prejudicar a biota local. De acordo com Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2008, 99% do total de 5564 municípios brasileiros contavam com serviço de abastecimento de água por rede geral de distribuição, dos quais 57% captavam água de mananciais superficiais, 51% empregavam o tratamento convencional e 38% reportavam geração de lodo no processo de tratamento de água, sendo que o destino do lodo era assim informado: rio (67%), mar (0,4%), “terreno” (23%), aterro sanitário (4%), incineração (0,05%) e “reaproveitamento” (6%) (IBGE, 2010).

Não existe no Brasil regulamentação específica para o tratamento, manejo e destino de resíduos de ETA, mas o lodo é classificado como resíduo sólido pela NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) e, portanto deve ser tratado e disposto como tal; além disso, o lançamento de qualquer efluente em corpos receptores deve obedecer aos padrões especificados na Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005).

Assim, o manejo (tratamento e destinação final) do lodo e da água de lavagem de filtros é algo a ser reconsiderado nas ETAs. Algumas opções de disposição do lodo de ETA vêm sendo estudadas, como: disposição em aterros, tratamento em conjunto nas estações de tratamento de esgoto, aplicação no solo, incorporação em materiais de construção ou de cobertura de aterros sanitários. A disposição final em aterro sanitário mantém a perspectiva do 'resíduo a ser descartado' e representa mais um resíduo para ser acondicionado em aterros sanitários, muitas vezes já saturados ou próximos da saturação. O aproveitamento é, em princípio, de todo interessante, mas, como visto nas estatísticas citadas da PNSB, ainda pouquíssimo exercido. A incorporação em materiais de construção é particularmente interessante, dadas as características do lodo (semelhantes à de algumas matérias-primas convencionais utilizadas na construção civil) e a alta capacidade do setor da construção em absorver resíduos (devida à heterogeneidade típica das matérias-primas utilizadas para fabricação dos materiais de construção). O aproveitamento em materiais tais como cerâmica vermelha, concreto e argamassa é tema já relativamente bem explorado (ver, por exemplo, SALES e CORDEIRO, 2001; INGUNZA *et al.*, 2006), mas nem tanto com o objeto específico da presente proposta: em tijolos de solo-cimento (ex.: SILVA, 2009, 2011).

Paralelamente ao apelo de preservação ambiental associado ao aproveitamento do resíduo, a incorporação em materiais de construção pode contribuir também para o equacionamento do problema do déficit habitacional brasileiro. Segundo dados de pesquisa elaborada pela Fundação João Pinheiro

para o Ministério das Cidades (BRASIL, 2011), em 2008, o déficit habitacional estimado no Brasil correspondia a 5,546 milhões de domicílios, dos quais 4,629 milhões, ou 84%, estariam localizados nas áreas urbanas e 37% na região Sudeste. As desigualdades sociais aliadas à elevada concentração demográfica nos centros urbanos, configuram o cenário atual de falta de moradias e outros problemas relacionados. Isso tem levado pesquisadores a resgatar ou criar técnicas e materiais que possam oferecer soluções apropriadas para construção de habitações de interesse social, como, por exemplo, a utilização do solo-cimento sob a forma de tijolos ou blocos prensados e não queimados.

O tijolo de solo-cimento constitui opção particularmente interessante para habitações de interesse social, com vantagens tais como: (i) produção no local com o solo disponível, o que reduz ou elimina custos de transporte; (ii) regularidade de formas, requerendo argamassas de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme; (iii) dispensa do uso de revestimento, desde que protegido da ação direta da água; (iv) não necessita combustível na fabricação e dispensa a queima; e (v) não requer mão de obra especializada. Pelas próprias características do material e do processo de fabricação (solo como matéria-prima principal abundante e não poluidora, e ausência de queima), os tijolos de solo-cimento constituem em si uma opção que vai ao encontro das premissas de conservação ambiental. Além disso, muitos pesquisadores têm explorado o potencial dessa matriz em absorver resíduos (DALLACORT *et al.*, 2002; FERRAZ, 2004; SOUZA *et al.*, 2008; DESTEFANI, 2009; LIMA, 2010), o que aumenta o apelo ambiental (ao preservar jazidas naturais de solo, se o resíduo vier em substituição ao solo) e pode apresentar vantagens técnicas e econômicas, como aumento da resistência do bloco e diminuição do consumo de cimento (redução de custos).

Em suma, frente à potencialidade do setor de materiais de construção em absorver resíduos e visando conciliar uma solução ambiental a ações sociais (desenvolvimento de material para a construção de habitações de interesse social), o presente trabalho pretendeu avaliar a incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Água da Universidade Federal de Viçosa (ETA UFV) em solo-cimento, mais especificamente na produção de tijolos maciços para

uso como componente de alvenaria de vedação. Ressalte-se que a ETA UFV se enquadra dentre aquelas (a maioria) que não dão destinação adequada aos resíduos, lançando-os *in natura* no Ribeirão São Bartolomeu a jusante do ponto de captação de água para abastecimento da estação de tratamento. Sendo assim, a proposta aqui apresentada tem ainda a perspectiva de contribuição para superação de um passivo ambiental específico.

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS

Hipótese

O lodo do decantador da ETA UFV incorporado, em proporção adequada, à mistura de solo-cimento para fabricação de tijolos maciços em prensa manual, não compromete a qualidade dos tijolos para uso como componente de alvenaria de vedação.

Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV na fabricação de tijolos maciços de solo-cimento com qualidade, como proposta de destino final do resíduo, além de contribuir com o desenvolvimento de novos materiais para a construção de habitações de interesse social.

Objetivos Específicos

- Caracterizar o lodo do decantador da ETA UFV e o solo quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e outras de interesse para fins de uso na confecção de tijolos maciços de solo-cimento.
- Verificar a influência da umidade da mistura na resistência à compressão e absorção de água dos tijolos.
- Avaliar o traço solo-cimento-lodo mais adequado, visando atender aos requisitos da norma brasileira para tijolos de solo-cimento (NBR 8491), com a maior utilização de lodo possível.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Clarificação da água e geração de resíduos em ETAs convencionais

A maioria das ETAs brasileiras utiliza a técnica de tratamento convencional (ou em ciclo completo) com vistas à clarificação e desinfecção de água captada em mananciais superficiais (IBGE, 2010). A clarificação visa, essencialmente, à remoção de partículas em suspensão ou em dispersão coloidal (responsáveis pela turbidez da água) e de compostos em solução, incluindo substâncias húmicas (responsáveis pela cor). A desinfecção tem por objetivo a inativação de microrganismos patogênicos.

Em uma ETA convencional, as operações unitárias envolvidas na clarificação da água são: coagulação, floculação, decantação (ou flotação) e filtração. A coagulação é a desestabilização eletrostática de partículas coloidais (com diâmetro entre 0,1 e 0,001 μm) pela adição de agentes químicos coagulantes à água, sendo que os mais utilizados são: sulfato de alumínio, policloreto de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico. Essas partículas desestabilizadas passam a não mais se repelirem, permitindo a aproximação e aglomeração, sendo posteriormente removidas da fase líquida por sedimentação (ou flotação) e filtração.

Os fenômenos envolvidos no processo de coagulação são de natureza química e física. Os químicos são decorrentes da reação do coagulante com a água e a consequente formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e do precipitado de hidróxido do metal (ferro ou alumínio), e dependem da concentração do metal e do pH da mistura. Os fenômenos físicos influem no transporte das espécies químicas recém formadas, para que haja o contato com as impurezas presentes na água e a desestabilização eletrostática ou o arraste de partículas (hidróxido precipitado).

A fase de floculação tem a função de promover a aglomeração das partículas coloidais desestabilizadas. Isso é induzido pelos movimentos devidos aos gradientes de velocidade criados na água por fenômenos hidráulicos

(floculadores hidráulicos) ou por meios mecânicos, como pás giratórias (floculadores mecânicos). Na floculação, as partículas coaguladas ganham maiores dimensões e peso suficiente para serem removidas nas etapas subsequentes – por decantação, pela ação da gravidade, no decantador, e por filtração, nos filtros de areia.

A filtração é um processo de separação sólido-líquido que envolve fenômenos físicos, químicos e, às vezes, biológicos. Consiste em se passar a água, condicionada quimicamente, por um meio poroso. Devido à saturação do meio poroso por impurezas retidas, o processo de filtração é periodicamente paralisado para limpeza dos filtros por retrolavagem, utilizando água já tratada e armazenada na ETA especificamente para este fim.

Assim, para a clarificação da água, são adicionados na unidade de mistura rápida agentes químicos coagulantes ou auxiliares de floculação (por exemplo, polímeros) que promovem, nos floculadores, a formação de flocos com características adequadas para sua posterior remoção nos decantadores e nos filtros. As impurezas retidas nas unidades de decantação (ou flotação) e nos filtros dão origem aos resíduos do tratamento (Figura 3.1).

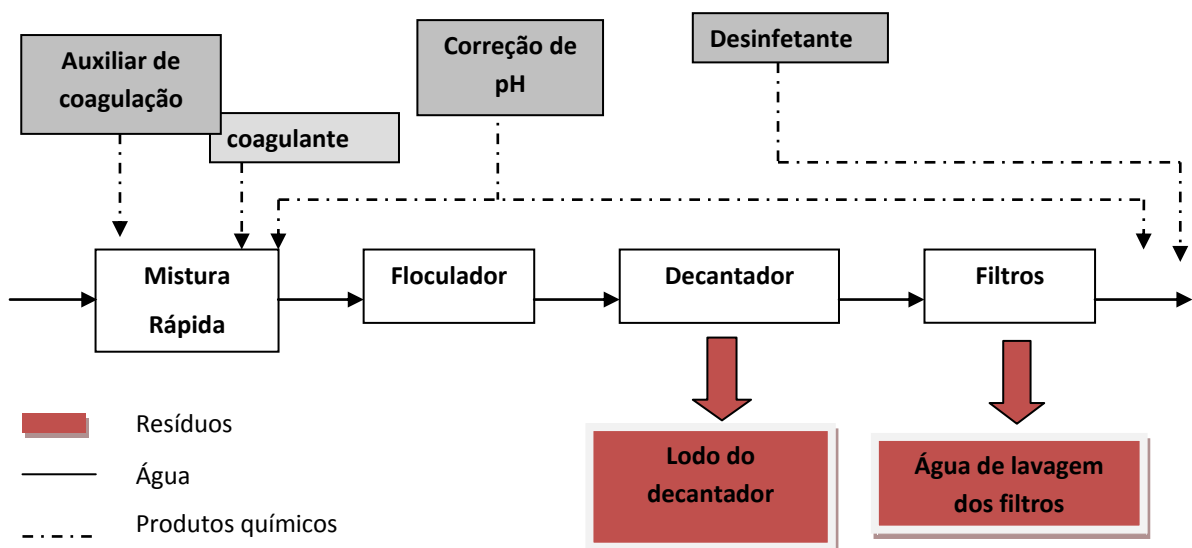


Figura 3.1 – Ilustração esquemática de uma ETA convencional, com indicação de locais de geração dos resíduos.

Fonte: adaptado de Cordeiro (2001).

Em geral, o volume de lodo gerado em ETAs representa de 0,2 a 5,0 % do volume tratado de água (ANDREOLI *et al.*, 2001), e a quantidade de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60 a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, sendo o restante oriundo do processo de filtração. A limpeza dos filtros consome de 4 a 10% do volume de água tratado por dia (Di BERNARDO *et al.*, 1999).

O lodo acumulado no fundo dos decantadores é constituído, basicamente, pelos materiais presentes na água bruta (concentrados no lodo) e por subprodutos da reação dos agentes químicos coagulantes na água (REALI, 1999). A Figura 3.2 mostra um exemplo de lodo acumulado no fundo de um decantador convencional.



Figura 3.2 – Lodo acumulado em decantador convencional.

Fonte: Cordeiro (2002).

O descarte do lodo acumulado no fundo do decantador é feito em periodicidade variada, dependendo do sistema de remoção, se manual ou mecanizado, e do tipo de decantador, se convencional ou de alta taxa. Quando os decantadores convencionais dispõem de remoção mecanizada, o descarte pode ser realizado em intervalos regulares de tempo, de forma semicontínua. Porém, a maioria das ETAs no Brasil não possui sistemas mecanizados, sendo a descarga de lodo realizada por batelada em periodicidade usualmente ampla – meses. Nos

decantadores de alta taxa a remoção é feita em frequência bem menos espaçada, muitas vezes diariamente. Sendo assim, o lodo gerado em decantadores convencionais com remoção mecanizada ou em decantadores de alta taxa é bem menos denso que o de decantadores com remoção não mecanizada (LIBÂNIO, 2010). Por sua vez, a limpeza dos filtros é, geralmente, feita de forma bastante frequente, praticamente cotidiana, e em operações rápidas (cerca de 10 a 20 minutos), porém com utilização de grandes volumes de água tratada (Di BERNARDO *et al.*, 1999).

A quantidade bem como a qualidade do lodo gerado em uma ETA dependem, fundamentalmente, da frequência de limpeza dos decantadores (GRANDIN *et al.*, 1993), da qualidade física e química da água bruta, da qualidade final da água tratada, bem como dos coagulantes e outros produtos utilizados durante o processo de tratamento, sendo o volume de lodo gerado diretamente proporcional à dose de coagulante utilizada (RICHTER, 2001).

Se a ETA já se encontra em operação, a quantificação da geração de resíduos pode ser realizada em campo, nas próprias linhas de geração de resíduos, ou por meio de balanço de massa (SOUZA e CORDEIRO, 2005). No caso da previsão de geração de lodo no projeto de ETAs se pode recorrer a fórmulas empíricas, as quais em geral expressam a produção de sólidos em função das características da água bruta (turbidez e, ou cor) e das doses empregadas de coagulantes e, ou auxiliares de floculação. Saron e Leite (2003) apresentam várias dessas equações, propostas por instituições ou autores de diferentes países, as quais são, entretanto, variantes da formulação genérica expressa na Equação 3.1 (adaptado de KAWAMURA, 1991).

$$M_s = (k_1 D + k_2 T) / 1000 \times Q \times T \quad (3.1)$$

Onde:

M_s = produção de sólidos (kg de sólidos por m^3 de água tratada);

D = dose de coagulante ($mg L^{-1}$);

T = turbidez da água bruta (uT);

Q = vazão de água tratada ($m^3 s^{-1}$);

T = período de acúmulo de lodo (s);

K_1 e K_2 = coeficientes adimensionais da fórmula empírica.

3.2. Tratamento de lodo de ETA

O tratamento de resíduos de ETAs visa, essencialmente, à remoção de água e redução de volume, de forma a facilitar ou mesmo viabilizar o transporte e o destino final. Dependendo do destino final, pode também ser necessária etapa de higienização.

A desidratação do lodo pode ser realizada de forma mecanizada ou não mecanizada. Como opções não mecanizadas podem ser citadas as lagoas de lodo ou os leitos de secagem. Entre as opções mecanizadas estão as centrífugas, os filtros-prensa, filtros a vácuo e prensas desaguadoras.

As características climáticas do Brasil, aliadas aos baixos custos de instalação e operação, favorecem a adoção de sistemas naturais de desaguamento de resíduos de ETAs (REALI *et al.*, 1999).

Os leitos de secagem são construções simples de alvenaria, dotadas de camada suporte, meio filtrante ou drenante (Figura 3.3) (ANDREOLI *et al.*, 2001). Possuem baixo nível de complexidade e fazem uso das condições ambientais (temperatura do ar, vento, umidade relativa do ar, etc.) e da gravidade para o desaguamento do lodo (ACHON e CORDEIRO, 2003). Entretanto, a indisponibilidade de terreno limita seu uso em instalações maiores (RICHTER, 2001).

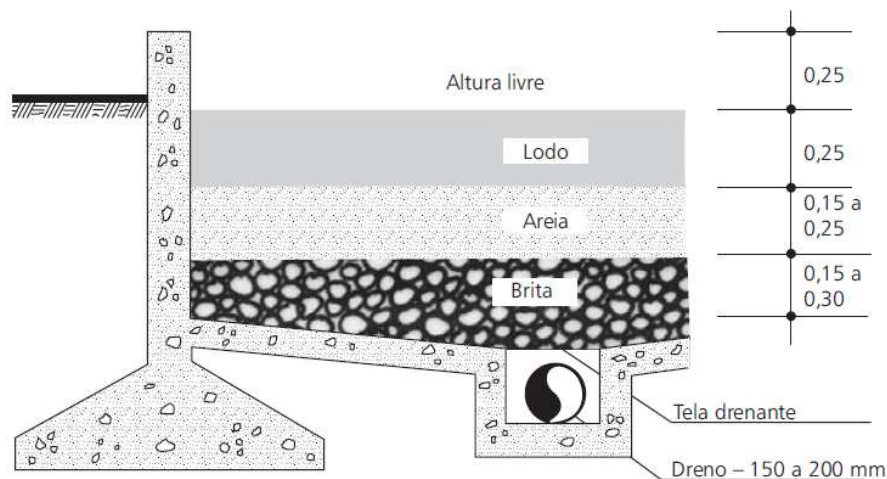


Figura 3.3 – Esquema de um leito de secagem (corte) de lodo de ETA.
 Fonte: Cordeiro (1999).

O emprego desses métodos de desidratação está associado à disponibilidade de grandes áreas para implantação e a condições climáticas favoráveis, à questão de custo e complexidade operacionais, mas também à própria técnica de tratamento da água e às características do lodo gerado na ETA. Os métodos mecânicos requerem lodo com teores mais elevados de sólidos e, assim, pode ser necessária uma etapa de adensamento do lodo prévia à desidratação. Quando a ETA emprega a flotação, o adensamento pode ser dispensável, mas para a maioria dos lodos gerados em decantadores, bem como para a água de lavagem de filtros, não. O adensamento pode ser realizado por gravidade, por flotação por ar dissolvido ou por espessadores mecânicos.

Para melhorar as condições de desidratabilidade dos lodos, bem como da água de lavagem de filtros, pode-se ainda efetuar o condicionamento químico desses resíduos com emprego, por exemplo, de coagulantes ou polímeros (Di BERNARDO *et al.*, 1999). O adensamento pode produzir lodo com até 8% de sólidos, e a desidratação com até 20 a 35%, dependendo se o processo for não mecanizado ou mecanizado. Acima disso, somente com leitos com secagem prolongada ou métodos de secagem térmica (RUSSELL *et al.*, 1996).

A Figura 3.4 ilustra, esquematicamente, opções para o manejo e tratamento de resíduos de ETAs.

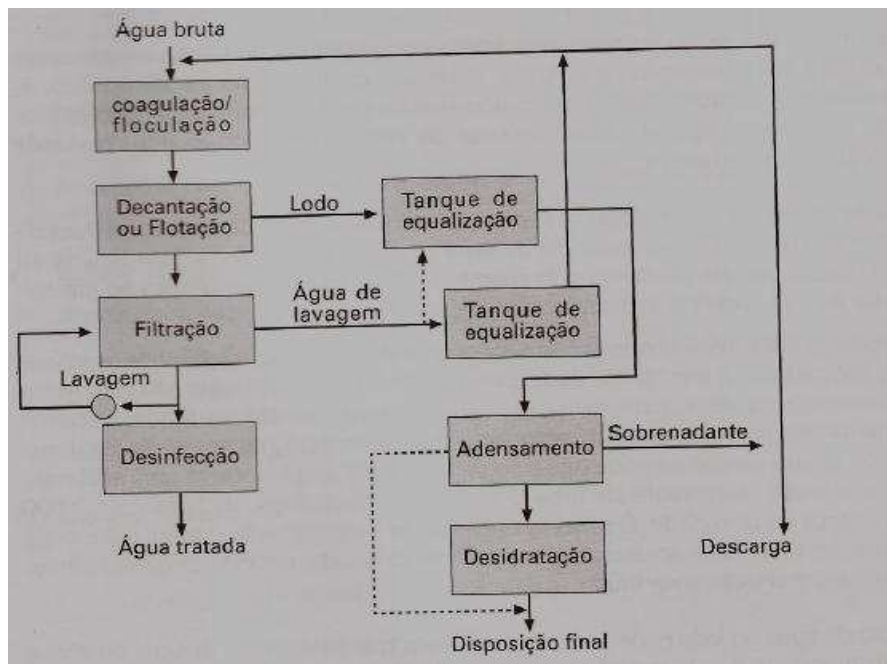


Figura 3.4 – Linhas de geração, tratamento e recirculação de resíduos de ETAs.

Fonte: Richter (2001).

3.3. Características dos lodos de ETA

Cordeiro (2001) sugere que as características de lodos de ETAs podem ser classificadas em ambientais e geotécnicas, segundo o objetivo de uso ou disposição. Ainda segundo Cordeiro (2001), a caracterização geotécnica do lodo permite avaliar possíveis formas de remoção de água e de utilização dos sólidos resultantes, devendo ser analisados parâmetros tais como: tamanho e distribuição das partículas, limite de plasticidade e limite de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento e sedimentabilidade.

Ressalta-se que a maior parcela desse resíduo corresponde à fase líquida. Além disso, as características do resíduo influenciam a remoção de água e conseqüentemente são essenciais para definir os sistemas de redução de volume e viabilizar seu gerenciamento.

A água presente no lodo de ETAs pode ser classificada em água livre, água intersticial ou capilar, água vicinal e água de hidratação (Figura 3.5). A água livre representa a parcela de líquido que se move livremente por gravidade e pode ser removida com certa facilidade. A água intersticial representa a parcela

de líquido intimamente ligada às partículas floculadas e necessita de introdução de energia para ser removida. A água vicinal se encontra fortemente ligada às partículas sólidas através de pontes de hidrogênio e se move juntamente com as partículas, o que explica a necessidade de aplicação de energia mecânica para sua remoção. A água de hidratação é representada por moléculas de água ligadas quimicamente às partículas coloidais e sua remoção só é possível com aplicação de altas temperaturas. As quantidades relativas das diferentes frações de água determinam as características de retenção de água dos resíduos e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de remoção de água (REALI, 1999).

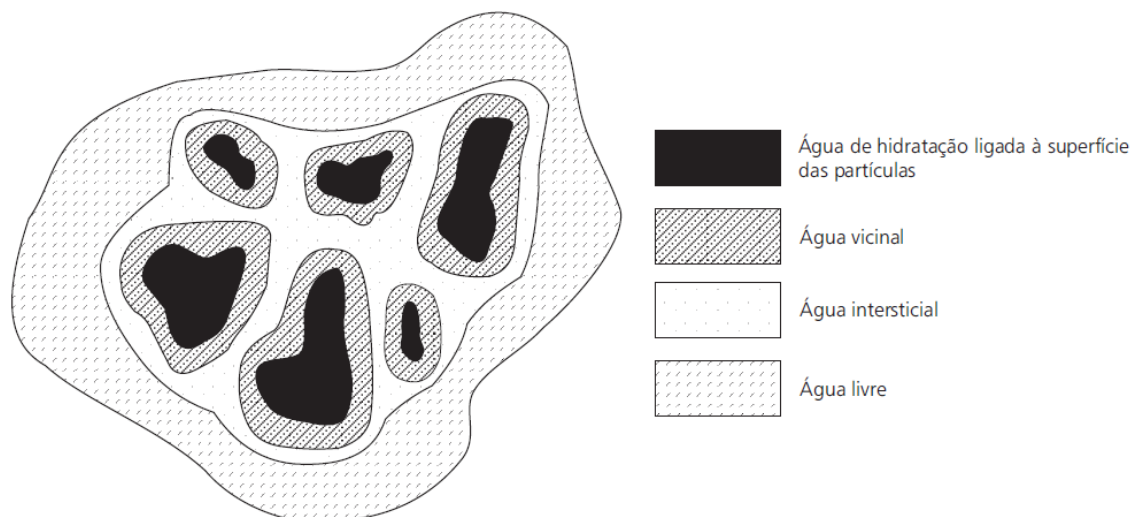


Figura 3.5 – Ilustração das frações de água constituintes dos lodos de ETAs.

Fonte: Smollen e Kafaar (1994).

Segundo Andreoli *et al.* (2001) o baixo conteúdo de sólidos totais, geralmente entre 1.000 e 40.000 mg.L⁻¹ (0,1 a 4%), e alta concentração de hidróxidos metálicos (principalmente de alumínio e ferro), torna o lodo de ETA resistente à desidratação e ao adensamento e altamente compressível. Por conta dessas características, têm sido classificados como um fluido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Geralmente, o teor de matéria orgânica de lodos de ETAs é de 12-25%, a DBO varia entre 30-300 mg.L⁻¹ e a DQO 30-5000 mg.L⁻¹; o teor de sólidos fixos varia entre 35 a 70% e o de sólidos voláteis entre 15 a 25% (RICHTER, 2001). Ou seja, predomina a matéria inorgânica sobre a orgânica e o lodo apresenta baixa biodegradabilidade.

A massa específica varia de acordo com o conteúdo de sólidos no lodo, ou seja, com seu estágio de desidratação: desde 1002 Kg.m⁻³ para lodos com teor de sólidos de 1%, até 1.236 Kg.m⁻³ após desidratação e com teor de sólidos de 30%.

O potencial tóxico dos resíduos de ETA depende da presença de substâncias tóxicas na água bruta, da composição e impureza dos coagulantes e outros produtos químicos utilizados no tratamento da água, de reações ocorridas durante o processo de tratamento, da forma e tempo de retenção dos resíduos (BARROSO e CORDEIRO, 2001). Assim, essa é uma questão específica de cada água e ETA e deve ser analisada caso a caso.

Quando o coagulante primário utilizado é um sal de alumínio, os resíduos dos decantadores podem ter em sua composição grandes quantidades de alumínio. Segundo Cordeiro (1999), esse material, quando disposto em rio com baixa velocidade ou lagos, poderá causar problemas, principalmente à camada bentônica e a pequenos peixes. Ainda segundo Cordeiro (1999), o lodo de sulfato de alumínio apresenta coloração marrom, viscosidade e consistência que lembram chocolate líquido, e é de difícil sedimentação ou flotação em seu estado natural. Segundo Richter (2001), a aparência do lodo de sulfato de alumínio varia em função da concentração de sólidos: aparência líquida com concentrações de 0-5% (ou seja, em estado natural, acumulado em decantadores); esponjoso ou semi-sólido com 8-12% (lodo adensado) e argila ou barro suave com 18-25% (lodo seco).

3.3.1. Granulometria

Para a análise granulométrica do lodo têm sido utilizados ensaios consolidados para determinação da fração granulométrica de solos, podendo ser feita por:

peneiramento (no caso de material granular como areia e pedregulho), por sedimentação (no caso de material argiloso), pela combinação de ambos, ou por difração a laser (SOARES *et al.*, 2006). Entretanto, alguns autores (SARTORI e NUNES, 2000; BARROSO, 2007) têm chamado atenção para o fato de que a constituição e o comportamento físico dos lodos de ETA afastam esse material dos modelos tradicionalmente usados na Geotecnia, e concluem pela inadequação dos ensaios rotineiros de solos. Sartori e Nunes (2000) citam como grande dificuldade na caracterização dos lodos de ETA, a desagregação do material quando seco. Barroso (2007) ressalta que a metodologia convencional pode apresentar problemas de tendência à aglomeração.

Ao estudar a utilização de diferentes métodos de preparo de amostras para a determinação da granulometria de solos loess, Lu e An (1998) encontraram grandes diferenças nos resultados, sugerindo que, dependendo do método empregado, a leitura do valor do diâmetro das partículas finas pode aumentar cinco vezes, enquanto o das partículas grosseiras diminuir mais de 100 vezes. Os autores concluíram que dentre os métodos estudados, os que apresentaram melhores resultados foram os que incluíam o tratamento em banho ultrassônico.

Assim, resultados de análises granulométricas de lodos de ETAs nem sempre serão prontamente comparáveis e sua interpretação requer a explicitação da técnica empregada. Na Tabela 3.1 são apresentados resultados de diversos trabalhos, empregando os métodos propostos na NBR 7181 (ABNT, 1984) (SARTORI e NUNES, 2000; SANTOS *et al.*, 2000; CORDEIRO, 2002; DIAS *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2004; ANDRADE, 2005; WOLFF *et al.*, 2005; MARGEM *et al.*, 2007; PAIXÃO *et al.*, 2008; PORRAS *et al.*, 2008; FADANELLI e WIECHETECK, 2010) e pela EMBRAPA (1979) (TEIXEIRA *et al.*, 2002; SOUZA, 2010).

Tabela 3.1 – Distribuição granulométrica de lodos de ETA obtida com os métodos de análise da NBR 7181 (ABNT, 1984)

Referência	Pedregulho	Areia			Silte	Argila
		Fina	Média	Grossa		
Margem <i>et al.</i> (2007) ⁽¹⁾	0%	13%	4%	3%	50%	30%
Santos <i>et al.</i> (2000)	0%	21%	58%	0%	15%	6%
Sartori e Nunes (2000) ⁽²⁾	0%	4%	0,4%	0%	58%	38%
Oliveira <i>et al.</i> (2004) ⁽²⁾	0%		14%		41%	45%
Dias <i>et al.</i> (2004) ⁽²⁾	0%	8-18%	24-43%	0%	4-19%	34-49%
Porras <i>et al.</i> (2008) ⁽²⁾	0%	5-22%	12-21%	2-60%	15-66%	0-10%
Andrade (2005) ⁽²⁾	0%	21%	2%	11%	34%	32%
Tartari (2008) ⁽²⁾	0%		73%		22%	5%

(1)Classificação USCS ou Unificada; (2)classificação ABNT (NBR 6502).

Analisando as distribuições granulométricas apresentadas na Tabela 3.1 nota-se a composição predominantemente fina (frações silte e argila) e a variabilidade entre as composições. Sugere-se que esta diferença na composição granulométrica dos diferentes lodos possa estar associada, além de outros fatores (características do solo do manancial de captação, tipo da captação, etc.), a dificuldades na desagregação, individualização das partículas e, assim, determinação das quantidades correspondentes a cada fração do material. Isso devido ao comportamento diferenciado do lodo em relação a um solo e uso de metodologias específicas para solos (BARROSO, 2007).

3.3.2. Limites de Liquidez e de Plasticidade

A plasticidade é a propriedade de alguns materiais, como os solos finos, de serem submetidos a grandes deformações permanentes sem sofrer ruptura,

fissuramento ou variação de volume apreciável (ABNT, 1982). A plasticidade de um solo argiloso está relacionada à forma de suas partículas e é uma característica do argilo-mineral existente no solo (SOARES *et al.*, 2006).

O limite de liquidez (LL) de um solo é o teor de umidade que separa o estado de consistência líquido do plástico e para o qual o solo apresenta pequena resistência ao cisalhamento. O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade mínimo, no qual a coesão é pequena para permitir deformação, porém, suficientemente alta para garantir a manutenção da forma adquirida. O índice de plasticidade (IP) representa a quantidade de água que seria necessário acrescentar a um solo para que este passasse do estado plástico ao líquido (SOARES *et al.*, 2006).

Na Tabela 3.2 são apresentados resultados de LL e LP e IP de lodos de ETAs obtidos por diversos autores (SARTORI e NUNES, 1997; SANTOS *et al.*, 2000; DIAS *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2004; TARTARI, 2008; WOLFF *et al.*, 2005; FADANELLI e WIECHETEC, 2010; SOUZA, 2010), determinados com base nas normas NBR-6459 (ABNT, 1984) e NBR-7180 (ABNT, 1984).

Tabela 3.2 – Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índices de Plasticidade (IP) de lodos de ETA, determinados com base nas normas NBR 6459 e NBR 7180

Referência	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Santos <i>et al.</i> (2000)	44	28	16
Sartori e Nunes (2000)	60	44	16
Fadanelli e Wiechetec (2010)	75	71	5
Wolff <i>et al.</i> (2005).	79	57	22
Oliveira <i>et al.</i> (2004)	73	53	20
Dias <i>et al.</i> (2004)	55- 69	40-51	-
Souza (2010)	66	48	18
Tartari (2005)	63	55	7

Pesquisadores como Margem *et al.* (2007) e Andrade (2005) observaram comportamento não plástico do lodo. Por sua vez, Oliveira *et al.* (2004) classificaram um lodo de ETA como pertencente ao grupo de siltes inorgânicos de alta compressibilidade. Tartari (2008) salienta que a presença de quartzo no lodo estudado influenciou na diminuição da plasticidade, devido a estrutura e comportamento do mineral que interfere na orientação dos argilominerais, o que o torna matéria-prima arenosa e siltosa, não plástica ou desplastificante.

3.3.3. Composição química e mineralógica

As características químicas de lodos de ETAs interferem mais na disposição final e nos estudos de reaproveitamento do que nos processos de manejo, adensamento e desaguamento (ASCE e AWWA, 1996).

A determinação da composição química de lodos de ETA importa para efeito de comparação com materiais afins tradicionalmente utilizados em aplicações tais como, argamassa, cimento, cerâmica vermelha (por exemplo, telhas e tijolos) ou cerâmica artística. Importa também desde o ponto de vista de impactos ambientais e risco à saúde humana, nesse caso em relação à presença de elementos tóxicos. Em análise de metais feita por Cordeiro (1993) no lodo da ETA do município de São Carlos - SP, foi observado que a concentração de metais predomina na fração sólida do lodo.

Sílica, alumínio e ferro são elementos dos mais abundantes em solos e sais de alumínio e ferro são coagulantes de ampla utilização em tratamento de água. Assim sendo, estes elementos tendem também a se fazer presentes em grandes proporções em lodos de ETAS e em formas variadas, tais como óxidos de hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas (ANDREOLI *et al.*, 2006). Segundo Portella *et al.* (2003), os principais elementos detectados em lodos de ETA são os óxidos de: alumínio (Al_2O_3), silício (SiO_2), ferro (Fe_2O_3), titânio (TiO_2), magnésio (MgO), cálcio (CaO), sódio (Na_2O), potássio (K_2O) e pentóxido de difósforo (P_2O_5).

Tartari (2008) verificou que os óxidos majoritários (74%) na composição do lodo foram: SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Margem *et al.* (2007) associaram a presença

de Al_2O_3 , SiO_2 , e Fe_2O_3 à de aluminossilicatos, quartzo e hematita, enquanto outros óxidos foram associados à impurezas presentes na estrutura da argila. Ainda segundo esses autores, o elevado teor de Al_2O_3 estaria associado à presença de caulinita, de gibsitita (hidróxido de alumínio – $\text{Al}(\text{OH})_3$) e em menor quantidade, à utilização de sulfato de alumínio na ETA estudada.

Wolff *et al.* (2005), estudando a composição química do lodo da ETA de uma empresa no interior de Minas Gerais, identificaram altos teores de O, Al e Si, teores menores de Fe e Ti, e traços de Cu, Ni, Cr, Mn, Cl, Ca, K, P, Mg e Na.

Nestes e em outros estudos, dependendo dos objetivos, a caracterização química foi realizada com recursos variados em termos de técnicas analíticas: fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDS) (OLIVEIRA *et al.*, 2004; MARGEM *et al.*, 2007; VITORINO *et al.*, 2009); espectrometria de fluorescência de raios X (SANTOS *et al.*, 2000; HOPPEN *et al.*, 2005b; JUNIOR *et al.*, 2006; WOLFF *et al.*, 2005; PAIXÃO *et al.*, 2008; FADANELLI e WIECHETEC, 2010); espectrofotometria de absorção atômica (PORTELLA *et al.*, 2003), difratometria de raios X (SANTOS *et al.*, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2004; ANDRADE, 2005; HOPPEN *et al.*, 2005a; WOLFF *et al.*, 2005; TEIXEIRA *et al.*, 2006; MARGEM *et al.*, 2007; TARTARI, 2008; PAIXÃO *et al.*, 2008).

A difratometria de raios-X constitui uma das principais técnicas de caracterização estrutural de materiais cristalinos. Ao atingirem o material, os raios-x podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia. O fóton de raios-x após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo a mesma fase do fóton incidente. Como os átomos dos cristais do solo estão arranjados sistematicamente, é possível observar os efeitos da difração de raio-x em vários ângulos, onde ocorrem interferências construtivas.

Utilizando essa técnica, Margem *et al.* (2007) analisaram a presença de minerais em amostras de lodo nas três frações granulométricas (areia, silte, argila), observando forte presença de caulinita, além de serem detectadas as fases cristalinas de gibsitita, muscovita, goethita e quartzo.

Ao estudarem a composição mineralógica de lodo de ETA, Santos *et al.* (2000) constataram a presença de quartzo (SiO_2), argilominerais do grupo das caulinitas ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), de feldspato e traços de hematita (Fe_2O_3).

Wolff *et al.* (2005) constaram a predominância de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e quartzo (SiO_2), e a ocorrência de hematita (Fe_2O_3), gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e rutilo (TiO_2) no lodo (Figura 1.15). Teixeira *et al.* (2006) obtiveram resultados semelhantes ao constatar a presença de caulinita e mica (principais argilominerais presentes), além das fases montmorilonita, quartzo, óxido de titânio e gipsita.

Oliveira *et al.* (2004) verificaram picos de difração característicos das fases cristalinas referentes à caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sílica (SiO_2) e gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), e ainda indícios da presença da mica moscovita detectada por picos menos intensos. Hoppen *et al.* (2005a) identificaram mulita, silimanita, sílica, caulinita, magnetita, silicatos de Al e Fe, e hematita. Junior *et al.* (2006) identificaram quartzo, caulinita e montmorilonita. Paixão *et al.* (2008) identificaram a presença de gipsita, goetita, hematita e sulfato de alumínio hidratado. Vitorino *et al.* (2009) verificaram a presença de quartzo, mica e caulinita. Andrade (2005) constatou a presença de quartzo, goethita, hematita, caulinita, muscovita, ilita e calcita. Tartari (2008) identificou como principais componentes do lodo o quartzo, a caulinita e a hematita.

Enfim, todos esses trabalhos revelam composição químico-mineralógica de certa forma semelhante entre as diversas amostras de lodo analisadas, e que pode ser considerada similar à de argilas utilizadas no setor industrial de cerâmica vermelha (OLIVEIRA *et al.*, 2004; MARGEM *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2006).

3.4. Aproveitamento do lodo de ETA em materiais de construção

O aproveitamento de lodos de ETA dá a esse material conotação de matéria-prima para fins produtivos. Tem, portanto, apelo econômico e ambiental, ao

agregar valor a um material visto como mero resíduo a ser descartado, de forma nem sempre controlada no ambiente. Além disso, a utilização do lodo de ETA na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, tais como: redução no consumo de recursos naturais não renováveis, redução das áreas destinadas para aterros e redução da poluição.

Como dito na introdução, a incorporação do lodo de ETA em materiais de construção é particularmente interessante, devido às características tanto do resíduo (composição semelhante às matérias-primas convencionais) quanto do material (heterogeneidade das massas). Os principais materiais de construção que vêm sendo estudados com tal finalidade são: materiais cerâmicos para produção de telhas e tijolos, e concreto para produção de contrapisos e blocos sem função estrutural. Outra matriz possível de absorver o lodo de ETA, porém ainda pouco explorada, é a de solo-cimento (SILVA, 2009; SILVA 2011). A seguir, são feitas algumas considerações, com base em resultados de trabalhos sobre a incorporação do lodo de ETA na produção dos materiais de construção citados, substituindo parcialmente a matéria-prima principal.

Devido à composição física, química e mineralógica semelhante às das argilas caulínicas usadas nas massas de cerâmica vermelha (OLIVEIRA *et al.*, 2004; WOLFF *et al.*, 2005; MARGEM *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2006; PAIXÃO *et al.*, 2008), a indústria desse material é altamente promissora para receber lodos de ETA. Porém, a incorporação de lodo pode levar a alterações importantes nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica, devendo ser analisada a proporção de incorporação que não comprometa a qualidade das peças (MARGEM *et al.*, 2006). Isso decorre do fato dos lodos de ETA apresentarem, geralmente, valores de limite de plasticidade e de perda ao fogo muito acima da faixa recomendada para cerâmica vermelha (OLIVEIRA *et al.*, 2004; UENO e LEITE, 2007). Além disso, o tamanho e a distribuição das partículas do resíduo podem afetar de forma expressiva a resistência mecânica das cerâmicas (PAIXÃO *et al.*, 2008). Geralmente, proporções de incorporação de lodo de até 10%, não comprometem a qualidade dos materiais cerâmicos (DIAS *et al.*, 2004; TARTARI, 2008).

O teor de matéria orgânica pode ser uma variável limitante para a utilização de lodos de ETA em massas cerâmicas, pois teores elevados podem provocar trincas na secagem e na queima, por contração, além de defeitos como eflorescência e coração negro (núcleo preto) (VITORINO *et al.*, 2009). Porém, o teor de matéria orgânica no lodo pode apresentar grandes variações em função de características locais.

Outra opção de aproveitamento de lodo de ETA no setor cerâmico é a incorporação a massas cerâmicas para confecção de peças artísticas decorativas e utilitárias, em substituição parcial à argila utilizada. Como as peças não apresentam grandes exigências estruturais e não estão submetidas à normatização, acredita-se que seja possível incorporar maior quantidade de resíduo nesta matriz (POZZOBON *et al.*, 2009).

Pozzobon *et al.* (2010c) constataram que é possível incorporar até 15% de lodo de ETA à massa cerâmica artística sem prejuízos das características de interesse das peças. Identificou-se ainda que a incorporação de lodo à massa cerâmica confere uma coloração diferenciada às peças sinterizadas em comparação com peças produzidas sem a adição de lodo, o que pode ser explorado no uso artesanal. Entretanto, foi verificado que lodo deve ser submetido a tratamento prévio (secagem e moagem), uma vez que o lodo *in natura* favorece a ocorrência de defeitos nas peças sinterizadas. Através de ensaio de lixiviação, identificou-se também que peças cerâmicas contendo lodo podem ser impróprias para a confecção de utensílios que fiquem em contato com alimentos ou bebidas, sendo, portanto, mais adequado o uso do lodo em peças decorativas.

A incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto para a produção de materiais de construção, isoladamente ou em conjunto com resíduos da construção e demolição, tem sido estudada no intuito de substituir os agregados naturais (areia e brita). Essencialmente, o lodo de ETA visa substituir o agregado miúdo (areia) (HOPPEN *et al.*, 2006), cujas principais funções são de capacitar o concreto a adquirir as mais variadas formas e de resistir à esforços físicos (MOURA, 2000).

Além de ser uma opção ambientalmente correta, objetiva-se economia na produção do concreto pela diminuição de consumo de areia, brita e cimento (SALES *et al.*, 2004; HOPPEN *et al.*, 2006). Segundo Andreoli (2001) os custos da argamassa de assentamento podem ser reduzidos em até 21% pela substituição da matéria-prima por resíduos da construção civil e lodo de ETA.

Hoppen *et al.* (2005a), avaliando a incorporação do lodo em concreto, concluíram que, em geral, o lodo piorou as propriedades do material devido à presença elevada de finos em sua constituição que apresentam maior superfície específica que a areia substituída, o que aumentou a absorção de água e reduziu a trabalhabilidade do concreto. Porém, traços com até 5% de lodo podem ser aplicados em situações diversas, desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto (como placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos) até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido) (HOPPEN *et al.*, 2005a). Já a utilização de misturas com teores de lodo acima de 5% ficaria restrita a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial, como contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas, calçadas e pavimentos residenciais (HOPPEN *et al.*, 2006).

Diferentemente das outras formas de aproveitamento no setor da construção civil expostas acima (incorporação em concreto e em cerâmica), como dito, a incorporação do lodo de ETA em matriz de solo-cimento é ainda pouco explorada. A seguir são apresentados alguns estudos que avaliaram a aplicação de lodo de ETA em solo-cimento, em conjunto ou não com outros resíduos.

Em trabalho desenvolvido por Porras *et al.* (2005), avaliou-se a viabilidade da utilização do lodo de ETA conjuntamente com agregado reciclado de resíduo da construção civil na fabricação de tijolos estabilizados com cimento. Testou-se ainda a incorporação do lodo com diferentes teores de umidade (0%, 50%, 70 a 74% e 75 a 80%), sendo que só foi possível produzir os tijolos com teor de umidade do lodo abaixo de 50%. Reforça-se, assim, a importância do adequado tratamento/condicionamento do lodo para possibilitar seu

aproveitamento. Nenhum tijolo produzido nas condições dos experimentos de Porras *et al.* (2005) atendeu simultaneamente à todos os requisitos de qualidade da norma brasileira – dimensões, absorção de água e resistência a compressão (NBR 8491- ABNT, 2012).

Pereira (2008) estudou o potencial de aproveitamento do lodo da ETA de Cubatão-SP na produção de componentes construtivos estruturais estabilizados e prensados a frio. O objetivo foi a substituição do solo pelo lodo, produzindo tijolos apenas com lodo e um estabilizante. Neste caso, assim como constatou Porras *et al.* (2006), a umidade inicial do lodo limitou ou impossibilitou seu uso, devendo este ser seco e destorroado para a produção dos tijolos. Os resultados do estudo de Pereira (2008), em escala de laboratório, indicaram a possibilidade de fabricação dos elementos construtivos estruturais prensados a frio com o lodo seco e destorroado, com porcentagem de média (8 e 12%) a baixa de cimento (4%), sendo que neste último caso outros agentes aglomerantes foram adicionados (glutaraldeído+silicato), promovendo a coesão das partículas e aumento da resistência. Os corpos de prova apresentaram resistência a compressão simples de até 6,5 MPa para a mistura Lodo+Si+Glu+Ci e de até 9,2 MPa para misturas de lodo e cimento. O estudo de Pereira (2008) demonstrou o potencial de produção de componentes de alvenaria estrutural utilizando o lodo de ETA, porém, devido ao reduzido número de ensaios e em escala laboratorial, essa aplicação (produção de tijolos para alvenaria estrutural) deve ser investigada com maior rigor, em escala real.

Silva (2009) estudou a incorporação de lodo em solo-cimento-cal, testando percentuais de incorporação 3, 5, 8 e 10%. Segundo o autor, a cal foi adicionada com o objetivo de neutralizar a ação da matéria orgânica presente no solo e no lodo e corrigir o pH do compósito, pois o cimento não reage bem em pH baixo. Os tijolos foram fabricados em prensa manual, com umidade da massa próxima a umidade ótima definida em ensaio de compactação de solos. Apenas os tijolos produzidos com até 5% de lodo atenderam as exigências da norma brasileira para tijolos de solo-cimento (NBR 8491 - ABNT, 2012).

Silva (2011) estudou a utilização do lodo de ETA e cinzas leves de carvão provenientes de termoelétricas para a fabricação de tijolos ecológicos de solo, cimento e resíduos. Tijolos com proporções mássicas cinza:lodo:solo:cimento de 8:20:60:12 atenderam aos requisitos mínimos da norma brasileira quanto a resistência a compressão e absorção de água. Observa-se que o teor de cimento para o traço tido como adequado na pesquisa de Silva (2011) é considerado um pouco alto para solo-cimento, devendo, portanto, serem avaliados o custo e a viabilidade econômica de produção desses tijolos.

3.5. Tijolos de solo-cimento

3.5.1. Solo-cimento como material de construção

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986), solo-cimento é o produto resultante da mistura íntima de solo, cimento Portland e água, que compactados na umidade ótima e sob a máxima massa específica seca, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento. O cimento entra em quantidades que variam de 5% a 10% da massa do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir-lhe as propriedades de resistência desejadas. A adição de cimento ao solo permite produzir um material com algumas vantagens, como aponta Grande (2003): (i) a absorção e perda de água não causam variações volumétricas consideráveis; (ii) o material não se deteriora quando submerso em água; (iii) aumento da resistência a compressão; e (iv) maior durabilidade devida a menor permeabilidade.

Por ser um material abundante e de fácil obtenção na natureza, desde os primórdios da humanidade o solo vem sendo utilizado para construir abrigos contra as adversidades do meio ambiente. Como relata Lima (2010), há mais de 3.000 anos solos melhorados já eram usados na construção de templos na Babilônia. O uso de solos pode ser visto em edificações as mais diversas, desde grandes construções como a muralha da China com aproximadamente 3.000 km de extensão, até habitações simples como as de Taos Pueblo no Novo México, apontada pela UNESCO como uma das favelas mais antigas do mundo e patrimônio mundial. No Brasil, cidades como Ouro Preto, Diamantina

e Paraty têm em comum cerca de 400 anos de uso intensivo de técnicas de construção com solo, populares até hoje, como taipa-de-pilão, adobe, e taipa-de-sopapo ou pau-a-pique. Porém, ainda segundo relato de Lima (2010), com o surgimento de um novo material, o cimento Portland, a partir de meados do século XIX, o solo começou a ser visto como material de segunda categoria e passou a ser utilizado quase que exclusivamente nas áreas rurais.

O solo-cimento foi utilizado pela primeira vez em 1915 nos Estados Unidos pelo engenheiro Bert Reno, que pavimentou uma rua com uma mistura de conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland. Porém, somente após 1935, quando a Portland Cement Association (PCA) iniciou pesquisas e estudos nesta área, é que a técnica se consolidou (GRANDE, 2003). No Brasil, de acordo com relato de Souza (2006b), as pesquisas com solo-cimento começaram a ganhar destaque a partir da década de 1930 com a regulamentação de sua aplicação. Em 1941 toda a pavimentação do aeroporto de Petrolina-PE foi feita com solo-cimento e em 1970 a rede pavimentada de solo-cimento no Brasil completou 7.500 km. A partir de 1948 o solo-cimento passou a ser utilizado também na construção de habitações, com a construção de duas casas do Vale Florido, na Fazenda Inglesa em Petrópolis-RJ, e o bom estado de conservação dessas obras após vários anos de utilização atestam a qualidade do produto e da técnica construtiva.

Segundo Segantini e Alcântara (2007), o solo-cimento teve maior utilização a partir de 1960, principalmente em obras de pavimentação, barragens de terra e na fabricação de tijolos e blocos para alvenaria de vedação.

No entanto, o solo-cimento só passou a ser amplamente aplicado em moradias por volta de 1978, quando o extinto BNH (Banco Nacional de Habitação), amparado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento), aprovou a técnica para construções de habitações populares. Estudos feitos na época comprovaram que, além do bom desempenho termoacústico, o solo-cimento aplicado em construções levava a redução de custos de 20% a 40% em relação à alvenaria tradicional de tijolos de barro ou cerâmico (FIQUEROLA, 2004).

Apesar de vantagens como baixo impacto ambiental e redução de custos, no Brasil, o interesse pelo solo-cimento na construção de habitações em substituição às alvenarias convencionais foi desaparecendo na proporção que outros materiais, na maioria dos casos industrializados, surgiam no mercado. Atualmente, sua utilização é mais expressiva em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são de solo-cimento compactado), reforços e melhorias de solos e em barragens e contenções (GRANDE, 2003).

Não obstante, conforme referido no item introdutório deste trabalho, tijolos de solo-cimento constituem opção interessante para a construção civil, particularmente em habitações de interesse social, com atrativos técnico-econômicos associados à fabricação (por exemplo, produção no local e dispensa de queima) e ao próprio uso (por exemplo, regularidade de formas e redução de custos com revestimento), sem comprometimento de qualidade e de propriedades mecânicas, por exemplo, quanto à resistência à compressão (FERRAZ *et al.*, 2000).

Na definição do Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAr, 2005), o tijolo de solo-cimento é uma mistura homogênea de solo, cimento Portland e água em proporções definidas, compactado na umidade ótima para atingir a massa específica máxima.

Como localiza Grande (2003), a fabricação de componentes de alvenaria de solo estabilizado teve sua evolução com a criação da “Prensa [manual] Cinva-Ram” pelo Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento – Cinva em 1961 e, desde então, vários fabricantes desenvolveram prensas manuais e hidráulicas para a fabricação de diversos tipos de tijolos e blocos de solo-cimento compactados (Figura 3.5).



Figura 3.6 – Diferentes tipos de tijolos de solo-cimento, produzidos em prensa.

Fonte: <http://vamosconstruir.com>

3.5.2. Processo de fabricação

Com base no procedimento descrito pela ABCP (1988), a produção de tijolos de solo-cimento envolve as seguintes etapas (Figura 3.6):

- preparação do solo: destorroamento (quebra de torrões) e peneiramento;
- preparação (ou homogeneização) da mistura, manual ou mecanizada (com misturador): espalha-se o cimento no solo preparado, misturando bem até obter coloração uniforme da massa (homogeneização seca); posteriormente e aos poucos, adiciona-se água, misturando novamente até alcançar o teor de umidade desejado (homogeneização úmida);
- moldagem dos tijolos, em prensa manual ou hidráulica; e
- cura e armazenamento.

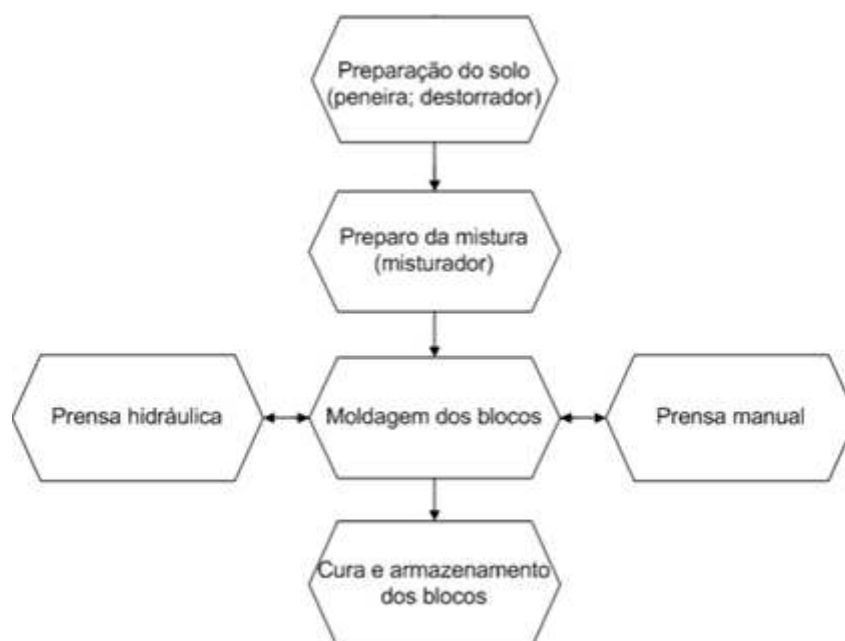


Figura 3.7 – Processo de fabricação de tijolos de solo-cimento.

Fonte: adaptado de Penteado e Marinho (2011).

Pisani (2005) faz algumas recomendações, com base em experiência prática, para a cura e armazenamento dos tijolos produzidos:

- os tijolos devem ser colocados em pilhas após serem retirados da prensa, devendo-se evitar movimentações com os tijolos úmidos;
- o local de armazenamento deve estar em nível para que os elementos não se deformem;
- na execução do empilhamento, devem ser seguidas as orientações dos fabricantes de prensas que costumam indicar 1,0 m como altura limite, pois excesso de peso sobre os tijolos poderá deformá-los;
- nos três primeiros dias de cura os tijolos devem estar umedecidos; para isso pode ser feita molhagem com auxílio de um regador ou similar, de duas a quatro vezes ao dia, dependendo das condições atmosféricas do local.

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), os tijolos ou blocos só podem ser utilizados na construção civil no mínimo 14 dias após a sua fabricação.

Em termos de dosagem, a ABCP (1986) recomenda moldar tijolos com proporções cimento:solo, em volume, de 1:10, 1:12 e 1:14. A melhor opção é o traço com menor proporção de cimento (menor custo), condicionada, porém, ao atendimento dos critérios de resistência à compressão e absorção de água definidos em norma (NBR 8491- ABNT, 2012) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Requisitos físicos e mecânicos exigidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012) para tijolos de solo-cimento

Valores limites aos 7 dias	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

3.5.3. Fatores interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento

Dentre os fatores que podem interferir na estabilização de solos com cimento (PORBAHA *et al.*, 2000), alguns se destacam como interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento, sendo abordados a seguir nos subitens 3.5.3.1 a 3.5.2.4.

3.5.3.1. Tipo de solo

A possibilidade de utilizar solo do próprio local constitui uma das vantagens do solo-cimento. No entanto, não são todos os tipos de solos que podem ser utilizados e como o solo é o elemento que entra em maior proporção na mistura, sua seleção é determinante na qualidade do tijolo produzido e deve ser tal que permita o uso da menor quantidade possível de cimento.

Segundo a ABCP (1985), os solos mais arenosos são recomendados para uso em solo-cimento pois se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária, porém, a presença de argila na sua composição, visando

dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das fôrmas.

Segantini e Alcântara (2007) explicam que a presença de grãos de areia grossa e de pedregulhos é benéfica, pois são materiais inertes com função apenas de enchimento, favorecendo assim a disponibilização de maiores quantidades de cimento para aglomerar os grãos menores. Ainda segundo esses autores, a fração fina é responsável pela resistência inicial do solo-cimento compactado, devido à coesão das partículas da fração fina compactada. A experiência tem demonstrado que solos com teores de silte mais argila inferiores a 20% não propiciam compactação adequada, sobretudo na confecção de tijolos prensados, dificultando o processo de moldagem. (SEGANTINI e ALCÂNTARA, 2007).

Os solos argilosos demandam maior quantidade de cimento para sua estabilização. Além disso, alguns autores relatam degradação dos materiais argilosos estabilizados com cimento Portland, sendo indicado o uso de cal na estabilização destes solos (BELL, 1996). De modo geral, o uso de solos argilosos em engenharia é problemático, devido às características de expansão, contração e plasticidade, frequentemente elevadas, e a sensibilidade a alterações de umidade.

Portanto, é necessário conhecer a granulometria do solo para o uso em solo-cimento. Outra característica importante é a plasticidade do solo, que traz informações acerca da capacidade de absorção de água e retração da massa durante a secagem. Solos mais plásticos consomem mais água para a compactação adequada, resultando em elevada porosidade e absorção de água do tijolo, além de apresentarem retração elevada, com formação de trincas nos tijolos.

Para nortear a escolha do solo para uso na fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento, a norma NBR 10833 (ABNT, 2012) apresenta alguns requisitos a serem atendidos (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Critérios para a seleção de solos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento, segundo a NBR 10833 (ABNT, 2012)

Características	Requisitos (%)
% que passa na peneira 4 (4,8 mm)	100
% que passa na peneira 200 (0,075 mm)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Índice de plasticidade	≤ 18
Retração no Ensaio da Caixa*	< 2,0 cm

*Recomendação prática (CEPED, 1984): limita a retração e garante a ausência de trincas nos tijolos.

Quando não atendem aos requerimentos de composição granulométrica e limites de consistência, os solos devem ser “corrigidos”, adicionando-se, por exemplo, areia (DALLACORT *et al.*, 2002; CABALA, 2007; FERREIRA *et al.*, 2008; KOLLING *et al.*, 2012).

Outra condição para escolha do solo é a quantidade de matéria orgânica, que pode perturbar a hidratação do cimento. Segundo Fiquerola (2004), a presença de matéria orgânica, cloretos e sulfatos na mistura solo-cimento pode prejudicar a hidratação do cimento, retardando-a e, assim, comprometendo a resistência do tijolo produzido.

Segundo Ingles e Metcalf (1972) citados por Foppa (2005), isso ocorre porque a matéria orgânica imobiliza íons cálcio liberados na hidratação do cimento, prejudicando as reações secundárias do cálcio liberado com a sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) do solo, responsáveis, também, pelo ganho de resistência.

3.5.3.2. Cimento

O cimento é tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer¹, com adição de gesso (para regular o tempo de início de

¹ Resultado da mistura de calcário e, em menores proporções, argilas e minério de ferro (nessa ordem), submetida a um processo chamado clínquerização (queima em forno a 1.230°C). Fonte: ABCP (2002)

hidratação ou o tempo inicial de “pega”) e de outras substâncias, que determinam o tipo de cimento. O clínquer (matéria-prima do cimento), quando reduzido a pó, apresenta composição química e propriedades específicas, como apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3. 5 – Faixas de porcentagens dos principais componentes do cimento e suas propriedades

Componente	Nomenclatura	Proporção (%)	Propriedades
C ₃ A	aluminato tricálcico	0 - 15	reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação; propicia pouca resistência e forte retração
C ₃ S	silicato tricálcico (alita)	35 - 65	responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais, com alto desprendimento de calor; libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio
C ₂ S	silicato dicálcico (belita)	10 - 40	proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas, com baixa liberação de calor; produz cerca de 18% em massa de hidróxido de cálcio
C ₄ AF	ferroaluminato tetracálcico (ferrita)	5 - 15	desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica; boa resistência ao ataque por sulfatos

Fonte: Metha e Monteiro (1994)

Segundo Milani e Freire (2006), na estabilização do solo com cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), citados por Foppa (2005), as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento, incrementando a capacidade de carga e a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem e de gelo-degelo. Em solos granulares a permeabilidade diminui e a tendência para a retração aumenta, enquanto que em solos argilosos a permeabilidade

aumenta e se verifica tendência para expansão. Verifica-se também aumento nas dimensões das partículas, redução no índice de plasticidade e menor capacidade de retenção de água (CATTON, 1962).

De forma geral, independentemente do solo utilizado, o aumento de cimento promove aumento da resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento. Porém, se o teor de cimento for muito elevado e as condições de cura forem inadequadas, é provável que ocorram fissuras no processo de secagem decorrentes da retração do material (ROCHA, 1996). Foppa (2005) verificou, em seus estudos para estabilização de um solo composto por areia fina siltosa, que a resistência à compressão uniaxial aumenta linearmente com o aumento do teor de cimento.

Assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento utilizado no solo-cimento deve ser considerada, visando melhorar o desempenho desses materiais. Diversas pesquisas demonstram a evolução acerca da composição de cimentos e suas implicações na estabilização de solos. Miller e Azad (2000), ao avaliarem o desempenho do cimento Portland de alto forno na estabilização de solos, notaram incrementos de resistência à compressão e redução do índice de plasticidade em solos argilosos.

Não existem restrições quanto ao tipo de cimento a ser utilizado em solo-cimento, no entanto este deve atender à norma técnica específica para o seu enquadramento na categoria de cimento Portland simples, composto ou com aditivos.

Miller e Azad (2000) constataram o bom desempenho do cimento do tipo CP III (com adição de cinzas de alto forno) na estabilização de solos, até mesmo solos argilosos, reduzindo a plasticidade do solo e aumentando a resistência com baixos teores de cimento.

3.5.3.3. Umidade da massa e compactação

As propriedades mecânicas que permitem a utilização dos tijolos prensados de solo-cimento como elementos construtivos estão baseadas nas reações do

cimento com a água e elementos do solo (estabilização química) e na coesão obtida pela compactação da massa na prensa (estabilização física). Assim, a prensagem adequada dos tijolos, de maneira a se obter o maior valor possível de massa específica seca e, dessa maneira, a compactação máxima, é condição para produção de um tijolo com qualidade e resistência à compressão adequada. A umidade é um fator importante na obtenção da massa específica máxima na compactação de solos e, assim, na resistência à compressão dos tijolos. Além disso, umidade excessiva pode provocar excesso de porosidade nos tijolos após secagem, resultando em alta absorção de água.

Os ensaios de compactação de solos desenvolvidos em laboratório visam à obtenção dos valores de massa específica aparente seca máxima e a chamada umidade ótima, que permite, com a energia de compactação aplicada, o preenchimento de todos os vazios possíveis. A umidade ótima é um parâmetro muito importante nos trabalhos realizados com solos, pois propicia melhores condições de trabalhabilidade e máxima compactação do material, proporcionando maiores valores de densidade e resistência; diminui a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade do material, além de aumentar sua durabilidade (SOUZA, 2006b).

A técnica para determinação laboratorial do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de solos foi desenvolvida por Proctor (1933) e padronizada pelo DNIT (1994), citados por Pereira (2005). O ensaio consiste em compactar o solo em três camadas sucessivas, dentro de um molde cilíndrico (diâmetro = 10 cm e altura = 12 cm), utilizando um soquete de 2,5 Kg caindo em queda-livre de uma altura de 30 cm, sendo aplicados 26 golpes por camada. O ensaio assim realizado refere-se à energia ou esforço de compactação normal correspondente à aproximadamente 6 Kgf.cm^{-2} . O ensaio Proctor é repetido para cinco amostras, usualmente compactadas em umidades crescentes, espaçadas de 2 em 2%, determinando-se para cada amostra o peso específico aparente seco após a compactação. Com os valores obtidos procede-se à representação da densidade seca em função da umidade de moldagem, obtendo-se, assim, a chamada curva de compactação, conforme ilustra a Figura 3.7.

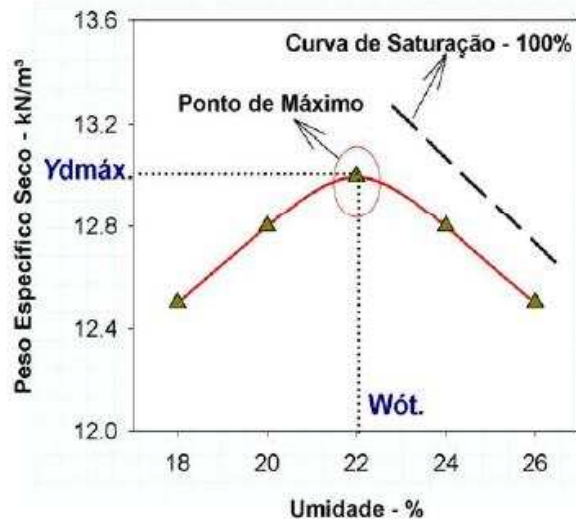


Figura 3.8 – Curva de compactação obtida via ensaio normal de Proctor.
 Fonte: Pereira (2005).

Na Figura 3.7 é possível observar um ramo ascendente, chamado de ramo seco, e outro descendente, denominado ramo úmido, bem como o ponto máximo da curva de compactação, que define o peso específico aparente máximo ($\gamma_{dmáx}$), usualmente expresso em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ou $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$, e ao qual é correspondente o teor de “umidade ótima” ($w_{ót.}$), expresso em %. Geralmente, no próprio gráfico do ensaio traça-se a curva de 100% de saturação, uma curva fictícia paralela ao ramo úmido que representa o solo com zero de espaços vazios.

No ramo seco da curva, o conteúdo de água da amostra em compactação é uma variável fundamental do processo, principalmente no caso de solos finos argilosos. O baixo conteúdo de água, que se encontra na forma capilar, produz compressões entre as partículas constituintes do solo, as quais tendem a formar grumos dificilmente desintegráveis que dificultam a compactação. Com o aumento do conteúdo de água diminui-se a tensão capilar e o aglutinamento das partículas, ocorrendo o efeito de lubrificação entre partículas, o que aumenta a eficiência da energia de compactação. No ramo úmido, se o conteúdo de água livre é tal que há excesso de água para preencher os vazios do solo, diminui a eficiência da compactação, visto que a água não terá mais espaço para se deslocar instantaneamente em resposta ao esforço mecânico

de compactação aplicado O excesso de água absorve parte da energia de compactação e a redistribui ao sistema, afastando as partículas sólidas (RICO e DEL CASTILLO, 1974).

É importante destacar que, no que diz respeito à fabricação de tijolos de solo-cimento, o teor de umidade ótimo correspondente à massa específica aparente máxima da mistura do ensaio laboratorial de compactação não corresponde à máxima resistência. Esta é obtida, em geral, para teores de umidade inferiores ao valor ótimo (determinado em laboratório) para os solos granulares e superiores ao valor ótimo para os solos argilosos (FELT, 1955).

3.5.3.4. Método de mistura e cura dos tijolos

A homogeneização adequada da massa de solo-cimento é importante para que todo o cimento possa entrar em contato com a água de hidratação. Sendo assim, os métodos de mistura podem influenciar bastante na qualidade dos tijolos, sendo que, segundo FELT (1955), a resistência à compressão pode diminuir em até 50% em função da eficiência dos equipamentos utilizados e das condições ambientais do local.

Ao adicionar água à mistura solo-cimento observa-se a formação de grumos pela concentração da umidade em alguns pontos, que devem ser desfeitos para melhor distribuição da água na massa. Destefani (2009) sugere o uso de borrifador para a aplicação da água na massa, a fim de evitar a formação desses grumos.

Road Research Laboratory (1951) adverte ainda que as misturas efetuadas em laboratório (ou seja, em condições controladas) têm maior resistência à compressão e durabilidade que aquelas executadas em campo (para obras de pavimentação). Problemas na homogeneização da massa, além de longo período entre a preparação e prensagem (perda de umidade), são usualmente indicadas como causas da redução de resistência observada em campo.

Quanto à cura dos tijolos após prensagem, em analogia à tecnologia dos concretos, convém destacar que esta é de fundamental importância para a

qualidade dos tijolos. Em geral, há aumento da resistência à compressão com o tempo de cura, porém, acredita-se que, da mesma forma que no concreto, o incremento de resistência dos tijolos com idade maior que 28 dias não seja notável (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A cura envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, consistindo no controle da duração, temperatura e umidade. Deve-se evitar perda acelerada de água por evaporação, mantendo os tijolos ao abrigo do sol. Além disso, é recomendado um período de cura úmida de, no mínimo, sete dias.

Nos concretos, as características superficiais são as mais afetadas por uma cura inadequada, tais como a permeabilidade, a carbonatação e a presença de fissuração (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3.5.4. Incorporação de resíduos na manufatura de tijolos de solo-cimento

Conforme já destacado, o tijolo de solo-cimento constitui, em si, um material de construção com apelo ambiental, tanto que é costume também ser chamado de tijolo ecológico. A principal matéria-prima utilizada, o solo, é um material abundante e que após o uso pode retornar ao ambiente sem causar poluição. O tijolo não precisa ser queimado, sendo apenas estabilizado mecanicamente por prensagem, evitando o lançamento de gases poluentes para a atmosfera e a geração de resíduos. Somado a isso, vários estudos têm demonstrado o potencial de incorporação de resíduos potencialmente poluidores em formulações de solo-cimento para a fabricação de tijolos, tais como: resíduos de indústrias de tintas (ALVARENGA *et al.*, 2009); de indústria de celulose, denominado grits (PINHEIRO, 2011); cinzas de bagaço de cana de açúcar (VALENCIANO e FREIRE, 2004); casca de arroz (FERREIRA *et al.*, 2008); resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (DESTEFANI, 2009; LIMA, 2010); resíduos da construção civil (DALLACORT *et al.*, 2002; FERRAZ, 2004; SOUZA *et al.*, 2008); e lodo de ETA (PEREIRA, 2008; SILVA, 2009; SILVA, 2011).

Além de evitar a poluição e degradação ambiental decorrentes da disposição no ambiente, a incorporação de resíduos na manufatura de tijolos de solo-cimento pode também trazer benefícios técnico-econômicos, como aumento de resistência mecânica e diminuição do gasto com cimento. Por exemplo, Ferraz (2004) avaliaram a incorporação em solo-cimento de resíduos de argamassa de cimento, na forma granular, para fabricação de tijolos prensados. Os resultados mostraram que a adição do resíduo de argamassa de cimento ao solo melhorou as propriedades mecânicas do solo-cimento, possibilitando redução de custos e produção de tijolos prensados de melhor qualidade. Resultado semelhante também foi obtido em pesquisa desenvolvida por Souza *et al.* (2008), que estudaram a adição de resíduos de concreto para a fabricação de tijolos de solo-cimento. A adição desse resíduo também proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas do solo-cimento, redução do consumo de cimento e a obtenção de tijolos de melhor qualidade.

Grande (2003) destaca que ainda há preconceitos sobre a utilização de resíduos na construção civil, em parte devidos à falta de conhecimento sobre as potencialidades dessa opção. Contudo, na opinião do mesmo autor, para tijolos de solo-cimento é imprescindível que se façam testes específicos para avaliar a durabilidade e resistência a abrasão dos tijolos, pois as características desse novo componente (acidez, por exemplo) podem influenciar negativamente na sinergia das reações entre o solo e o cimento.

3.6. Planejamento e modelagem de estudos de misturas

3.6.1. Planejamento

Formulações de misturas são problemas encontrados rotineiramente na indústria, e, nesses casos, como em outros, se pode lançar mão de experimentos planejados para, através de métodos estatísticos, diminuir a variabilidade da resposta e atingir um objetivo específico (aumentar ou diminuir um fator de interesse), visando economia de tempo e controle do processo (BARROS NETO *et al.*, 2003).

Estudos de misturas apresentam uma importante diferença em relação aos demais: as propriedades da mistura são determinadas pelas proporções de seus componentes e não por valores absolutos. Assim, em um experimento de mistura, os níveis dos fatores são as proporções dos componentes de uma mistura e a resposta é uma variável que caracteriza a qualidade do produto, admitida como função da proporção dos componentes.

Em uma mistura, se q representa o número de componentes, e se x_i representa a proporção do i -ésimo componente, tem-se que:

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1; x_i \geq 0; i = 1, \dots, q \quad (3.2)$$

A restrição da Equação 3.2 faz com que as proporções dos componentes não sejam independentes, ou seja, a alteração da proporção de qualquer componente da mistura faz com que haja alteração na proporção de pelo menos um dos demais componentes. Assim, pode-se determinar, por diferença, a proporção do último componente conhecendo-se as proporções dos demais (Equação 3.3). Com isso, perde-se um grau de liberdade para a regressão, o que tem implicações nos métodos estatísticos aplicados, dado que:

$$x_q = 1 - \sum_{i=1}^{q-1} x_i \quad (3.3)$$

A Figura 3.8 é a representação gráfica da restrição experimental da Equação 3.2 para misturas de dois e três componentes.

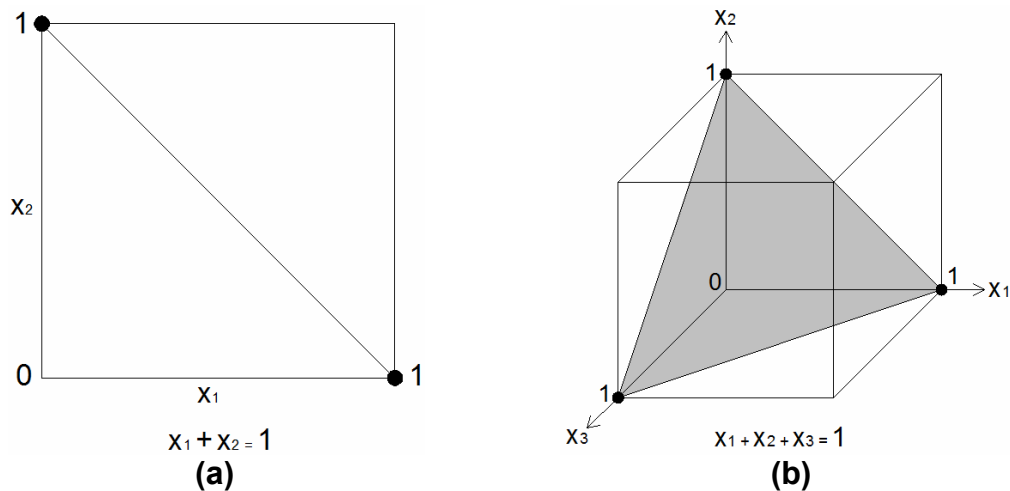


Figura 3.9 – Representação gráfica do espaço experimental para experimentos de mistura com dois (a) e três componentes (b).

Fonte: Myers e Montgomery (1995).

Observa-se na Figura 3.8 (a) que, para dois componentes, a linha diagonal contém todas as combinações possíveis para as proporções x_1 e x_2 que satisfazem a condição $x_1 + x_2 = 1$.

O sistema de coordenadas para a proporção dos componentes na mistura é um sistema de coordenadas simplex (MYERS e MONTGOMERY, 1995). Como exemplo, a região experimental de um experimento de mistura de três componentes (Figura 3.8 b) é também apresentada na Figura 3.9. Cada um dos três vértices do triângulo equilátero corresponde a um mistura pura, e cada um dos três lados representam misturas em que um dos componentes está ausente na formulação (o componente localizado no vértice oposto). Os pontos no interior do triângulo representam misturas em que todos os três componentes estão presentes na formulação. O centroide do triângulo corresponde à mistura com iguais proporções dos componentes ($x_1 = x_2 = x_3 = 1/3$).

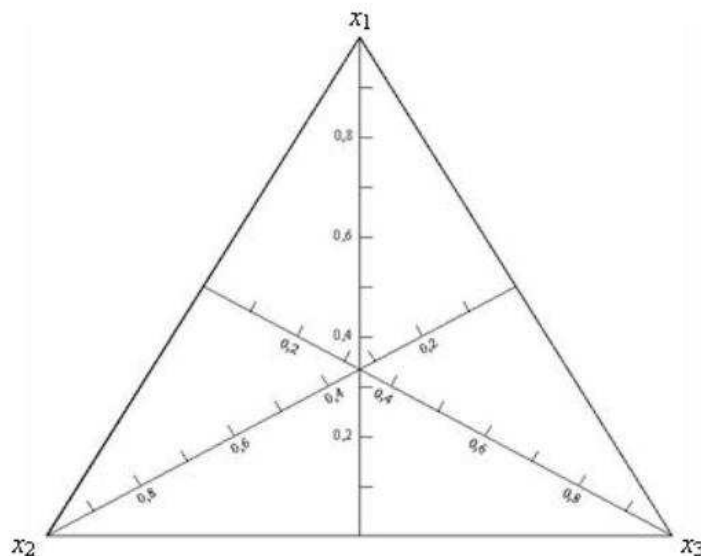


Figura 3.10 – Sistema de coordenada simplex para mistura de três componentes.

Fonte: Myers e Montgomery (1995).

Informações detalhadas sobre experimentos de misturas podem ser encontradas em Cornell (2002).

3.6.2. Delineamento em rede simplex e modelos polinomiais canônicos para experimentos de mistura

Segundo Myers e Montgomery (1995), são duas as diferenças básicas entre um experimento de superfície de resposta convencional e um experimento de mistura: (i) a necessidade de um tipo especial de delineamento; e (ii) a forma do polinômio de mistura, sutilmente diferente dos modelos polinomiais padrões empregados em metodologias de superfície de resposta.

O delineamento em rede simplex, ou *Simplex-Lattice*, é um tipo de delineamento experimental de misturas definido e, por isso, bastante empregado (ALEXANDRE, 2000; BAHIENSE *et al.*, 2008; DESTEFANI, 2009). Consiste em um conjunto de pontos uniformemente espalhados no sistema de coordenadas simplex para o espaço amostral, selecionados de acordo com o polinômio que se deseja ajustar.

A Figura 3.10 apresenta dois exemplos do delineamento em rede simplex, para misturas ternárias, representados no espaço simplex. A notação “{q, m}” indica o número de componentes q do delineamento e o grau m do polinômio de mistura “subsidiado” pelo delineamento. Assim, na definição do delineamento, escolhe-se também o modelo matemático que será ajustado. Em geral, o número de pontos em um delineamento *Simplex-Lattice* {q,m} é dado pela Equação 3.4.

$$N = \frac{(q + m - 1)!}{m! (q - 1)!} \quad (3.4)$$

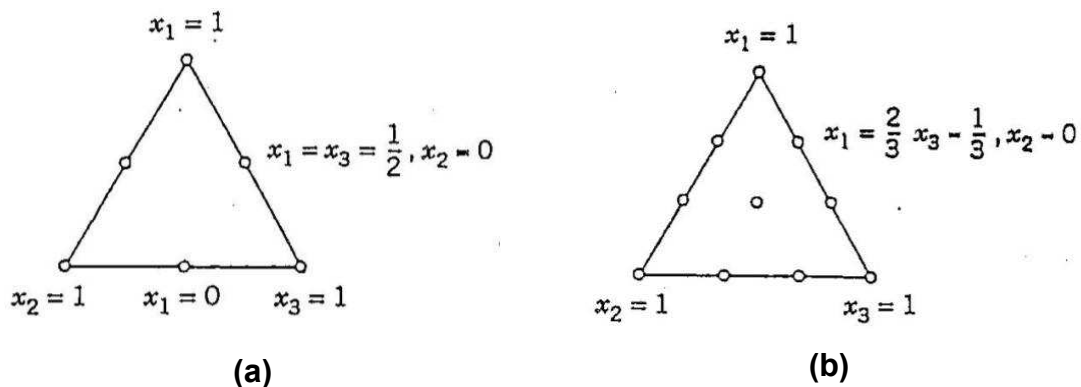


Figura 3.11 – Exemplos de delineamento em rede simplex para três componentes ($q = 3$): *lattice* {3,2} (a) e *lattice* {3,3} (b).

Fonte: Myers e Montgomery (1995).

Trata-se de um delineamento com pontos localizados, majoritariamente, na fronteira da região simplex (como pode ser observado nos exemplos da Figura 3.10). No entanto, quando se está interessado nas misturas completas dos componentes, pode-se aumentar o delineamento para incluir mais pontos no interior do simplex, como, por exemplo, o ponto central (ou centroide), se este já não estiver previsto no delineamento, e os pontos axiais, que estão localizados ao longo do eixo de cada componente, preferencialmente no ponto médio da distância entre o centroide e o vértice do triângulo (MYERS e

MONTGOMERY, 1995). A título de exemplo, na Figura 3.11 é apresentado um delineamento em rede simplex {3,2} aumentado com os pontos axiais.

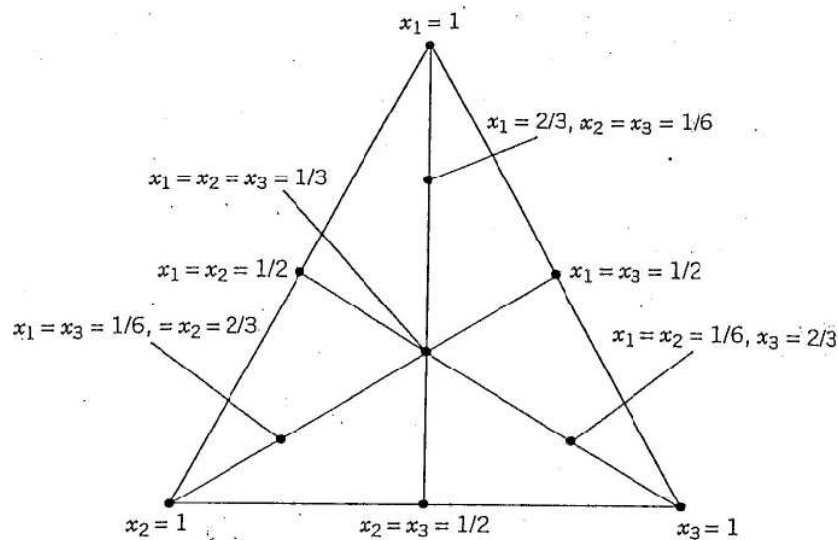


Figura 3.12 – Delineamento em rede simplex {3,2} aumentado.

Fonte: Myers e Montgomery (1995).

Segundo Myers e Montgomery (1995), o *Simplex-Lattice* aumentado apresenta melhor desempenho para estudos de misturas completas devido a maior sensibilidade de detecção da curvatura do modelo no interior do triângulo. Possui também maior poder na detecção da falta de ajuste.

A forma do modelo polinomial que será ajustado aos dados do experimento de mistura é dada pelos polinômios canônicos de Scheffé (CORNELL, 2002), apresentados nas Equações 3.5 a 3.8 para os modelos de mistura até terceira ordem.

Modelo Linear:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \tag{3.5}$$

Modelo Quadrático:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.6)$$

Modelo Cúbico Completo:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \\ + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3.7)$$

Modelo Cúbico Especial:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^q \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3.8)$$

Observa-se que os modelos não possuem o termo independente, que é eliminado por uma simplificação proveniente da restrição básica do experimento de misturas dada pela Equação 3.2.

A interpretação dos termos do modelo canônico é a seguinte: (i) o parâmetro β_i representa a resposta esperada para a mistura pura ($x_i = 1, x_j = 0, i \neq j$); (ii) o termo $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$ representa a porção da mistura linear e quando a mistura é estritamente aditiva, a Equação 3.5 torna-se um modelo apropriado; (iii) os demais termos correspondem aos efeitos não lineares, que podem ser sinérgicos (quando o parâmetro β_{ij} for positivo), antagônicos (valor de β_{ij} negativo) e, para o modelo cúbico completo, sinérgico e antagônico (δ_{ij}); e para o termo da interação tripla – como exemplo, $\beta_{123}x_1x_2x_3$ – a mistura ternária, no interior do simplex.

3.6.3. Representação matricial

O sistema de misturas e respostas pode ser representado matricialmente na forma da Equação 3.9:

$$\hat{y} = xb \quad (3.9)$$

Onde \hat{y} e b são os vetores contendo os valores previstos pelo modelo para a resposta y e as estimativas dos parâmetros, respectivamente. x representa a matriz de composição das misturas. Sendo assim, as estimativas b são obtidas resolvendo-se apenas uma equação matricial (Equação 3.10).

$$x^t x b = x^t y \quad (3.10)$$

Isolando-se o vetor b têm-se, de forma direta, as estimativas dos parâmetros. Da ampliação de x e y adequadamente, tem-se a solução geral para o ajuste de um modelo por mínimos quadrados.

3.6.4. Restrições experimentais e pseudocomponentes

Em alguns casos, pode ser necessário restringir a proporção de um ou mais componentes, que, por motivos técnicos ou práticos, podem não contemplar todas as proporções possíveis (intervalo fechado entre 0 e 1). Essas restrições dos componentes podem ser nos limites inferior, superior ou em ambos.

Quando são estabelecidos novos limites (inferiores e, ou superiores) para a proporção dos componentes, a região de experimentação fica reduzida a uma sub-região da região original. Nesses casos, pode-se redefinir as coordenadas da sub-região em termos de pseudocomponentes. Os pseudocomponentes são definidos em função dos componentes originais e de um dos limites, sendo os L-pseudocomponentes relativos ao intervalo inferior e U-pseudocomponentes

relativos ao limite superior. As Equações 3.11 e 3.12 apresentam a definição dos L-pseudocomponentes e U-pseudocomponentes, respectivamente, de acordo com Myers e Montgomery (1995).

$$v_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L}, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (3.11)$$

Onde
$$L = \sum_{i=1}^q L_i$$

$$u_i = \frac{U_i - x_i}{U - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (3.12)$$

Onde
$$U = \sum_{i=1}^q U_i$$

A escolha de quais pseudocomponentes utilizar (L-pseudocomponentes v_i ou U-pseudocomponentes u_i) quando existem restrições superiores e inferiores, depende da forma da região experimental, sendo que: quando $(1 - L) < (U - 1)$, opta-se pelos L-pseudocomponentes; e quando $(1 - L) \geq (U - 1)$, opta-se pelos U-pseudocomponentes (CORNELL, 2002).

No caso de haver restrições no experimento de mistura, Myers e Montgomery (1995) recomendam o uso de pseudocomponentes para o ajuste do modelo. Pois, segundo os autores, os experimentos de mistura com restrições dos componentes, geralmente, apresentam de moderada a altos níveis de multicolinearidade, e isso pode causar sérios impactos no estimador de mínimos quadrados dos coeficientes da regressão. Por outro lado, em geral, o modelo de mistura para os pseudocomponentes terá baixos níveis de multicolinearidade.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição geral do estudo

Como já mencionado na revisão de literatura (item 3.4), o aproveitamento de lodo de ETA em solo-cimento é uma opção ainda não muito explorada, tendo sido publicados apenas alguns poucos trabalhos envolvendo a fabricação de tijolos prensados (PORRAS *et al.*, 2005; PEREIRA, 2008; SILVA, 2009; SILVA, 2011). Portanto, ainda não há informações consolidadas quanto ao teor de lodo possível de ser incorporado, nem conhecimento acerca da variação das propriedades dos tijolos com a variação da incorporação de lodo.

Assim, visando aprofundar estudos de aproveitamento de lodo de ETA na fabricação de tijolos de solo-cimento, recorreu-se a um planejamento experimental e a técnicas estatísticas que permitissem relacionar variáveis de qualidade dos tijolos (como resistência à compressão) com a composição da massa para produção dos tijolos.

Para se ter um experimento controlado é necessário conhecer todas as variáveis em jogo, sendo que aquelas que não são de interesse na pesquisa devem ser controladas, quando possível, e mantidas constantes para que não interfiram nas respostas (fator de confundimento). Assim, de forma organizada e sob condições homogêneas se pode concluir sobre os objetivos propostos.

Na Figura 4.1 é apresentado um esquema com as variáveis em questão no presente estudo de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV na manufatura de tijolos maciços de solo-cimento. No caso, como as variáveis de interesse são as proporções na massa dos componentes solo, cimento e lodo, os demais fatores controláveis devem ser mantidos constantes (em um nível): umidade e tempo de cura, indicados na Figura 4.1, respectivamente, por UM e TC.

As respostas são variáveis de qualidade para aceitação do uso dos tijolos de solo-cimento em alvenaria de vedação (sem função estrutural), as quais são

normatizadas (NBR 8491; ABNT, 2012): dimensões dos tijolos, resistência à compressão simples e absorção de água.

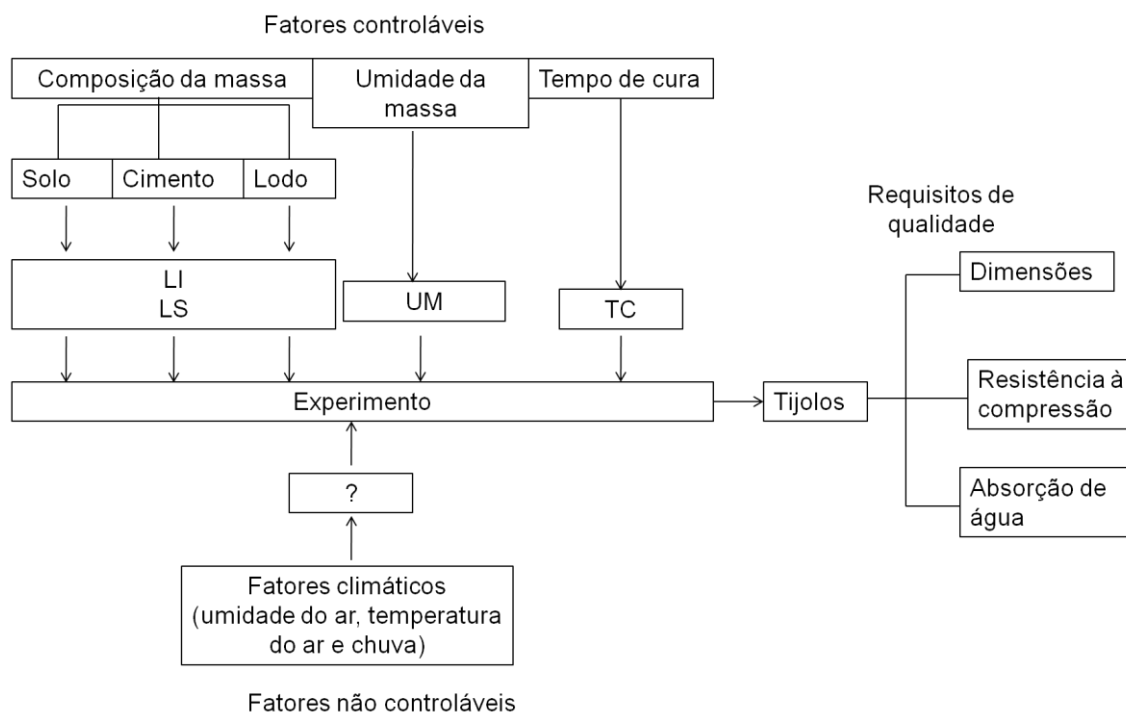


Figura 4.1 – Esquema ilustrativo do experimento de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV em tijolos de solo-cimento, com identificação das variáveis envolvidas.

LI – limite inferior de proporção do componente; LS – limite superior de proporção do componente; UM – teor de umidade da massa; TC – tempo de cura.

Foi utilizado um delineamento experimental de misturas de três componentes (mistura ternária), cujos pontos do delineamento (traços com diferentes proporções de solo, cimento e lodo) foram definidos por um algoritmo computacional e aos quais foi ajustado um modelo (polinomial) que, ao fim, permitiu definir o melhor traço para fabricação de tijolos de acordo com critérios de qualidade definidos em norma, mais especificamente, resistência à compressão simples.

Cabe então esclarecer que as duas outras variáveis-respostas (dimensões dos tijolos e absorção de água) não constituíram variáveis de controle para fins de escolha do melhor traço por meio de modelagem, pois a primeira (dimensão dos tijolos) está condicionada ao processo de produção – prensa adequada – e foi apenas verificada (quanto a desvios de dimensões nominais) e a segunda (absorção de água) foi considerada atendida em experimentos prévios, descritos a seguir.

O delineamento experimental exigiu a definição prévia dos níveis das variáveis de interesse (limite inferior e superior de proporções de cada componente da mistura solo-cimento-lodo) e dos demais fatores controláveis (teor de umidade e tempo de cura). Assim, para subsidiar a escolha dos níveis das variáveis de interesse procedeu-se à caracterização do solo e do lodo a serem utilizados no experimento, valendo-se ainda de informações técnicas sobre o cimento e misturas solo-cimento. O tempo de cura foi fixado com base em literatura técnica. Para a escolha do teor de umidade da massa, adotado em todas as misturas do experimento, foi feito um estudo específico prévio.

Este último experimento (estudo do teor de umidade) teve também por finalidade verificar se o teor de umidade poderia ser de fato mantido constante (ou seja, o mesmo em todas as misturas solo-cimento-lodo). Como visto no capítulo de revisão de literatura, um dos fatores que interferem na qualidade dos tijolos de solo-cimento é a umidade da massa no momento da prensagem, sendo recomendável adotar um valor o mais próximo possível da umidade ótima de compactação do material, definida em ensaio de laboratório. Porém, um fator complicador do experimento era a possibilidade da incorporação de outro material (no caso, lodo) à mistura solo-cimento acarretar alteração relevante da “umidade ótima” e, ou, como alertado por Grande (2003), fazer variar a “umidade ótima” de acordo com a porcentagem de cada componente incorporado às misturas. Assim, como o intuito inicial da pesquisa era adotar uma umidade única para todas as misturas, tornou-se necessário verificar essa possível variação do teor ótimo de acordo com o teor de lodo na mistura.

Para facilitar a compreensão da sequência das atividades da pesquisa em seu todo, na Figura 4.2 apresenta-se um fluxograma com as diversas etapas do estudo, detalhadas nos itens a seguir.

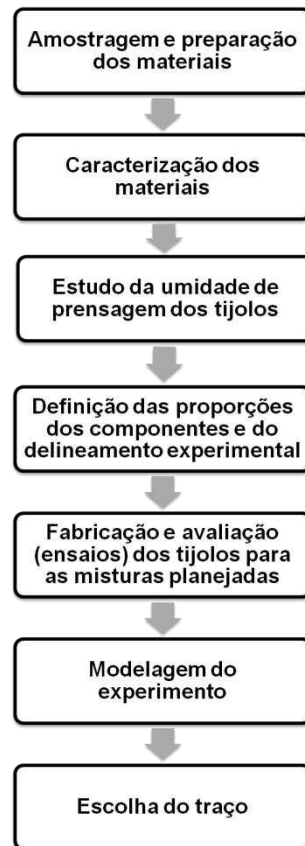


Figura 4.2 – Fluxograma com as etapas do estudo.

4.2. Preparação e caracterização dos materiais utilizados nas misturas solo-cimento-lodo

4.2.1. Origem e preparação dos materiais

4.2.1.1. Solo

O solo utilizado neste experimento foi proveniente da jazida Nô Silva, localizada na microrregião de Viçosa-MG, e encontrava-se estocado nas

dependências do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFV em recipientes cilíndricos de concreto devidamente vedados.

A preparação do solo consistiu no beneficiamento em peneira ABNT nº 4, com abertura de malha 4,76 mm. O material peneirado foi acondicionado em recipientes fechados (Figura 4.3), a fim de evitar perda de água e, assim, garantir constância do teor de umidade aferido. Desse material, foi retirada uma amostra para as análises de caracterização e determinação do teor de umidade de acordo com norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

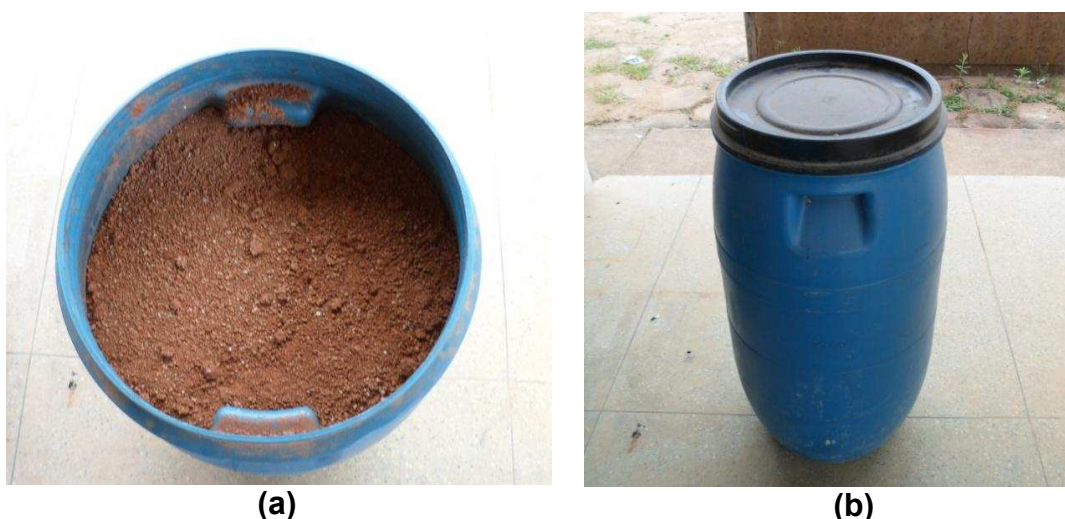


Figura 4.3 – Aspecto do solo pronto para o uso (a) e do recipiente utilizado para acondicionamento do solo e manutenção do teor de umidade (b).

4.2.1.2. Lodo do decantador da ETA UFV

A ETA UFV é abastecida por manancial superficial de reduzida vazão – Ribeirão São Bartolomeu (100 L.s^{-1} e 200 L.s^{-1} , aproximadamente, em épocas de estiagem e chuvas, respectivamente), com dois represamentos consecutivos (reservatórios de acumulação) à montante do ponto de captação. A bacia de captação é desprotegida, com ocupação urbana crescente e atividades agropecuárias relativamente intensas. A ETA trata cerca de 50 L.s^{-1} com períodos de operação médios diários de oito horas, sendo empregado o tratamento em ciclo completo: coagulação com sulfato de alumínio, mistura

rápida hidráulica em calha Parshall, floculação hidráulica, decantador circular com alimentação central e fluxo radial; dois filtros rápidos, desinfecção com cloro gás (Figura 4.4).



(a)



(b)

Figura 4.4 – Estação de tratamento de água da Universidade Federal de Viçosa – floculador e decantador (a) e filtros (b).

Na maior parte do tempo de operação da ETA a turbidez da água bruta apresenta valores reduzidos, mesmo em períodos de chuvas. Entretanto, ocasionalmente chuvas mais fortes provocam elevações substanciais da turbidez da água bruta (Figura 4.5). No período de 2005 a 2010, a turbidez da água bruta conheceu a seguinte variação: média = 22,6 uT, mediana = 9,2 uT, mínimo = 036 uT, máximo = 586 uT, 1º quartil = 6,7 uT, 3º quartil = 17,9 uT.

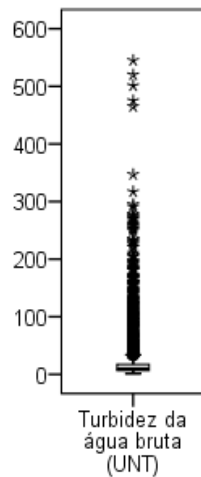


Figura 4.5 – Variação da turbidez da água bruta afluyente à ETA UFV, 2005 a 2010.

Fonte: Oliveira e Pereira (2011).

A limpeza do decantador (Figura 4.6a) é realizada em frequência bastante reduzida, em geral a cada 12 meses, mas no momento de coleta do resíduo para este trabalho já tinham decorrido 18 meses desde a última limpeza. A carreira de filtração média dos filtros é de 36 horas, sendo a retrolavagem efetuada a partir de um reservatório elevado com capacidade de 100 m³. Os resíduos são lançados na rede de água pluvial, tendo como destino final a Lagoa da Reitoria, à jusante do ponto de captação.

Estima-se que para um período de 12 meses de acúmulo de lodo na unidade de decantação da estação sejam armazenadas, aproximadamente, 140 toneladas de lodo no fundo do decantador (BATISTA e CABRAL, 2011).



(a)



(b)

Figura 4.6 – Operação de limpeza do decantador da ETA UFV (a) e descarga de fundo do lodo do decantador (b).

Fonte: Freitas e Oliveira (2005)

Para o uso proposto, o lodo não pôde ser utilizado nas condições em que sai do decantador da estação – teor de umidade próximo a 95% e consistência líquida (Figura 4.6b), devido à dificuldade de mistura com os demais componentes da massa para fabricação dos tijolos. Isso também foi verificado em outros trabalhos de incorporação de lodo de ETA em solo-cimento, sendo indicada a secagem completa do material (PORRAS *et al.*, 2005; PEREIRA, 2008). Assim, fez-se necessário o tratamento prévio do lodo, para a remoção de água.

Para o tratamento do lodo do decantador da ETA UFV foi utilizado um sistema piloto de leito de secagem (Figura 4.7) instalado nas dependências da estação. Porém, por se tratar de material de difícil desaguamento, devido à baixa concentração de sólidos e ao alto teor de hidróxido metálico (nesse caso, hidróxido de alumínio), a redução de umidade alcançada com os processos de tratamentos disponíveis é limitada: 35% de teor de sólidos (65% de teor de umidade) com processos mecanizados (RUSSELL *et al.*, 1996) e ainda menos com sistemas naturais, como os leitos de secagem. Em experimentos de desaguamento do lodo da ETA UFV no mesmo sistema piloto de leito de secagem aqui utilizado, Batista e Cabral (2011) constataram que o teor de umidade do lodo se estabilizava em cerca de 80% após aproximadamente 30

dias. Portanto, para a secagem completa do lodo foi necessário tratamento adicional, que consistiu em deixar o material secar ao ar em bandejas de metal.

O lodo foi transferido do fundo do decantador para o leito de secagem piloto através de um sistema de sifão, utilizando mangueira de 3,5 cm de diâmetro.



Figura 4.7 – Leitos de secagem de lodo em escala piloto instalados nas dependências da ETA UFV.

O material retirado do leito de secagem (Figura 4.8) foi depositado nas bandejas de metal utilizadas para a secagem de solo e deixado secar ao ar até obter aspecto seco (Figura 4.9a).



Figura 4.8 – Aspecto do lodo após período de desaguamento no leito de secagem piloto.

O material seco apresentava-se na forma de torrões de difícil desagregação. Com isso, foi necessária a moagem mecânica do material, feita em moinho de bolas com esferas de alumina (Figura 4.9b). Tal procedimento foi executado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFV.



(a)



(b)

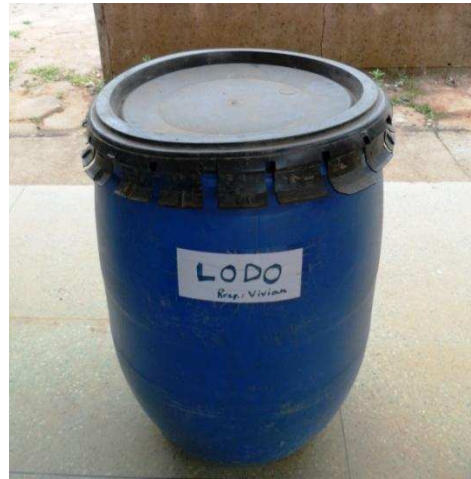
Figura 4.9 – Aspecto do material seco antes da moagem (a) e moinho de bolas utilizado (b).

Após a moagem, o material foi beneficiado em peneira ABNT nº 4, com abertura de malha de 4,76 mm e, assim como o solo, quantidade suficiente para a fabricação dos tijolos e caracterização do material foi acondicionada em

recipiente fechado para manutenção do teor de umidade. A Figura 4.10 apresenta o aspecto do material pronto para uso (a) e o recipiente utilizado para armazenamento (b).



(a)



(b)

Figura 4.10 – Detalhes do lodo pronto para uso (a) e do recipiente para armazenamento (b).

Desse material (pronto para uso) foi coletada amostra para as análises de caracterização e determinação do teor de umidade (NBR 6457 - ABNT, 1986).

4.2.1.3. Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland do tipo CP III-40-RS (cimento Portland de alto forno resistente a sulfatos), fabricado pela CSN cimentos S/A.

A opção pelo cimento do tipo CP III (com adição de escória granulada de alto forno) foi feita pelo reconhecimento do melhor desempenho na estabilização de solos (MILLER e AZAD, 2000).

As características do cimento foram fornecidas pelo fabricante.

4.2.2. Caracterização dos materiais

Na Tabela 4.1, são listados os ensaios realizados para a caracterização do solo e do lodo. Estes ensaios estão descritos nos itens 4.2.2.1 a 4.2.2.3.

Tabela 4.1 – Análises para a caracterização do solo e do lodo

Análises	Material analisado
Caracterização física Granulometria Massa específica dos sólidos Limites de Atterberg Ensaio da caixa	Solo, lodo e misturas solo-lodo
Massa unitária no estado solto	Solo e lodo
Caracterização química (semi-quantitativa) Análise de raios-X (EDS)	Lodo
Caracterização mineralógica Difração de raios-X	Lodo ⁽¹⁾
Caracterização morfológica Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Solo e lodo

(1) análises das frações granulométricas.

Percebe-se que nem todos os ensaios foram feitos para os dois materiais, sendo que a caracterização do lodo foi mais minuciosa que a do solo.

É importante ressaltar também que o lodo de ETA é tratado, em termos de caracterização, como um solo (CORDEIRO, 2001), sendo assim as propriedades dos solos são estendidas ao lodo.

As amostras utilizadas nas análises de caracterização do solo e do lodo foram separadas do montante total de material pronto para o uso, após a preparação descrita no item 4.2.1 (subitens 4.2.1.1 e 4.2.1.2).

4.2.2.1. Caracterização física

A Tabela 4.2 apresenta os ensaios de caracterização física do solo e do lodo e as respectivas normas técnicas que orientaram a execução destes ensaios.

Tabela 4.2 – Ensaio realizados para caracterização física do solo e do lodo

Ensaio	Norma Técnica
Massa específica dos sólidos	NBR 6508 (ABNT, 1984b)
Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 1984d) ⁽¹⁾
Massa unitária no estado solto	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Limite de liquidez (LL)	NBR 6459 (ABNT, 1984a)
Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180 (ABNT, 1984c)

(1)ensaio de granulometria conjunta, ou seja, peneiramento seguido de sedimentação em coluna com o método do densímetro.

Para a caracterização física do solo, além dos ensaios normatizados da Tabela 4.2 foi realizado o ensaio prático da caixa, executado conforme o método sugerido por CEPED (1984) descrito a seguir.

Para realização do ensaio prático da caixa, acrescentou-se água a uma quantidade da amostra até atingir a consistência de argamassa de emboço e essa mistura foi colocada em uma pequena caixa de madeira de 8,5 x 3,5 x 60 cm, sobre papel manteiga. Para distribuir e adensar a massa, a caixa foi levantada em uma de suas extremidades até uma altura de cerca de 5 cm, deixando que a mesma caísse por 10 vezes, repetindo-se o procedimento na outra extremidade. Regularizou-se então a superfície da massa passando uma régua seguida de uma colher de pedreiro. A caixa foi deixada secando à sombra e ao abrigo das intempéries por sete dias e, ao fim desse período, mediu-se a retração total dos corpos-de-prova na direção longitudinal (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Determinação da retração do corpo-de-prova no ensaio prático da caixa.

A partir da determinação laboratorial (de acordo com as normas especificadas na Tabela 4.2) dos valores dos limites de Atterberg para a consistência de solos – limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) – calculou-se, utilizando a Equação 4.1, o índice de plasticidade (IP) dos materiais.

$$IP = LL - LP \quad (4.1)$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade

LL = Limite de liquidez

LP = Limite de plasticidade

Todas essas análises foram executadas no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFV.

4.2.2.2. Caracterização mineralógica

A amostra foi fracionada para avaliação da composição mineralógica de cada uma das três frações granulométricas do lodo – areia, silte e argila. Lâminas de cada fração foram analisadas em aparelho de raios-X marca PANalytical,

modelo X'Pert PRO, com tubo de cobalto e ângulo de varredura (2θ) entre 0 - 50°, obtendo como resposta o difratograma com picos de difração característicos de cada mineral.

A preparação e o fracionamento das amostras foram feitos de acordo com a marcha analítica de rotina do Laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos da UFV (onde foi realizada a análise mineralógica do lodo). Primeiro, procedeu-se à desagregação da amostra (desagregação física e dispersão química com Na^+) e à remoção de matéria orgânica (que interfere no fracionamento) com hipoclorito de sódio. Após nova desagregação (novamente, física e química – Na^+), foi feita a separação das frações por peneiramento, em peneira ABNT nº 230 com abertura de malha de 0,063 mm para separação da areia (retida na peneira), e por sedimentação em coluna para separação das frações silte e argila (a argila fica em suspensão e o silte sedimenta, sendo coletado no fundo da coluna após o final do período de sedimentação). Faz-se a ressalva de que a eficácia dos procedimentos de desagregação não foi verificada. Portanto, não se tinha garantia de que as frações granulométricas do lodo haviam sido individualizadas de maneira eficaz com a metodologia utilizada.

Foi feita ainda a desferrificação da fração argila, ou seja, remoção de óxidos de ferro (cristalinos e amorfos), pelo método do citrato-ditionito. O ferro removido foi quantificado por espectrofotometria de absorção atômica.

As amostras das frações granulométricas foram secas em estufa e colocadas em lâminas de vidro para a leitura no difratômetro de raios-X. Somente para a fração argila (não-desferrificada e desferrificada), foram feitas lâminas orientadas.

De posse dos valores de intensidade e grau 2θ da difração, foram preparados, no *software* OriginPro 8, os difratogramas para cada fração granulométrica do lodo do decantador da ETA UFV. Para a identificação dos minerais através dos difratogramas, procedeu-se à comparação dos valores das distâncias interplanares (d), correspondentes aos picos de intensidade observados, com os dados da tabela de padrões de difração de minerais de argilas e rochas

(CHEN, 1977). Essas distâncias interplanares (d) para cada pico identificado foram calculadas pelo *software* Raio-X versão 1.2.

4.2.2.3. Caracterização química e morfológica

A caracterização morfológica do solo e do lodo foi feita com microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a determinação da composição química semiquantitativa com a técnica de microanálise de raios-X por dispersão de energia (EDS). Essas duas análises foram feitas no Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da UFV, utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura Leo, 1430VP, acoplado a sonda de raio-X (EDS).

Para a análise morfológica, uma pequena quantidade das amostras (aproximadamente, 0,1 g) foi colocada em béqueres com solução de acetona em quantidade suficiente para cobrir a amostra. Os béqueres com as amostras em solução foram levados ao banho com ultrassom por 10 minutos para desagregação e individualização das partículas das amostras. Após a agitação em ultrassom, colocou-se, com o auxílio de pipeta de Pasteur, uma gota da suspensão das amostras no porta-amostras de alumínio, próprio para a análise.

As amostras, no porta-amostras, foram deixadas para secar ao ar e, após a secagem, encaminhadas ao NMM da UFV, onde foram metalizadas, ou seja, recobertas pela deposição de íons metálicos (neste caso, o ouro) em aparelho metalizador SEM Electron Microscopy Sciences, modelo 550x. A metalização é utilizada para que a amostra não condutora possa tornar-se condutora e assim melhorar o nível de emissão de elétrons, facilitando a construção da imagem e, também, possibilitar a condução de elétrons absorvidos para o fio terra (DEDAVID, 2007).

Para a análise da composição química, a amostra foi destorroada e beneficiada em peneira ABNT nº 230 com abertura de malha de 0,063 mm. Com essa amostra, preparou-se uma pastilha prensada (*pressed disk*) na qual foi feita a análise semi-quantitativa de teores totais (normalizados a 100%) no detector de raios-X por dispersão de energia (EDS) acoplado ao microscópio eletrônico,

com correção “ZAF” que permite ter em conta: (i) a influência do número atômico dos elementos sobre a eficácia da excitação e da detecção (fator Z); (ii) a probabilidade que um raio-X seja absorvido antes mesmo de ser detectado (fator A); e (iii) a contribuição dos raios-X emitidos por um outro elemento (fluorescência secundária, fator F) (DEDAVID, 2007).

Foram feitas cinco leituras pontuais aleatórias na pastilha que, consideradas como repetições, permitiram a determinação da composição química do lodo pela média e desvio-padrão dos resultados (fornecidos pelo programa analisador de espectro). Isso pôde ser feito porque os resultados dos cinco pontos foram bem próximos (análise bem ajustada), devido à homogeneidade da amostra e à preparação exitosa da pastilha (filme fino).

Além disso, foram feitas, no Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Solos da UFV, análises para determinação do pH (em água), CTC (efetiva e a pH 7,0) e concentração de matéria orgânica (pelo método de Walkley-Black).

4.3. Ensaio de compactação e estudo da umidade de prensagem

Com a finalidade de avaliar a variação da umidade ótima das misturas do experimento, devido, principalmente, à incorporação diferenciada de lodo nas massas, foram realizados ensaios de compactação para três misturas: dois traços com teores diferentes de lodo - alto (15%) e baixo (5%) – e 10% de cimento; e um traço com mais cimento (15%) e baixo teor de lodo (5%) (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Composição dos traços do ensaio de compactação para obtenção da umidade ótima

Traço nº	Composição		
	Solo (%)	Cimento (%)	Lodo (%)
1	75	10	15
2	85	10	5
3	80	15	5

As amostras para estes ensaios foram coletadas do total de material preparado para os experimentos (item 4.2.1).

A preparação das misturas a serem ensaiadas foi feita em base seca. A partir do conhecimento do teor de umidade de cada componente (previamente determinado) e proporção destes na mistura final, calculou-se a quantidade (massa) de cada um dos componentes, descontando-se a massa de água.

Os testes foram realizados de acordo com a norma NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de compactação (ABNT, 2012). Esse ensaio permite construir a curva de compactação da mistura a partir dos valores testados de umidade e massa específica aparente seca e determinar o teor de umidade (umidade ótima) que corresponde à máxima massa específica aparente seca para a energia de compactação normal.

A título de ilustração, algumas das etapas do ensaio, executado no Laboratório de Engenharia Civil da UFV, estão apresentadas na Figura 4.12. Primeiro, os componentes eram homogeneizados (Figura 4.12a) e, em seguida, adicionava-se quantidade adequada de água para atingir uma das umidades pretendidas no ensaio, tendo sido avaliados cinco teores de umidade com intervalos de 2% entre cada valor, sendo dois valores correspondentes ao ramo seco da curva de compactação e dois ao ramo úmido (ver Figura 3.7, item 3.5.3.3). Essa faixa de valores é usualmente fixada de acordo com o valor esperado de umidade ótima, geralmente avaliada pela composição granulométrica do material ou em literatura.

Após a homogeneização da água eram coletadas amostras para determinação do teor de umidade da mistura que, em seguida, era compactada com energia normal no cilindro montado – cilindro pequeno, soquete pequeno, três camadas de compactação e 26 golpes por camada (Figura 4.12b), sendo que o topo das camadas compactadas era escarificado para aumentar o contato entre camadas. Ao final, o colarinho do cilindro era retirado e o corpo-de-prova era rasado (Figura 4.12c), para retirar o excesso de material, e pesado (cilindro + material compactado).



Figura 4.12 – Detalhes das etapas do ensaio de compactação para determinação da umidade ótima: homogeneização manual da amostra (a); compactação das camadas no molde cilíndrico com uso de soquete padrão (b); rasadura do corpo-de-prova (c) para pesagem e determinação da massa específica seca.

Conhecendo-se a massa e o volume do cilindro e a massa do conjunto (cilindro + material compactado), determinou-se o peso específico da mistura compactada para cada um das umidades ensaiadas (total de cinco) (Equação 4.2).

$$\rho_s = \frac{\rho}{\omega + 100} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde, ρ_s é a massa específica aparente seca da amostra compactada, em g.cm^{-3} ; e ω é o teor de umidade da amostra compactada, em %.

Com os valores de massa específica seca para as cinco umidades do ensaio, foram construídas as curvas de compactação de cada traço, determinando-se em seguida, conforme exemplificado na Figura 3.7, as respectivas umidades ótimas (w_{ot}).

Primeiramente, verificou-se, com os resultados dos ensaios de compactação para as misturas da Tabela 4.3, a magnitude de variação do valor da “umidade ótima” decorrente da incorporação diferenciada de lodo. Em etapa posterior foram fabricados tijolos para os mesmos traços dos ensaios de compactação, variando a umidade em 4% em torno da “umidade ótima” definida no ensaio, com espaçamento de 2% em 2% entre umidades avaliadas, sendo dois valores acima e dois abaixo do valor da “umidade ótima” do traço. Por exemplo, para o traço nº 1, foram avaliadas as umidades de: 15%, 17%, 19% (“umidade ótima”), 21% e 23%.

Para cada valor de umidade da massa, para os três traços do experimento, foram fabricados sete tijolos, sendo quatro para ensaios de resistência à compressão e três para ensaios de absorção de água. Já que podem ocorrer variações do valor de umidade, devido, por exemplo, à perda de água por evaporação entre a preparação e a prensagem, produziu-se um tijolo a mais para cada umidade avaliada, que foi retirado da prensa e desmanchado para determinação da umidade da massa no momento da prensagem (“umidade

real”). Assim, garantiu-se maior precisão no experimento. A “umidade real” foi determinada segundo metodologia da norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

Os tijolos foram produzidos, curados e ensaiados de acordo com os procedimentos descritos nos itens 4.4 e 4.5.

Para verificar existência de variações entre os tratamentos (umidades), os resultados (absorção de água e resistência à compressão dos traços avaliados) foram submetidos à análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão ajustado (linear e quadrático), por meio do teste F, com significância de 5%. Essa análise foi feita no *software* Minitab 16.

4.4. Produção dos tijolos

Os tijolos foram produzidos com base nos procedimentos da norma brasileira para fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual – NBR 10833 (ABNT, 2012). A prensa manual utilizada para prensagem da massa e produção dos tijolos de solo-cimento incorporados com lodo é apresentada na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Prensa manual utilizada para a fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento-lodo.

Primeiramente, misturou-se quantidade suficiente de solo, lodo e cimento, de acordo com a proporção, em peso seco, de cada um dos constituintes na mistura final. A homogeneização dos componentes foi feita manualmente até se obter coloração uniforme.

Conhecendo-se a umidade da mistura (de acordo com a umidade de cada componente), para atingir a umidade final da massa para a prensagem foi adicionada quantidade suficiente de água com auxílio de proveta graduada. Considerou-se o peso específico da água como 1000 Kg.m^{-3} .

Por se tratar de um experimento, com pequena produção de tijolos e, portanto, com pequena quantidade de material a ser processada, a homogeneização da massa após a adição de água também foi manual. Para evitar a distribuição desuniforme da água na massa devida à formação de “grumos” de umidade (concentração de água em alguns locais), utilizou-se uma peneira tipo pedreiro nº 4, com abertura de malha de 4,76 mm. Ao final, pôde-se constatar coloração homogênea da mistura, sem a presença dos “grumos” de umidade. O material era então colocado na fôrma da prensa, previamente untada com óleo de máquina (para facilitar a retirada do tijolo da prensa) (Figura 4.13).

Para garantir condições homogêneas na produção dos tijolos, procurou-se padronizar o processo de prensagem (Figura 4.14): primeiro, colocava-se uma camada de material nas fôrmas (mesma medida); em seguida, para a acomodação do material e para aumentar a capacidade da prensa, o material era pré-compactado com os dedos; uma segunda e última camada era adicionada em todas as três fôrmas (novamente, utilizando a mesma medida), em seguida fechava-se a parte superior da fôrma e, então, a massa era prensada baixando-se a haste da prensa, o que fazia a base das fôrmas se deslocar em sentido ascensional, promovendo a compactação da massa.

Os tijolos produzidos foram devidamente identificados e mantidos ao abrigo do sol, sendo regados (aspersão de água com uso de regador de jardim) e mantidos com cobertura plástica durante os primeiros sete dias (para reduzir a perda de umidade durante o processo de cura úmida do cimento) (Figura 4.14). O tempo total de cura (período entre a produção e os testes) dos tijolos foi fixado em 28 dias, por se acreditar que, da mesma forma que na tecnologia de

concretos, não haja incremento notável de resistência após esse tempo (MEHTA e MONTEIRO, 1994), que inclusive é superior ao indicado na norma NBR 10833 (ABNT, 2012) para uso dos tijolos de solo-cimento – 14 dias após a produção.

Preparação da massa
Mistura e homogeneização manual dos componentes com auxílio de peneira



Prensagem em prensa manual



Cura úmida dos tijolos
Mantidos ao abrigo do sol, com cobertura plástica (diminuir perda de umidade) e rega por 7 dias



Figura 4.14 – Ilustração esquemática da produção dos tijolos de solo-cimento-odo.

Todas essas atividades, bem como as do item seguinte, foram desenvolvidas nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFV.

4.5. Ensaios tecnológicos dos tijolos

Os ensaios tecnológicos para avaliar a qualidade dos tijolos de solo-cimento com lodo do decantador da ETA UFV foram realizados de acordo com a norma NBR 8492 – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio (ABNT, 2012).

4.5.1. Análise dimensional

Para o controle dimensional dos tijolos (um dos requisitos da norma de qualidade dos tijolos maciços de solo-cimento – NBR 8491; ABNT, 2012), foram feitas duas leituras, em pontos distintos, de cada uma das dimensões dos tijolos – largura, comprimento e altura – com uso de paquímetro e com precisão de 0,5 mm.

4.5.2. Ensaio de absorção de água

O ensaio para a determinação da absorção de água dos tijolos de solo-cimento consiste em: (i) secar os tijolos em estufa à temperatura entre 105 e 110 °C até alcançar constância de massa; (ii) pesá-los, depois de atingirem a temperatura ambiente após saírem da estufa; (iii) deixá-los imersos em tanque com água por 24 h (Figura 4.15); retirá-los da imersão e, com um pano úmido, remover o excesso de água da superfície; e (iv) pesá-los novamente antes de decorridos três minutos. Calcula-se então a umidade absorvida durante a imersão em água, que corresponde à umidade de saturação dos tijolos ou absorção de água total (Equação 4.3).

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

A é a absorção de água, expressa em porcentagem;

m_1 é a massa do corpo-de-prova seco em estufa, em gramas; e

m_2 é a massa do corpo-de-prova saturado com água, em gramas.



Figura 4.15 – Tijolos imersos em água para determinação da absorção de água segundo método da NBR 8492 (ABNT, 2012).

4.5.3. Ensaio de resistência à compressão simples

Antes do ensaio propriamente dito, obedecendo às especificações da norma NBR 8492 – ABNT (2012), os tijolos eram capeados (Figura 4.16a) utilizando pasta de cimento, cortados ao meio e as metades eram coladas. Nos corpos-de-prova assim preparados eram feitas determinações do comprimento e da largura das duas faces (denominadas faces A e B), pois o cálculo do valor da resistência à compressão (em MPa) é feito dividindo a força de ruptura pela área em que foi aplicada (área média das duas faces).

Os corpos-de-prova foram submetidos a forças de compressão crescentes, em prensa mecânica com capacidade de carga de 100 tf, até o rompimento (Figura 4.16b). A máquina utilizada no ensaio é equipada com duas chapas maciças,

de dimensões (22 x 42) cm e altura de 4 cm, o que proporciona perfeita cobertura e boa distribuição da carga por toda área dos corpos-de-prova (Figura 4.17).



(a)



(b)

Figura 4.16 – Detalhes do gabarito utilizado no capeamento, para obter a espessura especificada na norma NBR 8492 (ABNT, 2012) (a) e do rompimento do corpo-de-prova na máquina de ensaio de compressão (b).



Figura 4.17 – Prensa mecânica utilizada para os ensaios de resistência à compressão dos tijolos.

4.6. Definição dos intervalos de proporções dos componentes

As restrições experimentais que culminaram na definição dos limites do intervalo de cada componente no delineamento foram baseadas em aspectos técnicos. Estão listados abaixo os fatores que culminaram na escolha dos intervalos apresentados na Tabela 4.4:

- limitação da incorporação de lodo – pela caracterização do lodo ter revelado grande proporção de material fino (65% passando na peneira nº 200), limite de liquidez elevado e teor relativamente alto de matéria orgânica (8,4%), o lodo do decantador da ETA UFV não deve ser incorporado à mistura solo-cimento em proporções elevadas para não comprometer as características da mistura quanto ao atendimento aos requisitos da norma NBR 10833 (ABNT, 2012). Essa restrição de uso do lodo também foi verificada nos trabalhos de Silva (2009) e Silva (2011);
- características físicas adequadas da mistura de solo e lodo – baseado nos resultados da caracterização física de algumas misturas de solo e lodo, verificou-se que a proporção de incorporação de lodo ao solo em valor próximo a 15% não compromete as características deste para uso em solo-cimento, sendo que a mistura atendeu aos requisitos da norma NBR 10833 (ABNT, 2012);
- limite máximo de lodo de 15% - baseado nos resultados do experimento de determinação da umidade de prensagem, o valor de 15% pode ser considerado como limite superior para adição de lodo à mistura, pois essa proporção já compromete a resistência à compressão e absorção de água dos tijolos;
- mistura-controle do experimento - tendo-se interesse também na mistura sem lodo para avaliar comparativamente o desempenho do solo-cimento tradicional (controle), o limite inferior para este componente foi assumido como zero;
- limite inferior de cimento – o limite inferior de cimento foi baseado no traço 1:14 – 7% de cimento, recomendado pela ABCP (1988) para estudo de dosagem de solo-cimento para fabricação de tijolos.

- intervalos de mesmo tamanho – a escolha do limite máximo para o cimento foi função do intervalo adotado para o lodo, de maneira que os intervalos tivessem o mesmo comprimento.
- a soma das frações dos componentes nas misturas deve ser sempre igual a 1 – sendo o solo o componente majoritário (característica das formulações de solo-cimento), os limites superior e inferior de proporção deste componente foram escolhidos por diferença dos demais componentes, mantendo-se o mesmo tamanho do intervalo (condições para a formação do triângulo simplex), de tal forma que a soma do limite inferior de dois componentes com o limite superior do outro resulte em 1.

Tabela 4.4 – Limites inferior e superior para os componentes da mistura no delineamento

Componente	Mínimo (%)	Máximo (%)
Solo	77,5	92,5
Lodo	0	15
Cimento	7,5	22,5

4.7. Delineamento experimental

Como os intervalos de proporções dos componentes têm intencionalmente o mesmo comprimento e foram definidos de forma que os limites fossem ensaiados (traços com a proporção máxima de um componente e mínima dos demais), apesar das restrições, a região experimental continua sendo um triângulo simplex característico de misturas ternárias, porém com tamanho menor, localizado em uma sub-região do espaço para as misturas ternárias sem restrições (Figura 4.18). Com isso, foi possível utilizar um delineamento de misturas padrão do tipo simplex: o delineamento em rede simplex.

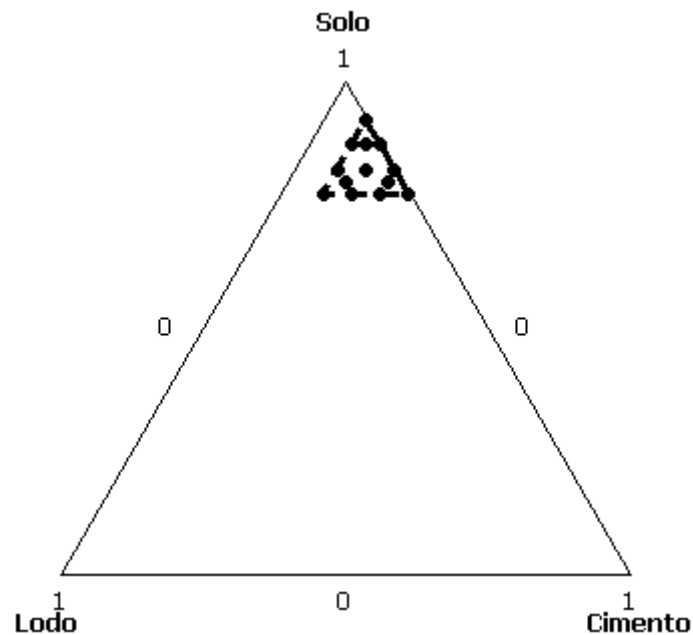


Figura 4.18 – Sub-região delimitada pelas restrições experimentais, apresentando os pontos do delineamento.

A Tabela 4.5 apresenta o delineamento experimental – rede simplex {3,3}, aumentado com pontos axiais. O delineamento foi assim definido para ajuste do modelo cúbico completo aos dados, permitindo avaliar as misturas completas, ou seja, com proporções intermediárias dos três componentes. O delineamento foi inteiramente casualizado (DIC), sem repetição, sendo produzidos (de acordo com procedimento descrito no item 4.4) seis tijolos (réplicas) por mistura.

Procurando evitar variações nas condições experimentais, todos os tijolos foram confeccionados no mesmo dia e ensaiados quanto a resistência à compressão (de acordo com metodologia descrita no item 4.5.3) com a mesma idade, aos 28 dias, pois, como dito na revisão de literatura, acredita-se que com esta idade o tijolo já tenha atingido a resistência máxima conferida pelo aglomerante (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Antes do ensaio de resistência mecânica, para o controle dimensional, foram feitas determinações das dimensões dos tijolos, como descrito no item 4.5.1.

Com base nos resultados dos tijolos produzidos para avaliar a umidade de prensagem (item 5.2) assumiu-se, como mencionado na descrição do

experimento, que a absorção de água não seria fator limitante para a escolha do traço do experimento de misturas e sim a resistência mecânica, pois todos os tijolos produzidos (excetuando os do traço com 15% de lodo, ou seja, com quantidade já elevada de lodo) apresentaram absorção de água abaixo dos limites máximos estabelecidos na norma NBR 8491 (ABNT, 2012). Assim, a única resposta avaliada foi a resistência à compressão dos tijolos.

Para a modelagem da resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento-lodo em função das proporções dos componentes na mistura, considerou-se como resposta a média de resistência dos seis tijolos produzidos para cada mistura do delineamento.

Tabela 4.5 – Delineamento experimental em rede simplex {3,3} aumentado com os pontos axiais

Tratamento	Solo (%)	Lodo (%)	Cimento (%)
1	92,5	0	7,5
2	87,5	5	7,5
3	87,5	0	12,5
4	82,5	10	7,5
5	82,5	5	12,5
6	82,5	0	17,5
7	77,5	15	7,5
8	77,5	10	12,5
9	77,5	5	17,5
10	77,5	0	22,5
11	87,5	2,5	10
12	80	10	10
13	80	2,5	17,5

4.8. Escolha da umidade de prensagem

Com o resultado do estudo das umidades de prensagem (apresentados a seguir, no item 5.2) entendeu-se como possível manter a intenção inicial de adotar um valor único de umidade de prensagem para todas as misturas do experimento, mantendo assim esta variável em um nível constante.

Porém, rigorosamente, essa inferência somente seria de todo correta se o valor adotado estivesse contido em todos os intervalos de umidade testados no item 4.3. No entanto, como misturas sem lodo, ou seja, misturas de solo-cimento convencional, estiveram presentes no experimento (ver Tabela 4.5), o teor de umidade ótimo esperado para estas misturas é, possivelmente, menor que a do traço identificado no estudo das umidades de prensagem (item 4.3) como o que possuía o menor valor de umidade ótima (traço com 5% de lodo), já que, como detectado (resultados do estudo das umidades de prensagem – item 5.2), foi o lodo o responsável pelo aumento da umidade ótima da mistura compactada. Adicionalmente, como o cimento aumenta ligeiramente o teor de umidade ótimo, o valor mínimo esperado seria aquele referente à mistura com o menor teor de cimento e máximo de solo – mistura com 92,5% de solo e 7,5 % de cimento (tratamento 1 do delineamento apresentado na Tabela 4.5).

Portanto, a fim de evitar o eventual erro de se adotar uma umidade acima do limite de tolerância de 4% (do estudo de umidades – item 4.3) em torno da umidade ótima de um dos traços, neste caso o traço sem lodo e com o mínimo de cimento (tratamento 1, Tabela 4.5), foi necessário verificar a provável umidade ótima de compactação deste traço, que seria a umidade ótima mínima do experimento. Para isso, recorreu-se a um trabalho de pesquisa realizado no Departamento de Engenharia Civil da UFV sobre fabricação de blocos de encaixe com resíduo de tinta incorporado ao mesmo solo utilizado no presente estudo, tendo sido encontrado 11% como valor de umidade ótima do solo com traço 1:12 (ALVARENGA *et al.*, 2009).

Para as demais misturas, considerando que são misturas intermediárias, acreditou-se não haver problemas quanto ao distanciamento da umidade

adotada no experimento da umidade ótima do traço (isto é, estará dentro do intervalo verificado de 4%).

Finalmente, e com base em informações de duas misturas extremas – traço com 15% de lodo e mistura sem lodo – escolheu-se a umidade da massa para o experimento de mistura: 15%, como um valor que não infringiu o limite permitido de variação das umidades ótimas dos traços (4%), de acordo com os valores de umidades ótimas extremos, quais sejam, 19% (máximo de lodo – 15%) e 11% (mistura sem lodo).

Com esta informação (teor de umidade de prensagem), o tempo de cura dos tijolos (item 4.4) e os intervalos dos componentes da mistura (definidos como descrição do item 4.6) se pôde chegar ao desenho final do experimento de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV em solo-cimento para a fabricação de tijolos maciços, representado esquematicamente na Figura 4.19.

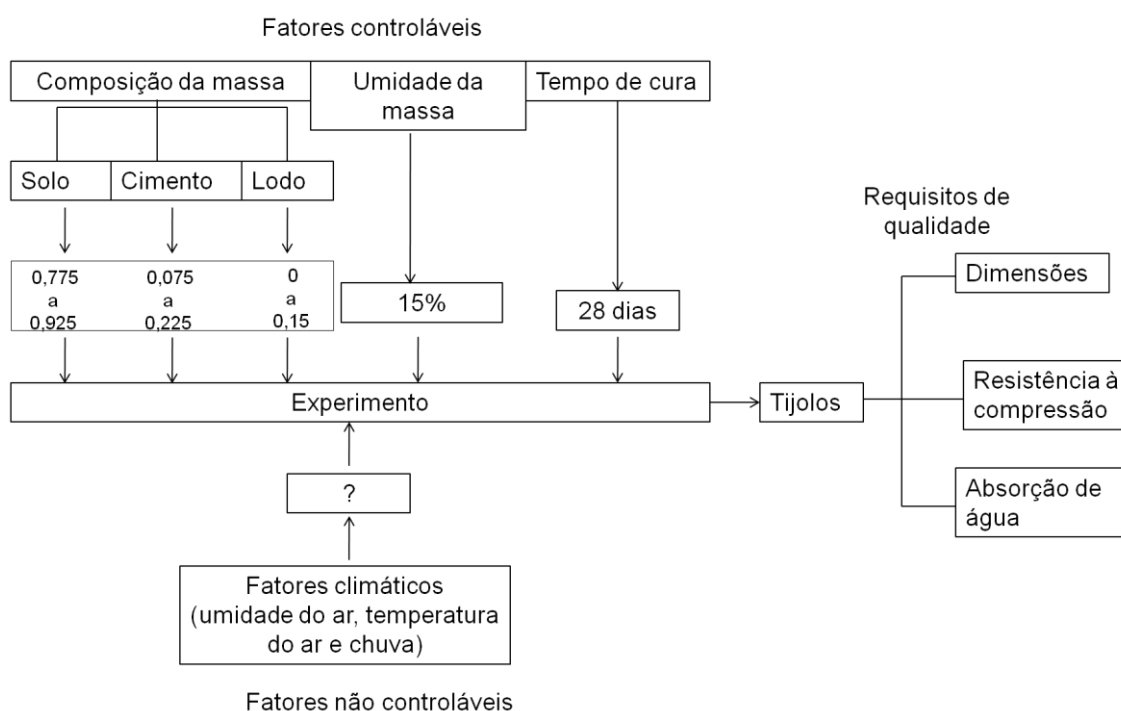


Figura 4.19 – Esquema ilustrativo do experimento de incorporação de lodo do decantador da ETA UFV em tijolos maciços de solo-cimento, apresentando os níveis das variáveis envolvidas.

4.9. Análise estatística

Após obtenção das respostas (resistência à compressão dos tijolos) para os pontos do delineamento experimental da Tabela 4.5, foram ajustados modelos polinomiais de mistura aos dados experimentais.

Devido às restrições experimentais, o ajuste dos modelos aos dados foi feito em termos dos pseudocomponentes. Isso porque, além de evitar multicolinearidade alta, como advertem Myers e Montgomery (1995), o modelo em termos de pseudocomponentes permite a interpretação dos resultados, enquanto o modelo para os valores reais não, pois há influência das diferenças de magnitude dos valores de proporções para cada componente na estimativa dos coeficientes do modelo. A conversão dos componentes originais para pseudocomponentes (e vice-versa) foi feita utilizando a Equação 3.11. De acordo com critério de Cornell (2002) optou-se pelos L-pseudocomponentes, pois o efeito das restrições inferiores na região experimental é maior que o das restrições superiores.

Como a construção de um modelo de mistura nada mais é que um caso particular do ajuste por mínimos quadrados, a significância estatística dos modelos foi avaliada pelo teste F da análise de variância (ANOVA), com α de 0,05.

Primeiro, ajustou-se aos dados experimentais o modelo cúbico completo e em sequência os modelos de menor grau (modelo cúbico especial, quadrático e aditivo). As hipóteses da ANOVA (teste F) foram as seguintes:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta, \quad \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = 0, \quad \beta_{123} = 0, \quad \delta_{12} = \delta_{13} = \delta_{23} = 0;$$

H_a : ao menos uma igualdade é falsa.

Avaliou-se também a significância dos termos do modelo utilizando o teste t de Student, com α de 0,05. As hipóteses do teste foram:

$$H_0: \text{o parâmetro é igual à zero};$$
$$H_a: \text{o parâmetro difere de zero}.$$

Os termos não significativos (p -valor $> 0,05$), partindo dos de maior grau para os de menor grau, foram retirados, um a um, sendo realizada nova análise a cada termo retirado.

Além da ANOVA e do coeficiente de determinação (R^2), para comparar os modelos ajustados, recorreu-se ao valor PRESS – resultado do somatório dos quadrados dos erros de predição (Equação 4.4) – e ao R^2 de predição. Sendo que quanto menor o valor PRESS e maior o R^2 de predição melhor o desempenho do modelo em prever adequadamente novas respostas.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n e_{(i)}^2 \quad (4.4)$$

Sendo que $e_{(i)}$ é o residual obtido quando a resposta (y_i) é predita pelo modelo baseado em todas as observações com exceção da i -ésima.

Para verificar a adequação do modelo, as suposições para a análise estatística foram verificadas. Para isso utilizou-se os resíduos padronizados (Equação 4.5), como recomendam Myers e Montgomery (1995). Isso porque os pontos do delineamento podem apresentar diferenças substanciais nos valores de partida. Assim, com os resíduos padronizados, este problema é sanado.

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{QME}} \quad (4.5)$$

Onde:

d_i = resíduo padronizado;

e_i = resíduo bruto (diferença entre a resposta observada e estimada pelo modelo); e

QME = erro padrão estimado.

Para verificar a suposição de independência recorreu-se ao gráfico dos resíduos pela ordem das observações; para verificar se o valor esperado do

erro era igual a zero e se havia constância de variâncias, foi utilizado o gráfico dos resíduos *versus* os valores ajustados; e por fim, para verificar a suposição de normalidade foi utilizado o gráfico de probabilidade normal.

Todas as análises foram feitas no *software* estatístico Minitab 16, bem como outros recursos auxiliares – gráficos das respostas estimadas pelo modelo de mistura (em termos dos componentes originais).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características dos materiais utilizados na mistura solo-cimento-lodo

5.1.1. Características físicas do solo e do lodo

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentadas as curvas granulométricas do solo e do lodo da ETA UFV, respectivamente.

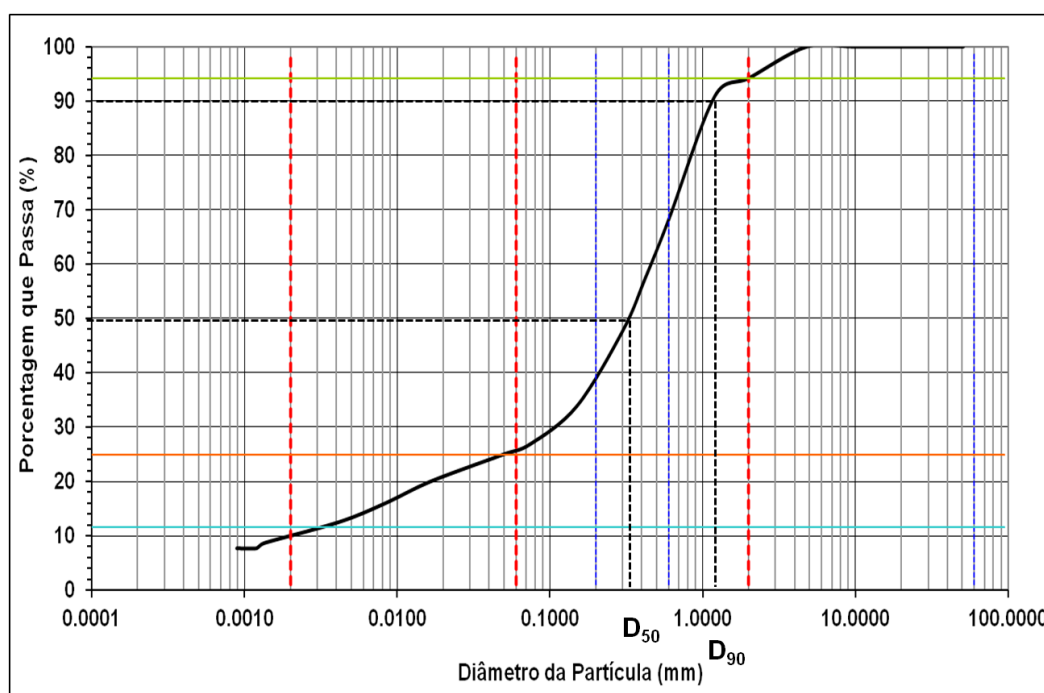


Figura 5.1 – Curva granulométrica do solo (as linhas vermelhas pontilhadas representam os limites para as classes granulométricas de acordo com classificação ABNT (NBR 6502) – da esquerda para a direita: argila, silte, areia e pedregulho – e as linhas pretas pontilhadas indicam o diâmetro das partículas referente a 90%, ou D_{90} , e 50%, ou D_{50} , da distribuição de frequência acumulada).

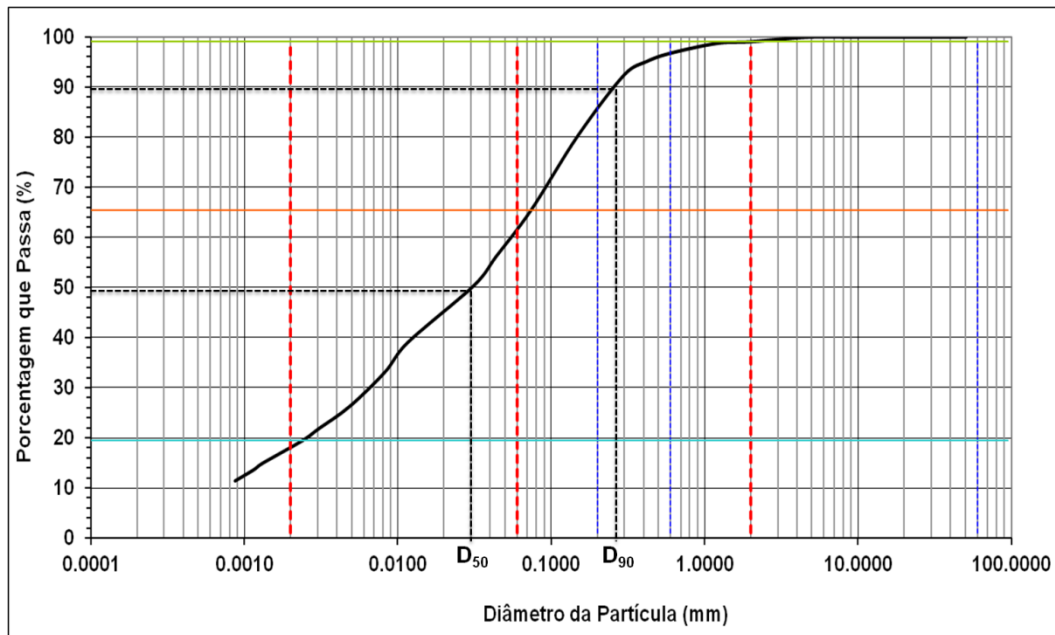


Figura 5.2 – Curva granulométrica do lodo do decantador da ETA UFV (as linhas vermelhas pontilhadas representam os limites para as classes granulométricas de acordo com classificação ABNT (NBR 6502) – da esquerda para a direita: argila, silte, areia e pedregulho – e as linhas pretas pontilhadas indicam o diâmetro das partículas referente a 90%, ou D_{90} , e 50%, ou D_{50} , da distribuição de frequência acumulada).

A análise granulométrica (Figura 5.2) revela que o lodo é composto por partículas de tamanho reduzido, com diâmetro médio (D_{50}) de 0,03 mm. Já o solo (Figura 5.1) é composto por partículas maiores, com diâmetro médio próximo de 0,3 mm. Além disso, as medidas D_{50} e D_{90} do lodo são próximas e ambas inferiores ao diâmetro médio das partículas do solo, tratando-se, portanto, de um material fino e homogêneo, em geral, com dimensões inferiores aos grãos do solo.

Na Tabela 5.1 é apresentada a composição granulométrica dos materiais avaliados, definida de acordo com a classificação da NBR 6502 (ABNT, 1995) que delimita os intervalos de diâmetros de partículas para as classes granulométricas: argila, silte, areia e pedregulho (Tabela 5.2).

Tabela 5.1 – Composição granulométrica do solo e do lodo, de acordo com classificação ABNT

Composição granulométrica	Solo	Lodo
Pedregulho (%)	6	1
Areia (%)	69	34
Silte (%)	13	46
Argila (%)	12	19
% do material que passa pela peneira nº 4 (4,8 mm)	100	100
% do material que passa pela peneira nº 200 (0,075 mm)	25	65
Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)	2,79	2,88

Tabela 5.2 – Intervalos de tamanho para as classes granulométricas, de acordo com NBR 6502 (ABNT, 1995).

Classe	Limite inferior (mm)	Limite superior (mm)
Pedregulho	2,0	60,0
Areia	0,06	2,0
Silte	0,002	0,06
Argila	-	0,002

De acordo com esta composição granulométrica foi feita classificação textural do solo e do lodo, localizando-os, respectivamente, nas classes texturais do diagrama de Atterberg franco arenosa e franco siltosa (Figura 5.3).

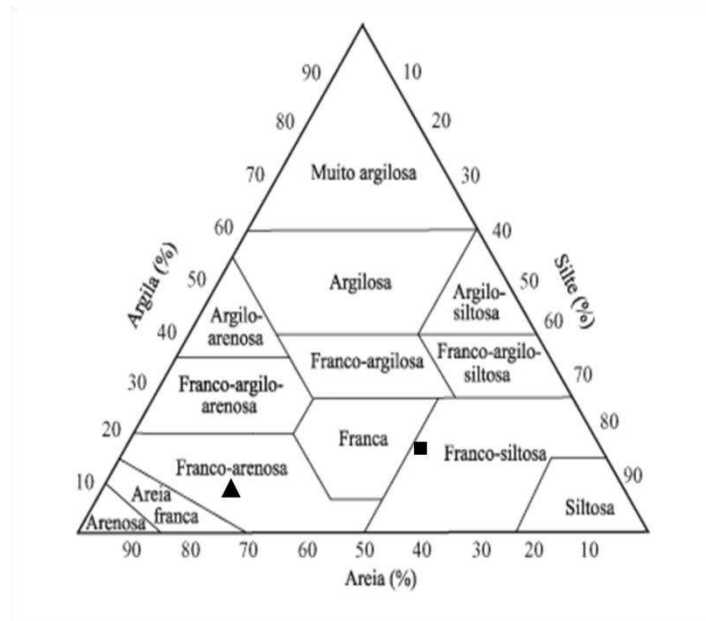


Figura 5.3 – Diagrama de Atterberg para classificação textural de amostras de solo com indicação dos resultados das análises granulométricas das amostras do solo e do lodo utilizados na mistura solo-cimento-lodo (■ lodo; ▲ solo)

O conhecimento da composição granulométrica permite algumas inferências acerca de propriedades e comportamento dos solos, como, por exemplo, capacidade de retenção de água e de troca de cátions – alta a média para solos siltosos e argilosos e baixa para solos arenosos – e potencial de expansão e contração – muito baixo para solos arenosos, baixo para os solos siltosos e moderado a alto para solos argilosos. Porém, essas características podem se alterar com variações na estrutura do solo e com a mineralogia da fração argila (ALMEIDA, 2005).

Em solo-cimento, essa informação é utilizada para previsão do consumo de cimento, sendo que, como mencionado na revisão de literatura, solos arenosos requerem menos cimento para estabilização que solos argilosos. A composição granulométrica do solo avaliado revelou semelhanças com outros solos utilizados em solo-cimento (DALLACORT *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2008).

A composição granulométrica do lodo – 65% de finos – é semelhante à composição encontrada para lodos de outras ETAs (DIAS *et al.* 2004, ANDRADE, 2005; PORRAS *et al.*, 2008) (ver Tabela 3.1) e sugere gastos elevados de cimento para estabilização.

Na Tabela 5.3 estão apresentados os resultados das demais variáveis físicas analisadas.

Tabela 5.3 – Caracterização física do solo e do lodo do decantador da ETA UFV

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Retração no ensaio da caixa (cm)	Massa unitária solta (g.cm ⁻³)
Solo	34,3	22,2	12,1	1,5	1,13
Lodo	72,8	60,6	12,2	0,8 ^(*)	0,93

(*) presença de trinca no corpo de prova.

LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade.

Apesar de apresentar índice de plasticidade próximo ao do solo, o lodo apresentou limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) elevados. Provavelmente, isso foi devido à composição granulométrica com material predominantemente fino e à presença de matéria orgânica (ver item 5.1.2), que possuem elevada superfície específica e alta densidade de carga e, portanto, absorvem grande quantidade de água até atingir a saturação e passar ao estado líquido. Valores altos desses limites também foram observados por Oliveira *et al.* (2004), Wolf *et al.* (2005), Tartari (2005), Fadanelli e Wiechetec, 2010 e Souza (2010) (ver Tabela 3.2). Essa característica do lodo pode levar ao aumento da absorção de água dos tijolos de solo-cimento.

Quanto ao índice de plasticidade (IP), de acordo com classificação de Jenkins, citado por Almeida (2005), o solo e o lodo são classificados como moderadamente plásticos. Assim, apesar de ter constituição predominantemente fina o lodo não apresentou comportamento muito plástico, provavelmente, devido à composição mineralógica, forma e arranjo das partículas do lodo. Em termos práticos, isso significa que o material não apresenta retração elevada, como já relatado por outros autores (ANDRADE, 2005; MARGEM *et al.*, 2007; TARTARI, 2008).

A Figura 5.4 apresenta fotos do resultado do ensaio da caixa, mostrando retração do solo no sentido longitudinal (a) e a trinca central para o lodo (b).

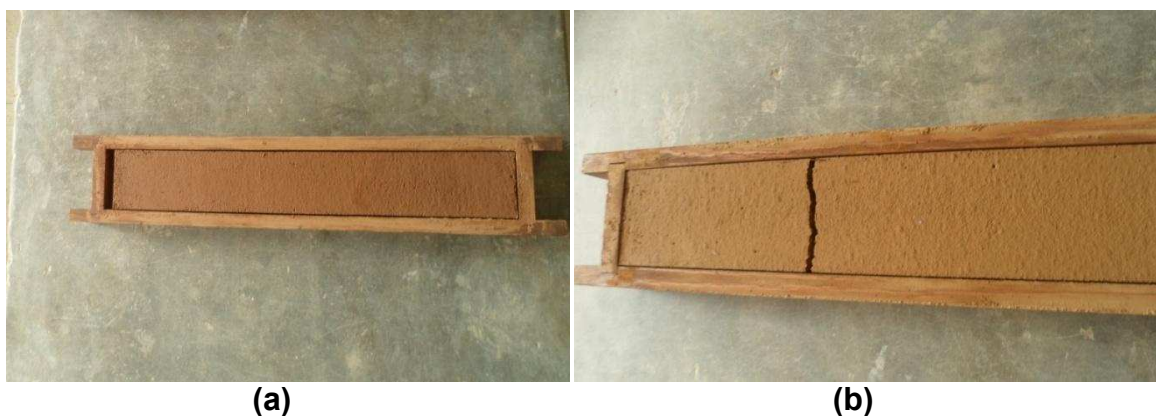


Figura 5.4 – Ensaio da caixa para o solo (a) e para o lodo (b).

De acordo com CEPED (1984), para que um solo possa ser utilizado em solo-cimento a soma das leituras de retração linear nas extremidades deve ser inferior a 2,0 cm e não devem ocorrer fendas na parte central da amostra. O resultado do ensaio do lodo (Figura 5.4b) revelou não conformidade com uma das exigências – trinca no corpo da massa. Já para o solo, os resultados foram satisfatórios (Figura 5.4a e Tabela 5.3).

De acordo com o que recomenda a norma NBR 10833 (ABNT, 2012) para escolha do solo a ser utilizado na fabricação dos tijolos ou blocos de solo-cimento (Tabela 3.4), os resultados das Tabelas 5.2 e 5.3 levam a concluir que o solo em questão era adequado para uso na fabricação de tijolos prensados de solo-cimento, mas o lodo não. Verifica-se que, em termos das porcentagens de material que passa nas peneiras nº 4 e 200, o solo atendeu aos requisitos, porém o lodo não (% que passa pela peneira 200 > 50%). Além disso, o limite de liquidez do lodo foi superior ao valor máximo da norma - 45%. Com isso, não seria indicado produzir tijolos apenas com o lodo, devido à sua composição predominantemente fina e limite de liquidez elevado, o que poderia elevar o consumo de cimento e aumentar a absorção de água dos tijolos.

Porém, como o interesse era produzir tijolos com misturas desses dois componentes (o solo como componente majoritário), foi verificado o comportamento físico de misturas de solo e lodo, tendo sido ensaiadas misturas com teores de lodo alto (mistura 2) e baixos (mistura 1 e 3) (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Caracterização física de misturas de solo e lodo

Mistura nº	Composição		% que passa na peneira 4	% que passa na peneira 200	LL (%)	IP (%)	Retração (cm) ^(*)
	Solo (%)	Lodo (%)					
1	94,7	5,3	100	30	35	7	1,5
2	84,2	15,8	100	34	43	9	1,9
3	94,1	5,9	100	27	NE	NE	1,5

(*) medida de retração no ensaio da caixa.
NE – não ensaiado.

Dos resultados apresentados na Tabela 5.4, observa-se que todas as misturas avaliadas apresentaram características físicas em conformidade com os requisitos da norma NBR 10833 (ABNT, 2012), ou seja, a incorporação de até, aproximadamente, 15% de lodo não invalidou de antemão a possibilidade de uso desse material para fabricação de tijolos maciços de solo-cimento, sem necessidade de correção granulométrica.

5.1.2. Características mineralógicas, químicas e morfológicas do solo e do lodo

A Figura 5.5 apresenta os difratogramas das frações granulométricas do lodo com identificação dos minerais correspondentes aos picos de difração. Observa-se a presença da caulinita (Ct) em todas as amostras, o que demonstra (i) que, por se tratar de um argilomineral e, portanto, exclusivo da fração argila, não foi possível desagregar e dispersar a argila da amostra pelos métodos empregados no ensaio, e (ii) a abundância desse mineral secundário no lodo.

Na fração areia (Figura 5.5a), além da presença da Ct, provavelmente na forma de agregados (observados visualmente na amostra), e do quartzo (Qz) – mineral típico desta fração, foram identificados óxidos de ferro (FeO) e gibsita (Gb), que são agentes minerais cimentantes e, provavelmente, contribuíram para a formação e manutenção dos agregados de Ct classificados como areia.

A presença de argilominerais e dos óxidos de ferro e hidróxido de alumínio (Gb) é ainda mais perceptível (e intensa) no difratograma da fração silte (Figura 5.5b), confirmando a ineficiência da desagregação das partículas da amostra. O único mineral originalmente pertencente a esta fração é o quartzo.

Os difratogramas da fração argila (Figura 5.5 c,d) evidenciam a composição caulínica dessa fração, com picos menos intensos de gibsita (Gb) e goethita (Gt). Esses minerais são característicos de um material com grau de intemperismo elevado e baixa atividade (capacidade de reter cátions e realizar outras trocas químicas) (FONTES, 2006).

As bandas largas de difração inicial, ao redor de 10° de difração (2θ), para os três primeiros difratogramas indicam a presença elevada de componentes amorfos no lodo. O que também foi observado por Paixão *et al.* (2008) para o lodo da ETA do Sistema Rio Manso, localizada no município de Brumadinho-MG.

Com a remoção dos óxidos de ferro cristalinos e amorfos (e eventualmente, hidróxido de alumínio), os picos de Ct da amostra ficaram mais nítidos e intensos (Figura 5.5d), pois esses óxidos são interferentes da análise por dificultarem o arranjo e orientação da Ct.

Além disso, devido à sobreposição de picos com Ct e Gb, a presença dos óxidos de ferro não foi muito evidente. Porém, o resultado da análise quantitativa do ferro removido na desferrificação da amostra de argila apontou teor moderadamente alto (8,4%), comparado com teores típicos de ferro nos solos (KÄMPF e CURI, 2000).

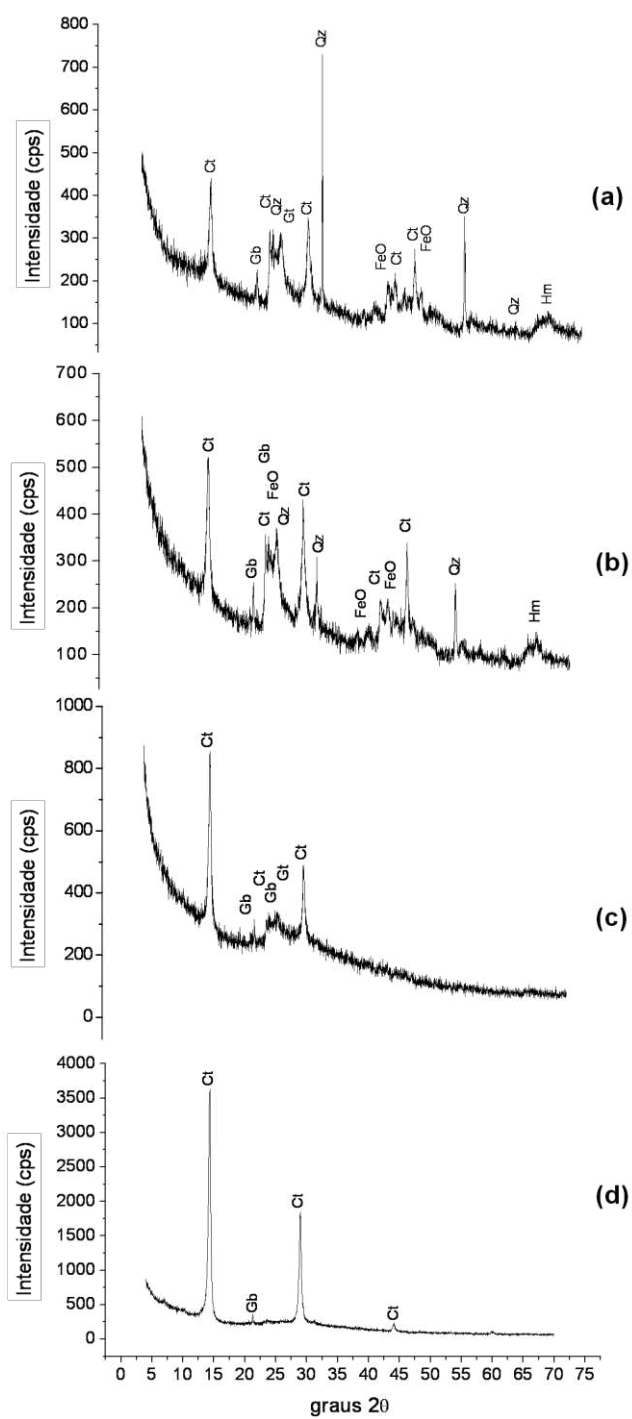


Figura 5. 5 – Difratoogramas das frações granulométricas do lodo da ETA UFV: areia (a), silte (b), argila (c) e argila desferrificada (d).

Ct – caulinita; DI – dolomita; FeO – óxidos de ferro (hematita e goethita); Gb – gibsitita; Gt – goethita; Hm – hematita; Qz – quartzo.

De maneira geral, o lodo do decantador da ETA UFV era composto, majoritariamente, pelos minerais caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Essa composição mineralógica é típica de solos intemperizados e semelhante a do latossolo da região de Viçosa-MG, onde é feita a captação da água tratada na ETA UFV (FERREIRA *et al.*, 1999). É próxima também à composição mineralógica de lodos de ETAs de outras regiões do Brasil (SANTOS *et al.*, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2004; WOLFF *et al.*, 2005; MARGEM *et al.*, 2007).

Devido à composição predominantemente caulinítica do lodo, seu comportamento físico-químico deve ser fortemente influenciado por este mineral. A caulinita é um mineral secundário do tipo 1:1, ou seja, formado pelo empilhamento de duas lâminas – tetraédrica e octaédrica – uma no topo da outra, ligadas por uma forte ligação iônica entre o oxigênio apical da lâmina de tetraedros e o alumínio da lâmina octaédrica, que as mantém fortemente unidas (Figura 5.6). As principais características desse mineral são seu formato laminar, expansibilidade nula – devido às pontes hidrogeniônicas entre as unidades cristalográficas – e baixa CTC (FONTES, 2006).

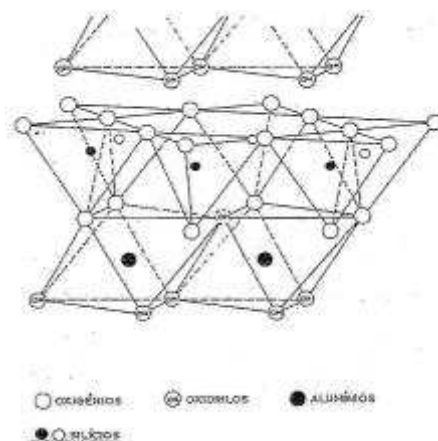


Figura 5.6 – Unidade cristalográfica da caulinita, mostrando o conjunto 1:1.

Fonte: Fontes (2006)

Uma importante característica das argilas é a plasticidade quando umedecida, resultado das forças de atração entre as partículas lamelares carregadas

eletricamente e a ação lubrificante da água entre partículas. Porém, quando o arranjo das partículas é perturbado, por exemplo, pela presença de agentes cimentantes minerais (óxidos de ferro e hidróxido de alumínio), como é o caso do lodo, altera-se a estrutura da argila orientada e dispersa para floculada ou até mesmo granular (Figura 5.7), com queda de comportamento plástico. Isso ajudaria, então, a explicar o índice de plasticidade moderado do lodo (Tabela 5.3).

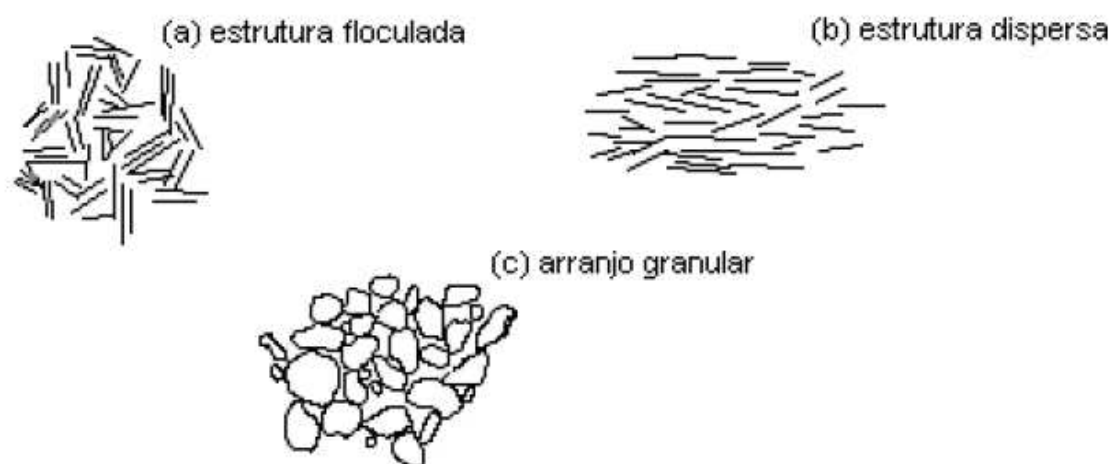


Figura 5. 7 – Diferentes feições estruturais de solos

Fonte: adaptado de Mitchell (1976)

Mitchell (1976) esclarece que o termo estrutura está associado ao arranjo espacial das partículas do solo e à existência de forças de ligação entre estas (por exemplo, cimentação). O arranjo espacial das partículas do lodo, formando uma estrutura granular (devido à agregação das partículas de argila), pode ser visualizada na micrografia (microscopia eletrônica de varredura – MEV) apresentada na Figura 5.8. A Figura 5.9 apresenta o tamanho dos microagregados de argila da amostra de lodo. Estrutura semelhante a essa foi encontrada por Tartari *et al.* (2011) para o lodo da ETA Tamanduá (Foz do Iguaçu, PR).

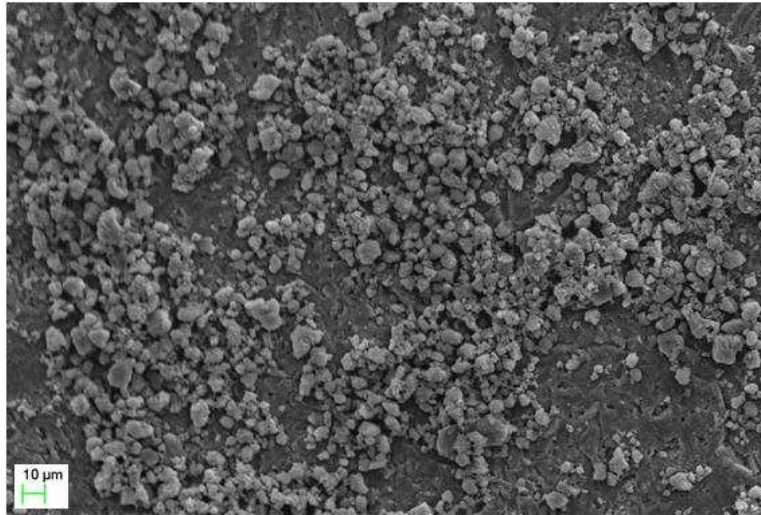


Figura 5.8 – Imagem de MEV do lodo – estrutura granular do lodo.

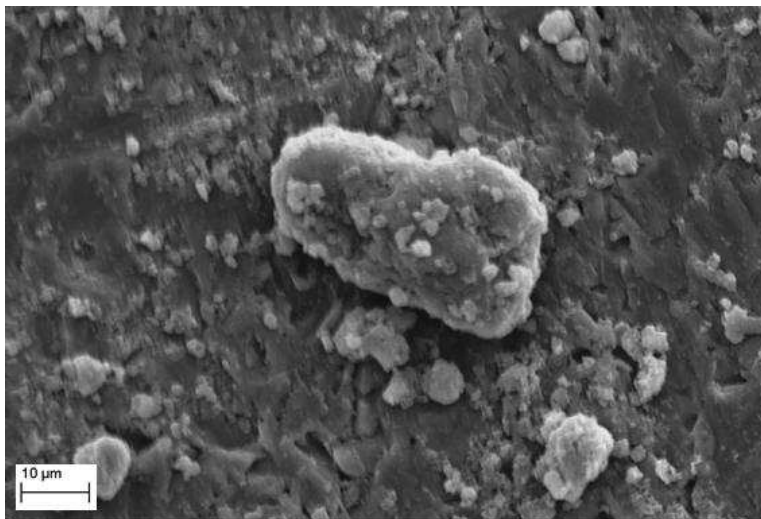


Figura 5.9 – Imagem de MEV do lodo, com detalhe de agregado, possivelmente de caulinita – observa-se a estrutura pseudo-hexagonal alterada pelo intemperismo.

Segundo Ferreira *et al.* (1999), os óxidos de Al e Fe (notadamente gibsitita, goethita e hematita) e matéria orgânica, nessa ordem, tendem a desorganizar as partículas em escala microscópica. Assim, ao maior teor desses constituintes corresponderá maior grau de desorganização e, conseqüentemente, estrutura mais próxima do tipo granular, como a observada

para o lodo. Segundo Resende *et al.* (1999), a gibsita em teores consideráveis mantém essa estrutura microgranular.

Constata-se que os microagregados de argila do lodo são bem estáveis, pois não foram desagregados e dispersos pelos processos físicos e químicos utilizados na separação de frações para a análise mineralógica e para a análise MEV (para detalhes dos tratamentos, ver itens 4.2.2.2 e 4.2.2.3). Outros autores já haviam chamado atenção para a tendência de aglomeração e dificuldade de desagregação de lodo de ETA (SARTORI e NUNES, 2000; BARROSO, 2007).

Com o exposto, suspeita-se que a porcentagem de argila no lodo da ETA UFV (19%) tenha sido subestimada e quantificada como silte e areia. Outro fator que corrobora essa suspeita foi o teor elevado de silte no lodo (46%), o que não é coerente com o grau de intemperismo do material, indicando a presença do pseudo-silte (microagregados de argila quantificados como silte).

Os resultados obtidos aqui e por outros autores, quanto à dificuldade de desagregação do lodo de ETA, sugerem a inadequação dos ensaios rotineiros de análise granulométrica de solo para caracterização granulométrica do lodo, pois não promovem a desagregação e dispersão dos agregados de argila. Tratamentos para desagregação e dispersão da argila do lodo devem, portanto, ser avaliados a fim de desenvolver uma metodologia adequada para a análise granulométrica desse material.

Vitorino *et al.* (2003) avaliaram a influência da composição química e mineralógica na estabilidade de agregados do tamanho silte (pseudo-silte) de solos da região sudeste do Brasil, apontando o alumínio presente no solo, tanto na forma cristalina (gibsita) quanto na forma amorfa (ou mal cristalizada), como o principal fator que levou à manutenção dos microagregados.

Assim, a estabilidade dos microagregados de argila que conferiram estrutura granular ao lodo pode ser decorrente do elevado teor de alumínio no mesmo (ver Tabela 5.5), presente na forma de gibsita (detectada na análise mineralógica) e na forma de hidróxido não-cristalino ou amorfo proveniente do coagulante químico (sulfato de alumínio) utilizado na ETA UFV.

Apesar das formas químicas do alumínio presente no lodo não terem sido quantificadas, acredita-se que a forma de hidróxido de alumínio amorfo associada ao coagulante químico tenha prevalecido (hidróxido de alumínio amorfo), pois, sabe-se que o lodo acumulado no fundo dos decantadores é constituído, basicamente, pelos materiais presentes na água bruta (concentrados no lodo) e por subprodutos da reação dos agentes químicos coagulantes na água (REALI, 2001). Nesse sentido, registra-se que em pesquisa realizada na região metropolitana de Belo Horizonte, Demattos *et al.* 2001 observaram que 92% do volume do lodo foi originário de coagulante e apenas 8% resíduos provenientes de impurezas removidas da água. Porém, pode haver variações na proporção de contribuição de cada um dos constituintes do lodo de ETA, devendo isso ser avaliado caso a caso (ANDREOLI *et al.*, 2006).

As bandas largas de difração inicial nos difratogramas do lodo (Figura 5.5 a, b, c) são um indício do predomínio de formas amorfas no lodo da ETA UFV, corroborando a afirmação feita quanto à predominância da forma de hidróxido de alumínio amorfo.

Além dos agentes cimentantes minerais e do hidróxido de alumínio proveniente do tratamento da água, a matéria orgânica presente no lodo (Tabela 5.6) pode ter desempenhado também importante papel na formação dos agregados estáveis, como sugerem Azevedo e Bonumá (2004). Tartari *et al.* (2011) verificaram a presença de matéria orgânica aderida a superfície de partículas de lodo através de micrografia MEV do lodo da ETA Tamanduá (Foz do Iguaçu, PR).

Tabela 5.5 – Composição química do lodo do decantador da UFV

Elemento	Concentração (wt. %) ^(*)
C	14,26
N	0,17
O	41,54
Na	0,15
Mg	0,24
Al	19,46
Si	15,25
P	0,19
S	0,25
K	0,13
Ca	0,16
Ti	0,43
V	0,07
Cr	0,06
Fe	7,15
Cu	0,12
Zn	0,11
Zr	0,16

(*) Porcentagem em massa.

A composição química do lodo da ETA UFV observada na Tabela 5.5 – preponderantemente, Al (19,46%), Si (15,25%) e Fe (7,15%) – é semelhante à de lodos de ETAs de outras regiões do Brasil (PORTELLA *et al.*, 2003; WOLLF *et al.*, 2005; MARGEM *et al.*, 2007; TARTARI, 2008).

Tal composição química revela uma possibilidade interessante para uso em solo-cimento: as reações pozolânicas, que ocorrem entre os produtos da hidratação do cimento – hidróxido de cálcio (CH) – e o alumínio e o silício presentes, formando compostos estáveis e com propriedades ligantes (METHA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Farias Filho *et al.* (2000) essas reações ocorrem satisfatoriamente quando o silício e o alumínio se encontram nas formas amorfas ou desordenadas atômica, ou seja, quando estão livres para reagir com o cálcio, enquanto a presença desses elementos em estruturas cristalinas ou outras formas os mantém indisponíveis. Assim, a forma em que esses

elementos estão presentes no lodo definirá a ocorrência ou não das reações pozolânicas que contribuem para ganho de resistência dos tijolos de solo-cimento.

Na Tabela 5.6 são apresentadas outras características químicas do solo e do lodo da ETA UFV, cuja importância em relação ao uso em solo-cimento é discutida a seguir:

- os valores de pH do solo e do lodo estiveram próximos à neutralidade, sendo isso importante para as reações do cimento, já que este não reage bem em pH baixo (ABCP, 2002);
- o teor de matéria orgânica do lodo é alto quando comparado ao do solo e ao limite máximo de 2% recomendado para escolha de solos para fabricação de tijolos de solo-cimento. Isso pode restringir o uso do lodo, pois, como dito no item 3.5.3.1, dentre os fatores que interferem na qualidade dos tijolos de solo-cimento está o teor de matéria orgânica do solo, por retardar a hidratação do cimento (FIQUEROLA, 2004); e
- o solo possuía CTC baixa, característica de um solo arenoso, já que é a fração fina dos solos a principal responsável por esta característica. A CTC efetiva do lodo também foi baixa, porém a CTC a pH 7,0 pode ser considerada moderada. Essa variação da CTC com o pH para o lodo é creditada à formação de cargas superficiais na caulinita (principal mineral presente no lodo), além da dissociação dos radicais orgânicos, óxidos de ferro e hidróxido de alumínio, com o aumento do pH do meio (FONTES, 2006). Essa propriedade é importante, pois governa a interação dos produtos da hidratação do cimento com as partículas dos materiais. Assim, quanto maior a CTC, maior a retenção dos íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento, o que dificulta a cimentação devido à indisponibilidade destes no meio.

Tabela 5.6 – Características químicas do solo e do lodo da ETA UFV – teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC) e pH

Material	MO (%)	pH (H ₂ O)	CTC (t) cmol _c .dm ⁻³	CTC (T) cmol _c .dm ⁻³
Solo	0,26	7,73	2,90	3,40
Lodo	8,40	6,87	2,73	6,93

pH em água; CTC – Capacidade de Troca Catiônica efetiva (t) e a pH 7,0 (T); MO – concentração de matéria orgânica x 1,724 (Walkley-Black)

Por fim, são apresentadas as imagens de MEV do solo (Figuras 5.10 e 5.11) que, comparativamente às do lodo, exibem partículas de maiores dimensões, correspondentes à fração areia, com formas planares e quinas típicas de um material menos intemperizado, ou devido à presença de minerais mais resistentes ao intemperismo – como o quartzo, em detrimento das formas arredondadas das partículas mais intemperizadas do lodo (típica de minerais secundários e óxidos). Em resumo, isso está de acordo com a composição granulométrica predominantemente arenosa do solo.

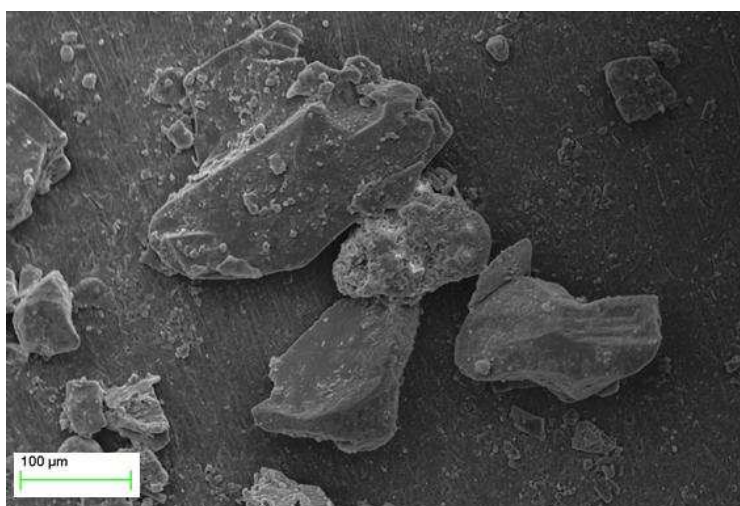


Figura 5.10 – Imagem de MEV do solo – presença de quinas intactas típicas de material mais resistente ao intemperismo, como o quartzo.

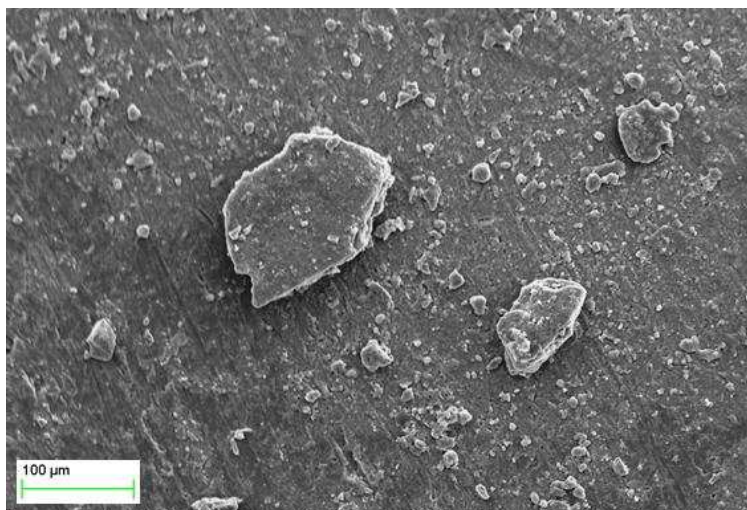


Figura 5. 11 – Imagem de MEV do solo – formas planares típicas de micas.

5.1.3. Características do cimento

Nas Tabelas 5.7 e 5.8 estão apresentadas, respectivamente, as características físicas e químicas do cimento portland CP III fornecidas pelo fabricante . Com relação às proporções das matérias-primas têm-se as seguintes relações: % escória – 63,0%; clínquer – 34,0%; calcário – 1,0 %; e gesso – 2,0 %. A composição potencial média do clínquer portland é a seguinte: C_3S – 60,0%; C_2S – 13,0 %; C_3A – 8,0 %; C_4AF - 9,86 %. (CSN, 2013).

Tabela 5.7 – Ensaio físicos de cimento portland de alto-forno resistente a sulfatos (CP III-RS) – ABNT NBR 5737:1992

Determinações	Referências normativas	Limites especificações	Resultados
Finura na peneira 75 µm (%)	NBR 11579	≤ 8,0	1,02
Finura na peneira 45 µm (%)	NBR 12826	-	3,94
Massa específica (g.cm ⁻³)	NBR NM 23	-	2,95
Área específica (cm ² .g ⁻¹)	NBR NM 76	-	4291
Água de consistência normal (%)	NBR NM 43	-	32,0
Tempo de início de pega (h:min)	NBR NM 65	≥ 01:00	04:20
Tempo de fim de pega (h:min)		≤ 12:00	05:25
Expansibilidade a quente (mm)	NBR 11582	≤ 5,0 mm	0,0
Resistência à compressão			
Resistência 3 dias (MPa)	NBR 7215	≥ 12,0	16,6
Resistência 7 dias (MPa)		≥ 23,0	27,5
Resistência 28 dias (MPa)		≥ 40,0	41,3

Fonte: CSN Cimentos S/A (2013)

Tabela 5.8 – Ensaio químicos de cimento portland de alto-forno resistente a sulfatos (CP III-RS) – ABNT NBR 5737:1992

Determinações	Referências normativas	Limites especificações	Resultados	
Óxido de Cálcio (%CaO)	NBR NM 12	-	52,45	
Óxido de Sílica (%SiO ₂)		-	29,83	
Óxido de Magnésio (%MgO)		-	4,58	
Óxido de Alumínio (%Al ₂ O ₃)		-	9,36	
Óxido de Ferro (%Fe ₂ O ₃)		-	1,67	
Resíduo Insolúvel (%R.I.)		NBR NM 15	< 1,5	0,65
Perda ao Fogo (%P.F.)		NBR NM 18	< 4,5	2,37
Anidrido Sulfúrico (%SO ₃)		NBR NM 16	< 4,0	1,68
Anidrido Carbônico (%CO ₂)		NBR NM 20	< 3,0	1,09

Fonte: CSN Cimentos S/A (2013)

Como pode ser observado nas Tabelas 5.7 e 5.8, o cimento atendeu às especificações para ser classificado como cimento Portland do tipo CP III-40-RS. Trata-se de um cimento Portland com adição de escória de alto forno (63 %, neste caso), a qual possui propriedades hidráulicas latentes, endurecendo quando misturada com água. Porém, esse é um processo lento que deve ser acelerado pela adição de ativadores, como a cal liberada durante a hidratação do clínquer (ABCP, 2002).

Dado o fato das escórias granuladas de alto-forno terem menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer, os cimentos com adição desses materiais, como é o caso deste, podem apresentar, em igualdade de condições, menor desenvolvimento inicial de resistência. Porém, segundo ABCP (2002), há aumento da resistência à compressão em idades avançadas, além de melhor trabalhabilidade, diminuição do calor de hidratação e outros.

Segundo a ABCP (2009), os cimentos de alto forno apresentam maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de serem resistentes a sulfatos.

A resistência a sulfatos neste caso foi importante, pois estes podem estar presentes no solo e, principalmente no lodo, e comprometer a ação do cimento. De acordo com Coutinho (2001) as soluções de sulfatos podem reagir com o aluminato tricálcico (C_3A) do cimento hidratado ou com a alumina do agregado, causando expansões, fissuração, descamação do concreto, amolecimento e desintegração. Assim, o uso de cimentos resistentes a ataques de sulfato, como o cimento de alto forno, diminuem os problemas citados quando os sulfatos estão presentes.

Miller e Azad (2000) verificaram o bom desempenho desse tipo de cimento na estabilização de solos, até mesmo solos argilosos, reduzindo a plasticidade do solo e aumentando a resistência com baixos teores de cimento.

5.2. Umidade de prensagem dos tijolos

Conforme referido no item 4.3, com a finalidade de verificar a variação da umidade ótima devido à incorporação diferenciada de lodo na mistura, foram realizados ensaios de compactação para três traços de solo-cimento-lodo. A Tabela 5.9 apresenta a composição dessas misturas e os respectivos valores de umidade ótima ($w_{ot.}$) obtidos nos ensaios de compactação. Na Figura 5.12, são apresentadas as curvas de compactação para os três traços, de onde foram obtidos os valores de umidade ótima (ponto máximo da curva).

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios realizados para verificar o efeito de diferentes composições sobre a umidade ótima de compactação de misturas solo-cimento-lodo

Traço	Composição			$W_{ot.}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (g/cm ³)
	Solo (%)	Cimento (%)	Lodo (%)		
1	75	10	15	19,0	1,70
2	85	10	5	15,0	1,85
3	80	15	5	14,5	1,84

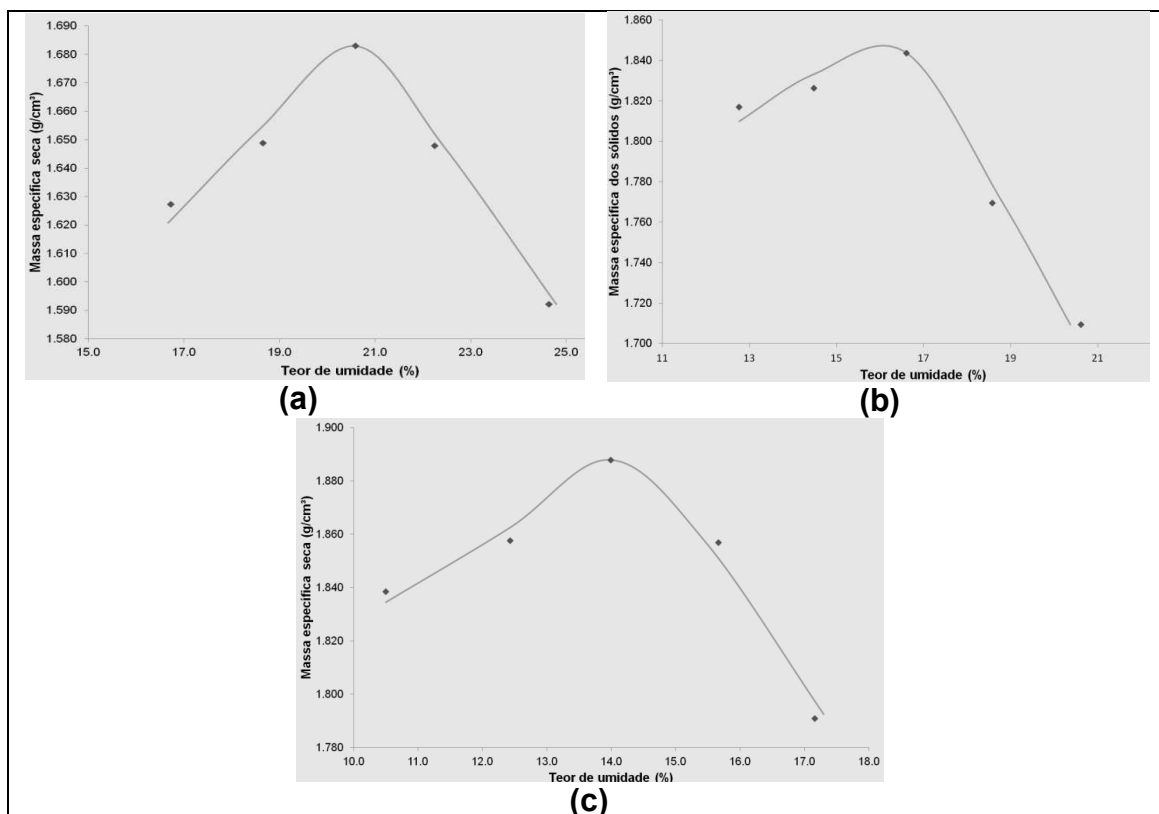


Figura 5.12 – Curvas de compactação dos ensaios realizados para verificar o efeito da composição das misturas sobre a umidade ótima de compactação, para os três traços da Tabela 5.9: traço 1 (a), traço 2 (b) e traço 3 (c).

Como também observaram Foppa (2005) e Kolling *et al.* (2012), o valor da umidade ótima quase não se alterou com a variação do teor de cimento na mistura (traços 2 e 3). Porém, houve uma diferença considerável quando variou o teor de lodo: observou-se uma redução de 4% no valor da umidade ótima do traço 1 (máximo de lodo – 15%) para o traço 2 (mínimo de lodo – 5%).

Variação semelhante a esta foi constatada por Alcântara *et al.* (2009), ao avaliarem a incorporação de resíduos de tinta na fabricação de blocos de encaixe de solo-cimento. Dallacort *et al.* (2002) também verificaram alteração na umidade ótima da mistura ao incorporarem resíduo cerâmico moído, porém, nesse caso, o resíduo causou redução na umidade ótima do solo e aumentou a massa específica do material compactado.

O valor mais elevado de umidade ótima para o traço com mais lodo é, provavelmente, devido ao aumento da fração fina na mistura em função da

composição granulométrica do lodo – 65% de finos. O que também deve ter contribuído para a redução da massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x.}$), dado a menor massa específica dos sólidos na fração fina (argila). Reconhecidamente, solos argilosos apresentam maiores valores de umidade ótima devido à elevada superfície específica das partículas de argila, demandando grande quantidade de água para saturá-las e atingir o ramo úmido da curva de compactação (RICO e DEL CASTILLO, 1974).

Devido à constatação da variação considerável da umidade ótima para as misturas (em função do teor de lodo incorporado), viu-se a necessidade de se avaliar a influência do teor de umidade da massa nas propriedades dos tijolos de solo-cimento-lodo em termos de absorção de água e resistência à compressão. Pretendia-se, assim, verificar se a adoção de um mesmo valor de umidade (provavelmente diferente da umidade ótima do traço) para todas as misturas do delineamento seria, em primeira instância, possível (no que diz respeito à moldagem e retirada dos tijolos da prensa) e, segundo, se não influenciaria de maneira significativa e diferenciada as propriedades dos tijolos para os traços avaliados (fator de confundimento do experimento).

Para tanto, (como descrito no item 4.3) foram executados ensaios com tijolos preparados com os mesmos traços dos ensaios de compactação, variando a umidade em 4% em torno da umidade ótima definida no ensaio, com espaçamento de 2 em 2% entre umidades avaliadas, sendo dois valores acima e dois abaixo do valor da umidade ótima do traço. Para cada valor de umidade da massa, para os três traços do experimento, foram fabricados sete tijolos, sendo quatro para ensaios de resistência à compressão e três para ensaios de absorção de água.

O primeiro aspecto investigado não se mostrou problemático, ou seja, do ponto de vista de prensagem e moldagem constatou-se ser possível produzir tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo de ETA, com todas as umidades e traços avaliados.

A Figura 5.13 apresenta, a título de exemplo, os tijolos produzidos com o traço 1 (75% de solo, 10% de cimento e 15% de lodo).



Figura 5.13 – Tijolos produzidos para avaliar o efeito do teor de umidade sobre as propriedades dos tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo de ETA (traço 1).

Durante a preparação para os ensaios tecnológicos, alguns tijolos do traço 1 se romperam ou tiveram quinas quebradas (Figura 5.14) (e foram descartados da análise), ficando sugestão de que a quantidade de lodo incorporada foi excessiva, ao ponto de comprometer a resistência mecânica dos tijolos. Corroborando essa hipótese, todos os tijolos do ensaio de absorção de água do traço 1 apresentaram trincas profundas (Figura 5.15) após o período de imersão em água do ensaio (24 h), indicando elevada absorção de água e estabilização insuficiente. Porém não foi possível quantificar a absorção, pois os tijolos quebravam ao serem retirados do tanque de imersão.

O traço em questão continha teor elevado de lodo (15%). Em outros trabalhos, o teor máximo de lodo que não comprometeu a qualidade do tijolo de solo-cimento foi de apenas 5% (SILVA, 2009) e de 20% (SILVA, 2011), porém, neste último estudo o lodo foi incorporado juntamente com cinzas de carvão, que vem a ser uma pozolana; além disso, utilizou-se um traço mais forte, com 12% de cimento.

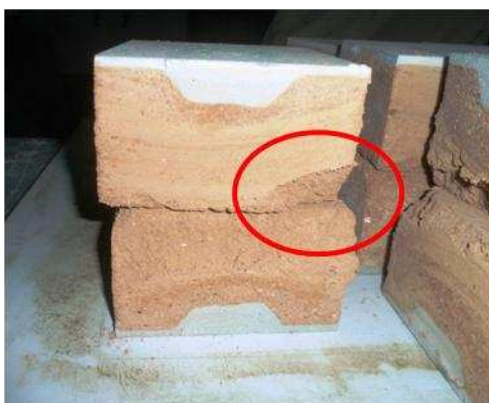


Figura 5.14 – Detalhe de um dos corpos-de-prova do traço 1 em preparação para ensaio de resistência à compressão (em vermelho, quina quebrada durante a manipulação).



Figura 5.15 – Tijolos do traço 1 durante (a) e após (b) ensaio de absorção de água.

Na Tabela 5.10 estão as médias de resistência à compressão e de absorção de água dos tijolos ensaiados, bem como os respectivos traços e teores de umidade da massa no momento da prensagem.

Tabela 5.10 – Médias dos ensaios realizados para avaliar a influência do teor de umidade de prensagem na qualidade dos tijolos

Traço	Composição			Umidade de prensagem (%)	Resistência à compressão média (MPa)	Absorção de água (%) ⁽¹⁾
	Solo (%)	Cimento (%)	Lodo (%)			
1	75	10	15	15,4	0,6	-
				16,5	0,7	-
				19,4	0,6	-
				19,9	0,6	-
				22,6	0,6	-
2	85	10	5	11,0	1,3	19,6
				12,4	1,1	19,1
				14,2	1,3	19,3
				15,9	1,3	18,5
				17,2	1,2	17,9
3	80	15	5	10,5	1,5	19,8
				11,3	2,3	18,3
				13,4	2,2	17,4
				15,0	2,0	17,3
				16,2	1,7	17,3

(1) Não foi possível quantificar a absorção de água dos tijolos do traço 1 (trincas após período de imersão em água).

Observa-se que as maiores respostas de resistência, para os três traços, se encontram próximas aos valores de umidade ótima da Tabela 5.9, mais precisamente, um pouco abaixo daqueles, comportamento este comumente observado em solo-cimento (CORREIA *et al.*, 2002).

Segundo Dallacort *et al* (2002) a influência da umidade está relacionada ao efeito de lubrificação das partículas do solo, o que lhes permite melhor rearranjo de forma a ocupar o menor volume possível após compactação. Um pouco abaixo da umidade ótima tem-se uma estrutura floculada do solo que leva a ganhos de resistência mecânica (FOPPA, 2005).

Quanto à absorção de água, à primeira vista parece existir tendência à redução dessa variável com o incremento da umidade da massa; tendência esta contrária à esperada, já que umidades acima da ótima levam ao aumento da porosidade dos tijolos (vazios antes ocupados pela água em excesso) e, assim,

ao aumento também da absorção de água do tijolo. Uma explicação possível seria a quebra dos agregados de argila do lodo (observados na caracterização do material) favorecida pelo aumento da umidade e, conseqüentemente a formação de fílers – partículas finas que preenchem os espaços vazios dos tijolos, diminuindo a porosidade. Além disso, o efeito de absorção elevada de água pela fração argila do lodo pode ter sido neutralizado pelo recobrimento das partículas dos argilominerais com os produtos da hidratação do cimento (BELL, 1996).

No entanto, para comprovar se essas tendências são significativas, foram realizadas análises de variância (ANOVA) para os modelos de regressão (linear e quadrático) ajustados, que estão apresentadas nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Para a resistência à compressão (Tabela 5.11), em todos os casos avaliados (traços e intervalos de umidade), as hipóteses de nulidade do teste F das ANOVA ($H_0: \beta_1 = 0; \beta_1 = \beta_2 = 0$) foram aceitas ($p\text{-valor} > 0,05$). Assim, para as condições deste experimento, concluiu-se que não houve diferença entre as médias de resistência à compressão dos tijolos para as umidades avaliadas, ou seja, a variação da umidade de prensagem da massa dentro do intervalo estudado não causou variação na resposta de resistência à compressão.

Para a absorção de água (Tabela 5.12), foi constatada relação entre as variáveis ($p\text{-valor} < 0,05$), ou seja, houve alteração na média de absorção de água com a mudança da umidade de prensagem. No entanto, como os valores de absorção média para as umidades avaliadas estiveram sempre abaixo do limite de 20% e os valores individuais abaixo de 22% (Apêndice A), como estabelece a norma NBR 8491 (ABNT, 2012), esta variação não se mostrou suficiente para provocar rejeição dos tijolos de solo-cimento-lodo.

Tabela 5.11 – ANOVA para as regressões linear e quadrática da resistência à compressão em função da umidade de prensagem dos tijolos

Traço 1											
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
Regressão linear	1	0,004	0,004	1,19	0,355	Regressão quadrática	2	0,006	0,003	0,85	0,540
Erro	3	0,009	0,003			Erro	2	0,007	0,003		
Total	4	0,013				Total	4	0,013			
Traço 2											
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
Regressão linear	1	0,000	0,000	0,01	0,925	Regressão quadrática	2	0,004	0,002	0,13	0,889
Erro	3	0,034	0,011			Erro	2	0,030	0,015		
Total	4	0,034				Total	4	0,034			
Traço 3											
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
Regressão linear	1	0,001	0,001	0,01	0,930	Regressão quadrática	2	0,305	0,152	1,98	0,335
Erro	3	2,348	0,130			Erro	2	0,154	0,077		
Total	4	2,349				Total	4	0,459			

FV – fonte de variação; GL - graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio.

Tabela 5.12 – ANOVA para as regressões linear e quadrática da absorção de água em função da umidade de prensagem dos tijolos

Traço 2											
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
Regressão linear	1	1,666	1,666	18,94	0,022	Regressão quadrática	2	1,790	0,895	12,77	0,073
Erro	3	0,264	0,088			Erro	2	0,140	0,070		
Total	4	1,930				Total	4	1,930			
Traço 3											
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
Regressão linear	1	3,242	3,242	7,84	0,068	Regressão quadrática	2	4,213	2,106	15,61	0,060
Erro	3	1,240	0,413			Erro	2	0,270	0,135		
Total	4	4,483				Total	4	4,483			

FV – fonte de variação; GL - graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio.

Com esses resultados, foi possível adotar o mesmo teor de umidade (15%) para todas as misturas do delineamento, ainda que esta fosse diferente da umidade ótima do traço, contanto, naturalmente, que a diferença para a umidade ótima do traço não ultrapassasse os 4% avaliados neste estudo de umidades, pois as conclusões dos testes somente são válidas para o intervalo de umidades avaliado – 4% acima ou abaixo da umidade ótima do traço.

Apesar das incertezas da extrapolação dos resultados obtidos para os três traços avaliados para os demais traços do experimento de mistura (ver Tabela 4.5) não avaliados aqui, esta foi uma simplificação consciente, pois os traços ensaiados representam misturas extremas, ou seja, com teores alto (15%) e baixo (5%) do lodo (principal causa de variação da umidade ótima). Não obstante é preciso ainda reconhecer que no caso da absorção de água, os dados para o traço 1 não se fizeram disponíveis, ou seja, somente foram obtidas informações para os traços com 5% de lodo.

Além de respaldar a eliminação do teor de umidade como fonte de variação no experimento de mistura, a análise feita permite afirmar que a variação do teor de umidade da massa, não ultrapassando 4% acima ou abaixo da umidade ótima do traço, não causará efeito significativo na resistência mecânica dos tijolos de solo-cimento fabricados com os traços avaliados.

Esta é uma informação importante para a produção de tijolos em escala real, pois, por se tratar de um processo menos controlado que experimentos de laboratório, ocorrem inevitavelmente variações de umidade de prensagem entre lotes de tijolos fabricados. Uma das causas de variação de umidade em campo certamente reside no próprio método prático, muito disseminado mas de baixa precisão, para determinar quando a massa apresenta umidade adequada para a prensagem, denominado teste do “bolo”.

Considerando que a variação de umidade da massa com comportamento aceitável pelo teste do “bolo” não seja superior ao intervalo aqui avaliado, sugere-se que os resultados obtidos sirvam inclusive de respaldo ao uso prático desse teste. Nesse sentido cabe registrar o relato de Grande (2003) de que, para o solo avaliado em seu trabalho, o comportamento descrito no teste

do “bolo” foi observado na massa com umidades desde 4,5% até 10%, intervalo esse mais estreito que o avaliado no presente experimento.

5.3. Avaliação dos tijolos do experimento de mistura

Conforme detalhado em Material e Métodos, os traços para os experimentos de mistura (indicados na Tabela 5.13) foram definidos de acordo com o delineamento em rede simplex (descrito no item 4.7) e com critérios descritos no item 4.6 para a definição dos intervalos de proporções (limites inferior e superior) dos componentes das misturas solo-cimento-lodo. Além disso, como justificado no item 4.8, a umidade de prensagem dos tijolos foi mantida constante (15%) em todos os traços ensaiados.

A NBR 8491 (ABNT, 2013) estabelece requisitos de qualidade de tijolos de solo-cimento em termos de dimensões, resistência à compressão e absorção de água. Entretanto, como discutido no item anterior, dos resultados dos ensaios para avaliação da umidade de prensagem inferiu-se que a absorção de água não seria fator limitante na escolha do traço para fabricação dos tijolos de solo-cimento-lodo e, assim, a qualidade dos tijolos no experimento de mistura foi avaliada somente em termos de padrões dimensionais e de resistência à compressão.

Nenhum tijolo apresentou problema de variação das dimensões nominais, mantendo-se sempre, em todos os traços avaliados, dentro do limite de tolerância especificado na norma NBR 8491 ($\pm 1,0$ mm). Os resultados, na íntegra, encontram-se no Apêndice B.

As médias de resistência à compressão dos tijolos ensaiados estão apresentados na Tabela 5.13. Os valores individuais, de cada tijolo, se encontram no Apêndice B. Todos os tijolos do traço com máximo de lodo (traço 6) se mostraram demasiadamente frágeis (baixa resistência mecânica) e se romperam durante a manipulação para preparação do corpo-de-prova para o ensaio (capeamento, corte e colagem das faces), portanto, antes de serem ensaiados.

Tabela 5.13 – Médias da resistência à compressão dos tijolos do experimento de mistura (médias e desvios-padrão).

Traço	Solo (%)	Lodo (%)	Cimento (%)	Resistência à compressão média (MPa)
1	92,5	0	7,5	1,97
2	87,5	5	7,5	0,91
3	87,5	0	12,5	4,69
4	82,5	10	7,5	0,55
5	82,5	5	12,5	1,95
6	82,5	0	17,5	5,03
7	77,5	15	7,5	0 ⁽¹⁾
8	77,5	10	12,5	0,97
9	77,5	5	17,5	2,83
10	77,5	0	22,5	7,21
11	87,5	2,5	10	1,99
12	80	10	10	0,77
13	80	2,5	17,5	4,20

(1) todos os tijolos deste traço romperam-se antes do ensaio de resistência.

Em geral, a incorporação de lodo piorou a resistência mecânica dos tijolos de solo-cimento. Considerou-se que oito das trezemisturas avaliadas atenderam ao limite inferior de especificação da norma NBR 8491, que exige resistência mínima individual de 1,7 MPa para os tijolos ensaiados.. Porém, cabe notar que as cinco misturas que não se adequaram apresentaram valor extremamente baixo de resistência mecânica, sendo, salvo uma exceção, misturas com incorporação de 10% de lodo. Há, portanto, indícios que este valor de incorporação de lodo já compromete a resistência mecânica dos tijolos: misturas com 10% de lodo e até 12,5% de cimento.

Na Tabela 5.14 são apresentadas as médias da massa específica aparente dos tijolos, obtidos pela razão do peso (Apêndice B) e do volume dos tijolos (calculado a partir da análise dimensional).

Tabela 5.14 – Médias da massa específica aparente dos tijolos do experimento de mistura

Traço nº	Solo (%)	Lodo (%)	Cimento (%)	Massa específica aparente média (Kg.m ⁻³)
1	92,5	0	7,5	1710
2	87,5	5	7,5	1690
3	87,5	0	12,5	1860
4	82,5	10	7,5	1710
5	82,5	5	12,5	1740
6	82,5	0	17,5	1770
7	77,5	15	7,5	1580
8	77,5	10	12,5	1600
9	77,5	5	17,5	1740
10	77,5	0	22,5	1790
11	87,5	2,5	10	1730
12	80	10	10	1640
13	80	2,5	17,5	1750

Segundo PCA (1976), citada por Dallacort *et al.* (2002), a massa específica é considerada alta quando se situa entre 2000 e 2320 Kg.m⁻³, e baixa entre 1360 e 1600 Kg.m⁻³. Essa variável é utilizada muitas vezes como indicadora da eficiência da compactação do material na prensa e da resistência à compressão dos tijolos, sendo que quanto maior a massa específica, maior será a resistência. Ainda segundo PCA, uma redução de 20 Kg.m⁻³ na massa específica aparente implica decréscimo de 0,11 MPa na resistência do solo-cimento. Com base na referência citada, os valores de massa específica dos tijolos ensaiados podem então ser considerados baixos.

De forma análoga ao observado para a resistência à compressão, a massa específica aparente dos tijolos também decresceu com o incremento de lodo na mistura. Costuma-se relacionar a redução da massa específica com diferenças de compactação, porém, neste caso, acredita-se que a redução com a incorporação de lodo se deva ao aumento da fração argila, com menor massa específica dos sólidos. Isso também é observado quando são comparados os valores de massa específica máxima das misturas do ensaio de compactação do item 5.2: o menor valor correspondeu à mistura com o máximo de lodo. Assim, devido à alteração da composição granulométrica do material, essa

variável não está relacionada apenas com o grau de compactação da massa, mas também com sua composição, não sendo um bom indicador da estabilização mecânica por prensagem.

Por meio do teste de correlação de Pearson verificou-se a existência de correlação positiva (coeficiente de correlação igual a 0,7; p-valor < 0,05) entre a resistência à compressão e a massa específica aparente. Isso confirma o que ocorre com solo-cimento convencional (DALLACORT *et al.*, 2002), porém, reforça-se que, neste caso, as variações estão relacionadas à alteração na composição granulométrica e não como indicador direto da compactação como no caso do solo-cimento convencional.

Concluiu-se que o aumento do teor de lodo provocou redução da massa específica e da resistência à compressão dos tijolos.

5.4. Modelo de mistura do experimento

Na Tabela 5.15 estão apresentados os dados experimentais utilizados para o ajuste dos modelos de mistura: médias de resistência à compressão dos tijolos produzidos para cada traço, proporções dos componentes e dos pseudocomponentes (ver item 3.6.4). E na Tabela 5.16 é apresentado o resumo da análise estatística dos ajustes dos modelos de mistura aos dados experimentais: linear, quadrático incompleto (quadrático* - apenas termos significativos), quadrático completo, cúbico especial e cúbico completo.

Tabela 5.15 – Dados utilizados para o ajuste dos modelos de misturas

Traço	Componentes originais (%)			Pseudocomponentes			Resistência à compressão (MPa) ⁽¹⁾
	Solo (x ₁)	Lodo (x ₂)	Cimento (x ₃)	Solo (v ₁)	Lodo (v ₂)	Cimento (v ₃)	
1	0,925	0	0,075	1	0	0	1,97
2	0,875	0,05	0,075	2/3	1/3	0	0,91
3	0,875	0	0,125	2/3	0	1/3	4,69
4	0,825	0,10	0,075	1/3	2/3	0	0,55
5	0,825	0,05	0,125	1/3	1/3	1/3	1,95
6	0,825	0	0,175	1/3	0	2/3	5,03
7	0,775	0,15	0,075	0	1	0	0 ⁽²⁾
8	0,775	0,10	0,125	0	2/3	1/3	0,97
9	0,775	0,05	0,175	0	1/3	2/3	2,83
10	0,775	0	0,225	0	0	1	6,99
11	0,875	0,025	0,10	2/3	1/6	1/6	1,99
12	0,80	0,10	0,10	1/6	2/3	1/6	0,77
13	0,80	0,025	0,175	1/6	1/6	2/3	4,2

(1)médias dos seis tijolos ensaiados; (2)romperam antes do ensaio.

Tabela 5.16 – Resumo da análise estatística dos ajustes dos modelos de mistura aos dados experimentais

FV	SQ	GL	QM	Valor F	p-valor	R ² (%)	PRESS	R ² pred (%)
Linear	49,96	2	24,90	48,43	0,000	91	10,20	81
Quadrático*	3,55	1	3,55	19,88	0,002	97	2,75	95
Quadrático completo	3,94	3	1,31	7,58	0,013	98	8,30	85
Cúbico especial	0,05	1	0,05	0,05	0,621	98	10,30	81
Cúbico completo	0,73	3	0,24	1,70	0,336	99	58,41	0

FV: fonte de variação; GL: n^{os} de graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio

$$R^2 \text{ (coeficiente de determinação)} = SQ \text{ residual} / SQ \text{ Total}; \text{ PRESS} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2;$$

$$R^2 \text{ predição} = 1 - \frac{\text{PRESS}}{SQ \text{ Total}}$$

Todos os modelos ajustados apresentaram coeficiente de determinação elevado (acima de 90%), até mesmo o modelo mais simples (linear), e, portanto, boa capacidade de explicar a variação da resposta em função da composição das misturas. Porém, nem todos apresentaram parâmetros

significativos, sendo que, de acordo com a análise de variância, apenas os modelos linear e quadrático foram adequados (p -valor $< 0,05$). A escolha entre o modelo linear ou quadrático foi baseada em sua capacidade de prever novas respostas, dada pela estatística PRESS e R^2 de predição. Com esse critério constatou-se a superioridade do modelo de mistura apresentado na Equação 5.1, um modelo quadrático incompleto, denominado na Tabela 5.16 quadrático*, contendo apenas termos significativos. A adição de um termo ao modelo linear de mistura, correspondente a interação do cimento com o lodo, aumentou a capacidade deste em prever novas respostas.

A Equação 5.1 apresenta o modelo de mistura do experimento (modelo quadrático* da Tabela 5.16), em termos dos pseudocomponentes. Para a conversão em componentes originais, a Equação 3.11 foi rearranjada e é representada na Equação 5.2.

$$y = 1,98v_1 - 0,07v_2 + 7,13v_3 - 7,54v_2v_3 \quad (5.1)$$

Onde: y é a resistência à compressão média estimada, v_1 corresponde ao componente solo, v_2 ao lodo, v_3 ao cimento e v_2v_3 à interação lodo-cimento (única interação significativa pelo teste t de Student).

$$x_i = (v_i - v_iL) + L_i \quad (5.2)$$

Onde:

L_i = limite inferior de proporção do i -ésimo componente;

$$L = \sum_{i=1}^q L_i$$

v_i = proporção codificada (L-pseudocomponentes) para o i -ésimo termo;

x_i = proporção original do i -ésimo componente.

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam, graficamente, a verificação do atendimento às pressuposições da análise estatística realizada. Em nenhum

dos três gráficos há indicação que as suposições não devam ser aceitas. Assim, a Equação 5.1 pode ser tomada como estatisticamente significativa para descrever o comportamento da resistência à compressão média dos tijolos de solo-cimento-lodo em função das frações mássicas dos componentes da mistura.

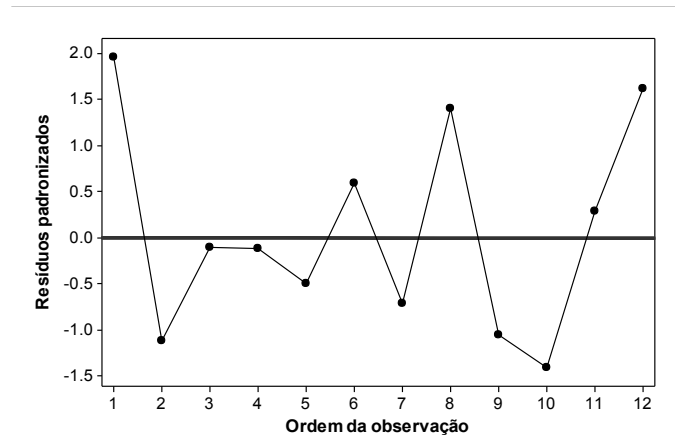


Figura 5.16 – Resíduos padronizados vs. ordem das observações.

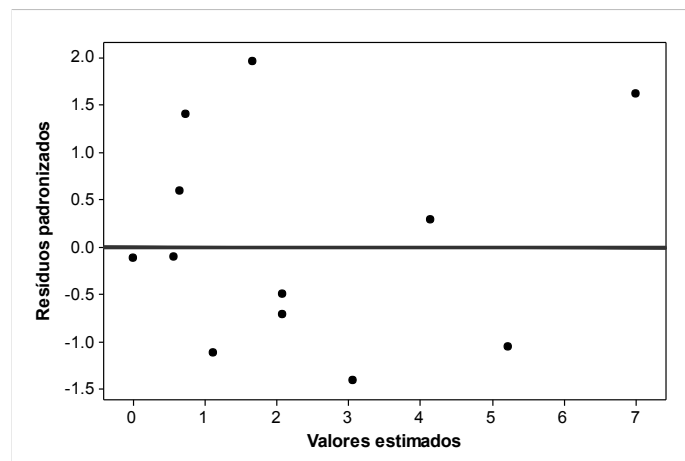


Figura 5.17 – Resíduos padronizados vs. valores estimados pelo modelo de mistura

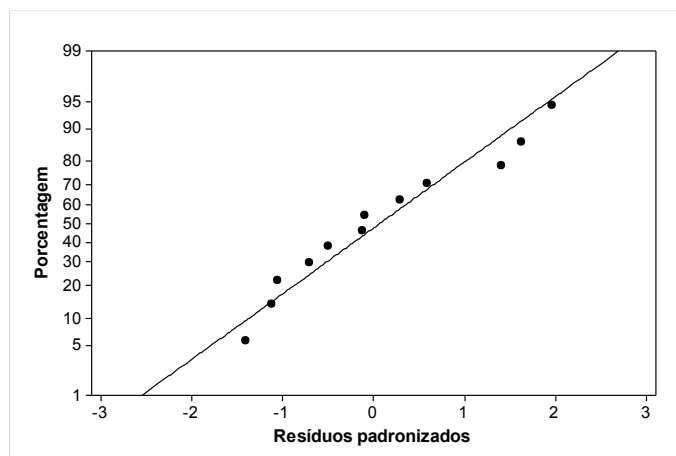


Figura 5.18 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizados

Da análise do modelo de mistura (Equação 5.1), destacaram-se os elevados coeficientes dos termos linear do cimento (v_3) e da interação dupla lodo e cimento (v_2v_3), com sinais positivo e negativo, respectivamente, indicando que houve uma relação antagônica entre estes componentes.

Com essa análise foi possível inferir que se o objetivo for elevar a resistência mecânica dos tijolos, deve-se favorecer a incorporação de cimento e reduzir o teor de lodo na mistura. Observou-se que a resposta máxima (valor próximo a 7,0 MPa) é obtida para o traço com o teor máximo de cimento e o mínimo dos demais (representado pelo termo linear v_3).

Como foi visto no item 3.5.3, a resistência mecânica dos tijolos de solo-cimento é consequência de processos de estabilização física (prensagem) e química (reações de cimentação) do solo. Assim, como as condições de prensagem e cura dos tijolos foram consideradas homogêneas, inferiu-se que o ganho de resistência mecânica dos tijolos se deve apenas ao incremento do aglomerante hidráulico (cimento). Assim, a tendência de aumento de resistência à compressão com o teor de cimento expresso pelo modelo foi coerente e já era esperado.

A interação antagônica do lodo com o cimento foi constatada também pelo maior espaçamento entre as linhas de isorresistência do gráfico de contorno apresentado na Figura 5.19, quando essas estão localizadas próximo às misturas com maior teor de lodo. Isso significa que, além de resultar em baixa

resistência mecânica, a incorporação de lodo tende a retardar o incremento de resistência conferida pelo aglomerante. Para as misturas com menos lodo, o incremento de resistência foi mais sensível ao aumento de cimento (linhas próximas e praticamente paralelas), isto é, se gastou menos cimento para elevar a resistência do tijolo. Na prática, isso quer dizer que traços com lodo consumirão proporcionalmente mais cimento que o solo-cimento convencional (sem lodo) para obter incremento de resistência mecânica, aspecto este que já havia sido observado por Silva (2011).

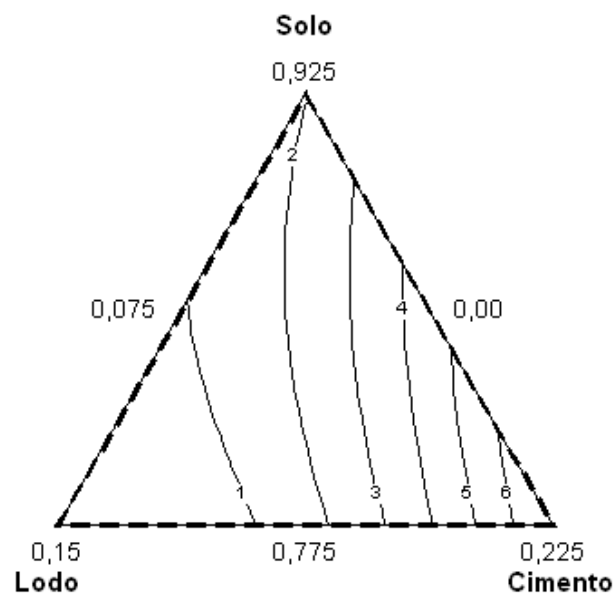


Figura 5.19 – Gráfico com linhas de contorno de isorresistência, estimadas pelo modelo, para misturas dentro da região experimental.

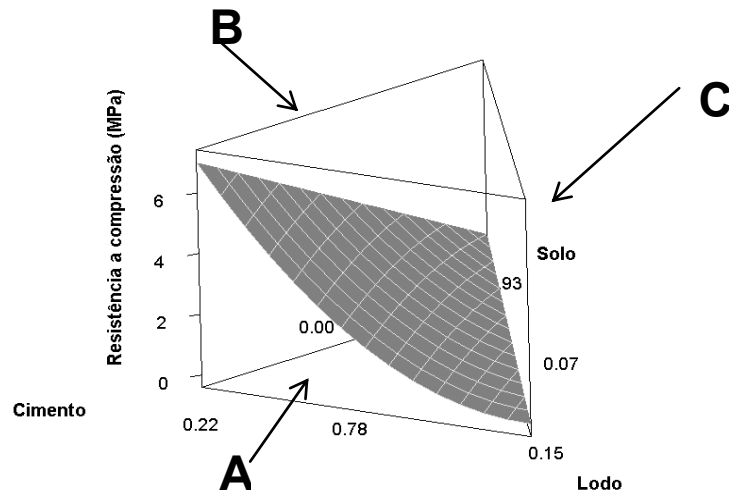


Figura 5.20 – Superfície de respostas estimadas pelo modelo de mistura.

Na superfície de respostas estimadas pelo modelo (Figura 5.20), a interação antagônica entre o lodo e o cimento está expressa na curvatura na face lodo-cimento (face A da figura), sendo que a taxa de incremento de resistência, ou declividade da curva, aumenta no sentido do mínimo de lodo (“caminhando” em direção ao canto superior esquerdo da figura). Nas demais faces da Figura 5.20 (faces B e C), o comportamento da variação de resistência com as misturas é linear, porém apresenta a mesma tendência – aumenta para valores altos de cimento e baixos de lodo. Esse crescimento linear de resistência à compressão com o incremento de cimento na massa foi observado também por Foppa (2005) para misturas de solo-cimento convencional

Acredita-se que a interação antagônica do lodo com o cimento seja devida à composição predominantemente fina (65%) e também ao teor de matéria orgânica relativamente elevado (8,4%) do lodo, pois esses dois fatores, reconhecidamente, prejudicam e retardam as reações do cimento (BELL, 1996; FIQUEROLA, 2004). Como explicam Ingles e Metcalf (1972) citados por Foppa (2005), essas partículas (finas e, ou orgânicas) apresentam elevada densidade de cargas superficiais e grande superfície específica, interagindo tanto com a água presente na mistura, tornando-a indisponível para a hidratação do cimento, quanto com os produtos da hidratação do clínquer, prejudicando as reações secundárias desses produtos.

Explicando em termos dos níveis de cimentação que podem ocorrer (representados na Figura 5.21), acredita-se que a presença de lodo impediu a evolução da cimentação, predominando a cimentação fraca.

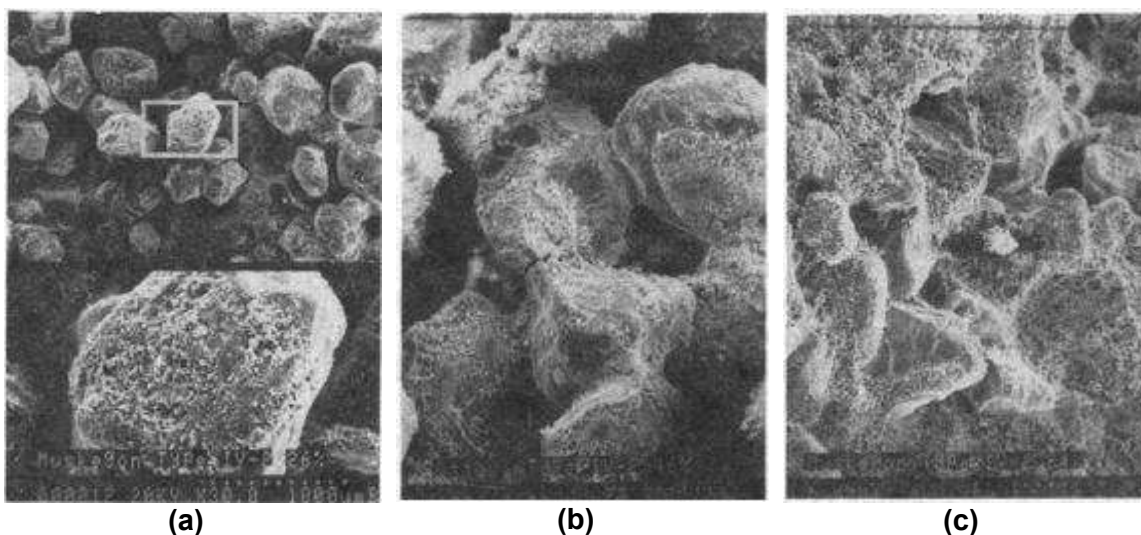


Figura 5.21 – Níveis de cimentação que ocorrem em areia estabilizada com cimento: cimentação fraca em que os produtos de hidratação do cimento recobrem parcialmente a superfície das partículas de areia (a); cimentação média, em que a maior parte das partículas de areia está unida pela cimentação (b); e forte, onde os produtos cimentantes ocupam quase todos os espaços vazios (c).

Fonte: Chang e Wood (1992)

Apesar de não terem sido feitas micrografias dos tijolos para observar o nível de cimentação e confirmar o que foi dito, pode-se comparar o comportamento do lodo com o de solos argilosos que, como descreveu Bell (1996), independentemente do argilomineral presente, adsorvem os produtos da hidratação do estabilizante, que passam a recobrir a superfície do argilomineral, imobilizando-os e impedindo que ocorram as reações pozolânicas que levam a estabilização química do solo até que esta demanda (para recobrimento da superfície dos argilominerais) não seja suprida. Portanto em solos argilosos é necessário mais cimento para atingir maiores níveis de

cimentação, em comparação com solos arenosos que possuem partículas com área específica menor e menor densidade de carga.

A composição predominantemente argilosa do lodo, apesar de não ter sido comprovada pela análise granulométrica convencional devido à suposta presença da argila na forma de agregados de grande estabilidade quantificados como silte (pseudo-silte), desempenhou importante papel na determinação da resistência mecânica dos tijolos, principalmente na interação antagônica com o cimento, pois se trata de uma fração ativa dos solos que, como dito, provavelmente interferiu nas reações do cimento com a água e na estabilização do solo. Indicar-se-ia neste caso a adição de areia para contrabalancear esse efeito, o que é prática comum quando o solo é excessivamente argiloso (DALLACORT *et al.*, 2002; CABALA, 2007; FERREIRA *et al.*, 2008; KOLLING *et al.*, 2012). Porém, essa necessidade não tinha sido diagnosticada antes devido à leitura errônea da granulometria do lodo e das misturas do solo e lodo, que apontou adequação da mistura solo e lodo para uso na fabricação de tijolos (ver item 5.1.1).

Outro fator que pode ter influenciado na resistência à compressão dos tijolos, porém, acredita-se, de maneira secundária, seria a redução da compactação na presença do lodo, devido ao aumento da distância entre partículas (ou o tamanho dos poros dos tijolos com lodo), dificultando assim a interação e ligação destas pelos agentes cimentantes, como observou Horpibulsuk *et al.* (2010) em imagens de microscopia eletrônica de varredura de solos argilo-siltosos estabilizados com cimento em diferentes níveis de compactação. Com isso, supõe-se que o lodo tenha interferido na estabilização física e química do solo, comprometendo a resistência mecânica dos tijolos.

Com esses resultados descartou-se a hipótese da atuação do lodo como uma pozolana, levantada no item 5.1.2 quando se constatou a presença elevada de alumínio e silício no lodo (como se sabe, esses elementos presentes na forma amorfa podem reagir com a cal oriunda da hidratação do cimento formando compostos cimentantes, o que se denomina reação pozolânica). Ao menos para as porcentagens de incorporação de lodo estudadas, parece que o alumínio e o silício presentes no lodo não estiveram disponíveis para as

reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio da hidratação do cimento ou não foram suficientes.

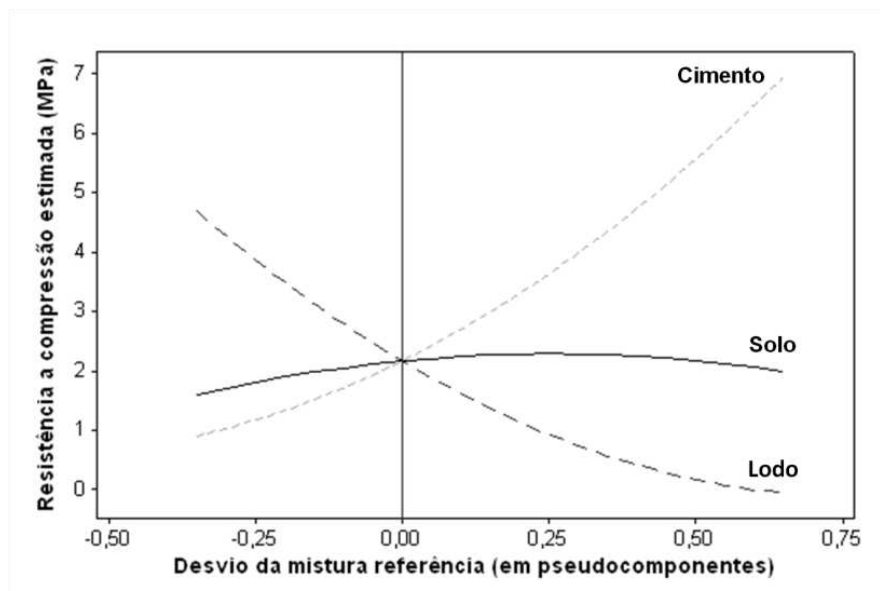


Figura 5.22 – Gráfico de resposta de componentes individuais partindo do ponto central ou centroide do delineamento (mistura referência – 82,5 % de solo, 5% de lodo e 12,5% de cimento).

Percebe-se na Figura 5.22 a influência fortemente negativa do lodo na resistência à compressão dos tijolos. A declividade acentuada e negativa da curva que representa as misturas sobre o eixo do lodo demonstra que incrementos discretos de lodo na massa resultam em perda substancial de resistência dos tijolos.

Na Figura 5.22 observa-se também que a variação do teor de solo na massa, representada por uma curva praticamente retilínea e horizontal em relação ao eixo das abscissas, quase não causa variação na resposta de resistência à compressão média dos tijolos (eixo das ordenadas), tratando-se de um componente inativo. Nota-se ainda que é a presença do cimento nas misturas solo-cimento que governa o ganho de resistência dos tijolos, sendo o componente que mais influenciou na resposta, constatado pela maior declividade (positiva) da linha que representa a influência do cimento nas resposta.

O comportamento inativo do solo na mistura é característico de solos arenosos e é um dos condicionantes para a opção por este tipo de solo em solo-cimento. Como explicam Segantini e Alcântara (2007), diferentemente da argila, a presença de grãos de areia grossa e de pedregulhos é benéfica, pois, estes são materiais inertes com função apenas de enchimento e que favorecem a disponibilização de maiores quantidades de cimento para aglomerar os grãos menores e preencher os espaços interpartículas.

No entanto, apesar de comprovadamente piorar a resistência mecânica dos tijolos, concluiu-se que é possível incorporar o lodo da ETA UFV em matriz de solo-cimento para fabricação de tijolos maciços sem função estrutural que atendam ao requisito de resistência média de 2,0 MPa da norma NBR 8491 (ABNT, 2012). A área hachurada na Figura 5.23 representa, no espaço experimental, os traços possíveis para fabricação de tijolos maciços de solo-cimento-lodo. De forma geral, traços com valores baixos de incorporação de lodo, altos de cimento e quaisquer valores de solo.



Figura 5.23 – Região experimental com representação das misturas solo-cimento-lodo para produção de tijolos que atendam ao limite mínimo de especificação para a resistência à compressão de acordo com a norma NBR 8492 (área hachurada).

5.5. Traço escolhido

Por não atuar como um estabilizante ou ligante (pozolana) o lodo não pôde substituir o cimento, tendo função apenas de enchimento, assim como o solo. Além disso, por interferir nas reações do cimento, para produzir tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo deve-se aumentar o teor de cimento na mistura, como ocorre na estabilização de solos argilosos. A Figura 5.24 apresenta o traço com resistência satisfatória e com o maior teor de lodo possível, que corresponde à mistura com o mínimo de solo, isto é, com o lodo substituindo, em pequena proporção, o solo.

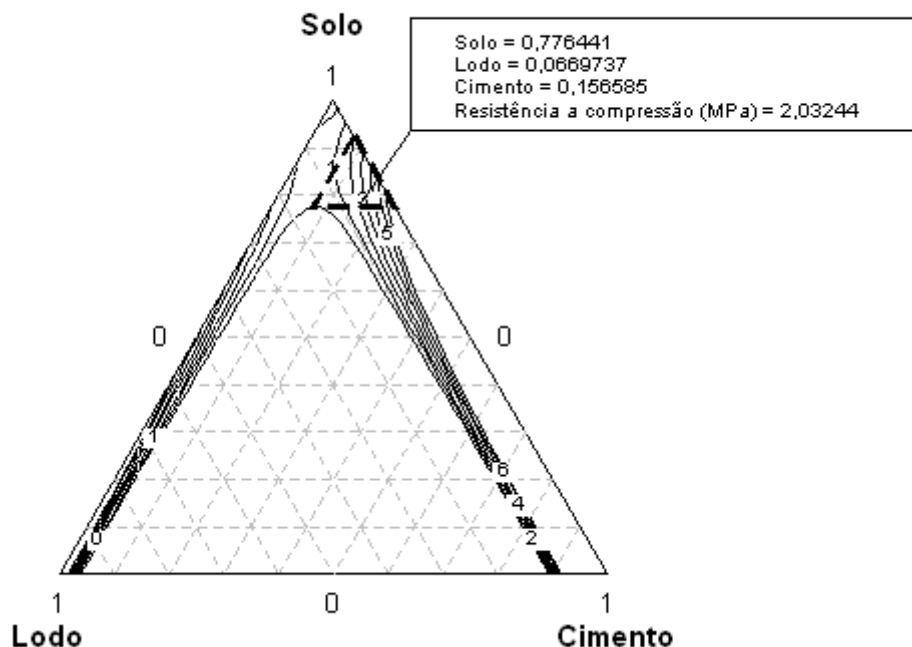


Figura 5.24 – Traço indicado para a fabricação dos tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo do decantador da ETA UFV e a localização da região experimental no simplex original para misturas ternárias (representada pelo triângulo pontilhado).

Pensando na produção em campo, que é um processo bem menos controlado que a experimentação, indica-se o uso de um traço mais conservador: 6% de lodo, 18% de cimento e 76% de solo, que corresponde, em volume, ao traço 1:0,3:5.

O teor máximo de incorporação de lodo determinado aqui é próximo ao teor recomendado por Silva (2009) (5%) para a produção em campo de tijolos de solo-cimento incorporados com lodo de ETA. Próximo também ao indicado para uso em concreto para não comprometer sua qualidade em termos de absorção de água e trabalhabilidade (HOPPEN *et al*, 2006).

Porém, isso implica aumento dos gastos com cimento, sendo que o traço recomendado (1:0,3:5) é um traço com muito mais cimento que o traço convencional de solo-cimento (1:10). Nesse caso, a relação solo e cimento é a metade da proporção do traço convencional e, portanto, cabe verificar se este uso é viável economicamente.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos objetivos propostos e de acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

- O solo utilizado no experimento possui características adequadas para o emprego na fabricação de tijolos de solo-cimento. Já o lodo da ETA UFV apresenta composição predominantemente fina (65% passante na peneira nº 200) e limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade) elevados, e, portanto, deve ser incorporado em proporções controladas para não comprometer a qualidade dos tijolos de solo-cimento.
- A caracterização mineralógica e morfológica do lodo da ETA UFV evidencia dificuldade na desagregação do material e, assim, na separação das frações, principalmente silte e argila. Suspeita-se, portanto, que a porcentagem de argila no lodo de ETA seja subestimada pelas técnicas convencionais de análise granulométrica de solos.
- É possível utilizar teores de umidade de misturas solo-cimento-lodo variando 4 pontos percentuais em torno da umidade ótima do traço definida em ensaios de compactação em laboratório, sem interferência na resistência mecânica dos tijolos produzidos.
- O lodo da ETA UFV interferiu negativamente na resistência mecânica dos tijolos por interagir de forma antagônica com o cimento.
- É possível fabricar tijolos com resistência média que atenda ao requisito mínimo da norma NBR 8491, utilizando, porém, traços com no máximo 6% de lodo. Sugere-se o traço de 1:0,3:5 para a produção em campo de tijolos de solo-cimento-lodo. Trata-se de um traço com proporção elevada de cimento e por isso, com custo mais alto de produção do que o solo-cimento convencional.

Ao final deste trabalho, ficam algumas recomendações para futuras investigações:

- Verificar se a absorção de água dos tijolos com o traço escolhido com base na resistência mecânica atende aos requisitos da norma.
- Como o traço escolhido com base na resistência mecânica é, em princípio e comparativamente ao solo-cimento convencional, pouco atrativo do ponto de vista econômico por demandar maiores proporções de cimento, outra possibilidade seria a correção granulométrica das misturas com adição de areia quartzosa, como é feito quando o solo a ser utilizado não possui composição granulométrica adequada para uso em solo-cimento.
- Visando também aumentar o uso de lodo de ETA em solo-cimento, pode-se testar o uso de outros agentes aglutinantes, como a cal hidratada, que possui melhor desempenho na estabilização de solos argilosos.
- Com enfoque na caracterização adequada de lodos de ETA, tornam-se necessários estudos com vistas ao desenvolvimento de métodos apropriados para a análise granulométrica desse material, particularmente para determinação da fração argila.

Por fim, em que pesem as observações anteriores de custos potencialmente elevados de produção de tijolos de solo-cimento-lodo, sugere-se que esses custos sejam devidamente apropriados e que sirvam a avaliações comparativas com outras formas de manejo desse resíduo, como, por exemplo, disposição em aterro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Análise crítica de implantação de sistemas naturais de remoção de água livre de lodo de ETA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 2003 (CD ROM).

ALEXANDRE, J. **Análise da matéria-prima e composição de massa utilizada em cerâmica vermelha.** 2000. 174 f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.

ALVARENGA, R. C. S. S.; FASSONI, D. P.; COUTO, L. G.; MARQUES, E. A. G.; MOREIRA, M. S. S.; SANTOS, H. P. **Aproveitamento de resíduos industriais na fabricação de tijolos para construção de habitações de interesse social.** 2009. 54 f. Relatório final de projeto de pesquisa, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA. **Technology transfer handbook: management of water treatment plant residual.** New York: ASCE Publications, 1996.

ANDRADE, P. S. **Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: estudo de caso.** 2005. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ANDREOLI, C. V. (coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. (Projeto PROSAB).

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P. S. Produção, composição e constituição de lodo de estações de tratamento de água (ETA). In: ANDREOLI, C. (coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2006. p. 29-48 (Projeto PROSAB).

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos.** Notas de aula, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transportes, 2005. Disponível em:
<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoi o/APOSTILA_SOLOS.pdf>. Acesso em: 20 de julho de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais.** São Paulo: ABCP, 1985 (Boletim técnico 111).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento:** normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: ABCP, 1986 (Estudo Técnico 35).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada.** São Paulo: ABCP, 1988 (Boletim Técnico 112).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo: Publicações ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7207 – Terminologia e classificação de pavimentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508 – Determinação da massa específica dos grãos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502 – Rochas e Solos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8452 – Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica – Padronização.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15310 – Telha cerâmica de capa e canal.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8491 – Tijolo de solo-cimento — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8492 – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13554 – Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual: procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSIS, J. B. S. **Avaliação experimental do comportamento estrutural de paredes não armadas, submetidas à compressão axial, construídas com Tijolito.** 2001.188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.609-617, 2004.

BACCHI, A. V.; MANHÃES, R. T.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água. **Cerâmica**, v.54, n. 332, p. 395-403, 2008.

BARDOU, P.; ARZOUMANIAN, V. **Arquitecturas de adobe**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1979. 165p. (Tecnología y arquitectura).

BARROS NETO, B.; SPACINO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2 ed., Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

BARROSO, M. M.; e CORDEIRO, J.S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

BARROSO, M. M. **Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de água no desaguamento por leito de drenagem**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BATISTA, L. A.; CABRAL, V. A. L. **Ensaio com lodo do decantador da ETA UFV: caracterização, desaguamento em leito de secagem e possibilidades de aproveitamento**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, v. 42, p. 223-237, 1996.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>> Acesso em: 01 de junho de 2012.

BRASIL. Lei nº 11.124, de 16 de junho de 2005. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Habitação de Interesse Social – SNHIS, cria o Fundo Nacional de Habitação de Interesse Social – FNHIS e institui o Conselho Gestor do FNHIS. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11124.htm>. Acesso em: 01 de junho de 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 dez. 2011, nº 239, seção 1, p. 39-46.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Déficit habitacional no Brasil 2008**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação.– Brasília, Ministério das Cidades, 2011. 140 p. Elaboração: Fundação João Pinheiro, Centro de Estatística e Informações. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/DHB_2008_Final_2011.pdf>. Acesso em: 01 de junho de 2012.

CABALA, G. V. E. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

CATTON, M.D. Soil-Cement Technology – A Résumé. Research and Development Laboratories of Portland Cement Association: **Bulletim 136**. Reprinted from Development Laboratories, v. 4, n. 1, p. 13-21, 1962.

CARVALHO, M.; ROQUE, A. J. Valorização de lamas de ETAs – Perspectivas de aplicação em obras geotécnicas. In: SEMINÁRIO DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM OBRAS GEOTÉCNICAS, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009. **Anais...** Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo-cimento**. 3 ed. São Paulo: CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/OEA/CEBRACE/ ABCP, 1984.

COMUSA – Serviço de Água e Esgoto de Novo Hamburgo. **Site oficial**. 2013. Disponível em: <<http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. 1993. 342f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

CORDEIRO, J. S. Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 125-142 (Projeto PROSAB).

CORDEIRO, J.S. Processamento de lodos de Estação de Tratamento de Água – ETA. In: ANDREOLI, C.V. (coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. Seção 2. p. 119-243 (Projeto PROSAB).

CORDEIRO, J.S. Micropropriedades de lodos gerados em decantadores de Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., Cancún, México, 2002. **Anais...** Cancún: AIDIS, 2002.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: design, models, and the analysis of mixture**. 3ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

COUTINHO, J. S. **Ataque por sulfatos**. In: COUTINHO, J. S. Agregados para argamassas e betões. Materiais de Construção 1. Lisboa: DEC-FEUP, 2001.

CSN CIMENTOS S/A. **Certificado de ensaios físicos e químicos de cimento**. Relatório interno de qualidade, Volta Redonda, agosto de 2013.

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p.511-518, 2002.

DEDAVID, B. A. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores** [recurso eletrônico]. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 20 de agosto de 2013.

DEMATTOS, M.; COSTA, J. G.; FONSECA, D. A.; BRAGA, J. P. C.; JANZEN, W. Redução do volume de lodo gerado em ETAs. A proposta de recuperação do coagulante pelo processo de acidificação no sistema Rio Manso. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001. CD-ROM.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **ME 129 – solos: compactação utilizando amostras não-trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

DESTEFANI, A. Z. **Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe**. 2009. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

DIAS, L. M.; BATALIONE, G.; MORAIS, F. U. de; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. de. Alternativa de destinação final do lodo de estação de tratamento de água - Fabricação de blocos cerâmicos. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29., 2004, San Juan. **Anais...** San Juan: AIDIS, 2004.

DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; SOUZA FILHO, A. G. Água de lavagem de filtros rápidos. In: REALI, M. A. P. (coordenador). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 143-167 (Projeto PROSAB).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Serviço nacional de levantamento e conservação de solo, Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, 1979.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização de lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.2, n.2, p. 31-37, 2010.

FERRAZ, R. L.; BELICANTA, A.; Gutierrez, N. H. M. **Estudo comparativo de alguns métodos de dosagens de misturas de solo-cimento**. Maringá: Editora Eduem, UEM, 2000.

FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento**. 2004. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.515-524, 1999.

FERREIRA, R. C.; GOBO, J. C. C.; CUNHA, A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.1-11, 2008.

FARIAS FILHO, J.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p. 437-444, 2000.

FIQUEROLA, V. Alvenaria de solo-cimento. **Revista Técnica**, n. 85, São Paulo: Editora Pini, 2004.

FONTES, M. P. F. **Mineralogia do Solo**. Notas de Aula, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2006.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE – FUNTAC.
Departamento Técnico e de Produção. **Projeto: Habitação popular alternativa para a Amazônia (Moradia popular – sub-projeto IV)**. Cartilha para produção de tijolo de solo-cimento. Rio Branco-AC: FUNTAC, 1999.

GOLDSTEIN, J.I.; NEWBURY, D.E.; ECHIL, P.; JOY, D.C.; ROMIG, Jr. A.D.; LYMAN, C.E.; FIORI, C.; LIFSHIN, E. **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. New York: Plenum Press, 1992.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA Jr., A. D. Desidratação de lodos produzidos em Estações de Tratamento de Água. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17., 1993, Natal. **Anais...** Natal: ABES, 1993. (CD ROM)

HELEN, E. P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pini, 1992.

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

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande-MS. **Anais...** Campo grande-MS: ABES, 2005b.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil Stabilization – Principles and Practice. Australia: Butterworths Pty. Limited, 1972. *apud* FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

INGUZA, M. P. D.; ANDREOLI, C. V.; NASCIMENTO, R. M.; TINOCO, J. D.; HOPPEN, C. PEGORINI, E. S. Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha. In: ANDREOLI, C. (coordenador). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 283-360. (Projeto PROSAB).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Diretoria de Pesquisas. **Coordenação de População e Indicadores Sociais Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. 219p.

Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 03 de abril de 2013.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ- TECPAR. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**. 2005. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br>> Acesso em: 12 de outubro de 2012.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de Ferro: Indicadores de Ambientes Pedogênicos e Geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. e SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa-MG: SBCS, p. 107-138, 2000.

KAWAMURA, S. **Integrated desing of water treatment facilities**. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc. 1991.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diversos traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.7.3, p. 185 –191, 2012. Disponível em:

<<http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/viewFile/308/259>>. Acesso em: 30 de setembro de 2012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas: Átomo, 2010.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2010.

LU, H. e AN, Z.. Pretreated methods on loess-palaeosol samples granulometry. **Chinese Science Bulletin**, v. 43, n. 3, p. 237-240, 1998.

MARGEM, J.I.; MAURI, J.; ALEXANDRE, J.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. Caracterização das diferentes frações granulométricas de lodo de floculador de ETA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51., 2007, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: ABC, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MERCADO, M. C. **Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso**. 1990. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MILLER, G.A.; AZAD, S. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, n. 14, p. 89-97, 2000.

MITCHELL, J. K. **Fundamental of soil behavior**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1976.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.

MORUZZI, R. B.; FERRARI, T. N. Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETA II) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 4., 2008, Ponta Grossa-PR. **Anais...** Ponta Grossa: AEAPG, 2008.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 207f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto. Tradução Salvador E. Giammusso**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. (2004). Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, p.324-330, 2004.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, p 63-76, 2008.

PCA – Portland Cement Association. Soil primer. Illinois, 1976, 52 p. *apud* DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p.511-518, 2002.

PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais**. 2005. 330f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

PEREIRA, E. G. **Aproveitamento do resíduo da estação de tratamento de água de Cubatão para fabricação de elementos construtivos estruturais**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PENTEADO, P. T.; MARINHO R. C. **Análise Comparativa de Custo e Produtividade dos Sistemas Construtivos: Alvenaria de Solo-Cimento, Alvenaria com Blocos Cerâmicos e Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto na Construção de uma Residência Popular**. 2011. 64f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PINHEIRO, M. L. **Avaliação experimental de blocos prensados de encaixe de solo-cimento com adição de grits**. 2011. 43f. Relatório Final (Iniciação Científica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: O tijolo de solo-cimento. **Sinergia**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 53-59, 2005.
Disponível em:
<http://www.cefetsp.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2005_n1/pdf_s/segmentos/artigo_07_v6_n1.pdf>. Acesso em: 04 de outubro 2012.

PORRAS, A. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria – tijolos estabilizados com cimento. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v.18, n 2, p. 5-28, 2008.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba/PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 2003.

POZZOBON, J. C.; LUCAS, J. F. R.; MORA, N. D. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 54., 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABC, 2010a.

POZZOBON, J. C.; LUCAS, J. F. R.; SANTOS, L. C.; MORA, N. D. Avaliação microbiológica de lodo de ETA seco em diferentes leitos de secagem

artesanais. In: ENCONTRO NACIONAL DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA, 7., 2010, Medianeira. **Anais...** Medianeira: Enditec, 2010b.

POZZOBON, J. C.; LUCAS, J. F. R.; MORA, N. D. Comparação de peças artísticas contendo lodo de estação de tratamento de água e diferentes argilas. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS E EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 3., e SEMANA ACADEMICA DO MEIO AMBIENTE, 6., 2010, Toledo. **Anais...** Toledo: UNIOESTE, 2010c.

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. [S.l.]: Engineering News Record, 21 e 28, 1933. *apud* PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais**. 2005. 330f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

RAMIRES, M. V. V.; SANTOS, I. S.; KAZMIERCZAK, C. S. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro-SP. **Anais...** São Pedro-SP: ABC, 2005.

REALI, M. A. P. (coordenador). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. (Projeto PROSAB).

RIBEIRO JUNIOR, J. I. **Métodos Estatísticos Aplicados à Melhoria da Qualidade**. Viçosa-MG: UFV, 2012.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de águas**. São Paulo: Blücher, 2001.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos em las vías terrestres**. México: Limusa, v. 1, 1974.

ROAD RESEARCH LABORATORY. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários – Volume I**. Tradução de Evelyn Bloem Silveira e Araken Silveira. São Paulo: Edgard Blücher, 1951, 624 p.

ROCHA, A. F. **Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campo Novo do Parecis, MT**. 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da fase sólida de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C.V. (coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 245-257 (Projeto PROSAB).

SALES, A.; CORDEIRO, J. S.; SOUZA, F. R. Estudo da resistência à compressão e da absorção de água em concretos produzidos com a adição conjunta de resíduos de construção e demolição e lodos de Estações de Tratamento de Água. **Revista Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, 2004.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das Argilas**. Vol. I e II – São Paulo: Blücher, 1975.

SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M.V.V.; KAZMIERCZAC, C.S.; SILVA, H.C.; KERN, A.P.; CAMARGO; S.A. Caracterização e identificação do resíduo: lodo da Estação de Tratamento do município de São Leopoldo. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2000.

SARON, A.; LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 21., João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2003.

SARTORI, H. J. F.; NUNES, M. S. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água e de Esgotos Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997.

SEGANTINI, A. A. S; ALCÂNTARA M. A. M. Solo-Cimento e Solo-Cal. *In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2007, v.2, cap. 25, p.834-845.

SILVA, M. R. **Incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em tijolo de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais**. 2009. 84f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental) - Faculdade de Aracruz, Aracruz, 2009.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estações de tratamento de água**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVEIRA, A. Estabilização de solos com cimento – síntese de notas de aula. EESC USP. Publicação 128, p 1-44, 1966, *apud* GRANDE, F. M. (2003). **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study. **Water Science Technology**, v. 30, n. 8, p. 159-168, 1994.

SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVARES, I. S. **Notas de Aula Mecânica do Solo**. Departamento de Transporte, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SOUZA, F. G. C.; CORDEIRO, J. S. Quantificação de sólidos em estação de tratamento de água convencional de ciclo completo com decantador de alta taxa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 23., 2005, Campo Grande-MS. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005.

SOUZA, F. R. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de Estações de Tratamento de água e de construções e demolições**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006a.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006b.

SOUZA, R. I. B.; SEGANTINI, A. A. S; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p. 205-212, 2008.

SOUZA, F. R. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto**. 2010. 209f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha**. 2008. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2008.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, n. 343, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; JOB, A. E.; GOMES, H. M.; NETO, J. F. H. Caracterização de Resíduo de Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) e o Estudo da Viabilidade de seu Uso pela Indústria Cerâmica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún, México. **Anais...** Cancún: AIDIS, 2002.

UENO, O. K.; LEITE, V. M. B. Avaliação da influencia do lodo, proveniente de Estações de Tratamento de Água, nas propriedades dos materiais de cerâmica vermelha. **Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI-SP**, v. 1, n. 1, 2007.

VALENCIANO, M. C. M.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.484-492, 2004.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesq. agropec. bras.**, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 55, p. 385-392, 2009.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORINO, J. P. D. Caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água da CENIBRA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005

APÊNDICE A - Resultados dos ensaios tecnológicos para estudo da umidade de prensagem

A.1. Resistência à compressão simples

TRAÇO 1							
Identificação do corpo-de-prova	Controle dimensional			Ensaio de resistência à compressão			
	Compr. (cm)	Larg. (cm)	Altura (cm)	Face A (cm)	Face B (cm)	Força (kgf)	Tensão (MPa)
1.1.1	23,16	11,11	5,98	11,10	11,50	710	0,56
	23,16	11,07	6,04	11,40	11,10		
1.1.2	23,16	11,15	5,95	11,40	11,50	650	0,50
	23,16	11,16	6,04	11,20	11,30		
1.1.3	23,16	11,09	5,96	11,20	11,50	820	0,65
	23,16	11,11	6,04	11,10	11,20		
1.1.4	23,15	11,13	5,95	11,40	11,40	910	0,72
	23,16	11,1	6,04	11,10	11,10		
1.2.1	23,11	11,11	6,1	11,10	11,10	820	0,65
	23,12	11,15	6,1	11,40	11,30		
1.2.2	23,1	11,1	6	11,40	11,50	970	0,76
	23,1	11,1	5,9	11,00	11,20		
1.2.3	23,1	11,1	6,2	11,40	11,50	850	0,67
	23,1	11,05	6,15	11,10	11,10		
1.2.4	23,1	11,1	6	11,20	11,00	1050	0,83
	23,1	11,1	6,15	11,10	11,60		
1.3.1	23,1	11,1	5,9	11,20	11,70	780	0,61
	23,15	11,1	6	11,20	11,20		
1.3.2	23,1	11,05	6	11,10	11,40	870	0,69
	23,1	11,1	6	11,40	11,10		
1.3.3	23,1	11,1	6	11,30	11,10	770	0,61
	23,1	11,1	5,9	11,10	11,50		
1.3.4	23,1	11,1	5,9	11,40	11,10	1000	0,79
	23,1	11	6	11,10	11,30		
1.4.1	23,05	11,1	5,85	11,00	11,10	590	0,46
	23,1	11,1	5,95	11,40	11,60		
1.4.2	23,1	11,05	5,9	11,20	11,10	690	0,54
	23,1	11,05	5,9	11,30	11,50		
1.4.3	23,1	11	6,05	11,00	11,30	730	0,58
	23,1	11,05	5,9	11,40	11,10		
1.4.4	23	11	5,9	11,30	11,10	930	0,74
	23	11	5,9	11,00	11,40		

1.5.1	23	11,1	5,9	11,10	11,00	610	0,48
	23,5	11,1	5,85	11,50	11,40		
1.5.2	23	11	5,8	11,20	11,40	710	0,57
	23,05	11,05	5,85	11,10	11,10		
1.5.3	23,05	11,1	5,8	11,00	11,00	720	0,58
	23,05	11	5,9	11,20	11,40		
1.5.4	23,05	11	5,9	11,00	11,10	720	0,58
	23	11	5,85	11,50	11,00		

TRAÇO 2							
Identificação do corpo-de-prova	Controle dimensional			Ensaio de resistência à compressão			
	Compr. (cm)	Larg. (cm)	Altura (cm)	Face A (cm)	Face B (cm)	Força (kgf)	Tensão (MPa)
2.1.1	23,05	11,10	6,00	11,60	11,10	1450	1,14
	23,05	11,08	6,10	11,15	11,20		
2.1.2	23,05	11,10	5,95	11,10	11,40	1490	1,18
	23,05	11,12	6,02	11,30	11,10		
2.1.3	23,01	11,00	6,05	11,20	11,10	1820	1,44
	23,03	11,04	6,10	11,10	11,50		
2.1.4	23,05	11,10	6,00	11,10	11,50	1640	1,30
	23,08	11,08	6,00	11,20	11,10		
2.2.1	23,00	11,00	6,00	11,20	11,05	1520	1,21
	23,00	11,00	6,00	11,05	11,60		
2.2.2	23,00	11,00	6,00	11,30	11,40	1160	0,93
	23,05	11,00	6,05	11,00	11,05		
2.2.3	23,00	11,10	5,90	11,00	11,10	1510	1,20
	23,00	11,05	6,00	11,60	11,15		
2.3.1	23,05	11,00	6,05	11,05	11,40	1580	1,25
	23,05	11,05	6,10	11,30	11,20		
2.3.2	23,00	11,00	6,10	11,10	11,50	1600	1,26
	23,00	11,00	6,10	11,20	11,20		
2.3.3	23,00	11,00	6,10	11,20	11,10	1760	1,40
	23,05	11,10	5,95	11,00	11,50		
2.3.4	23,00	11,00	6,00	11,05	11,35	1850	1,47
	23,04	11,23	5,99	11,30	11,10		
2.4.1	23,02	11,04	6,24	11,00	11,25	1510	1,21
	23,09	11,03	5,99	11,40	11,00		
2.4.2	23,04	11,10	5,97	11,10	11,30	1510	1,20
	23,05	11,13	5,96	11,35	11,15		
2.4.3	23,01	11,12	6,02	11,40	11,00	1560	1,25
	23,04	11,06	6,01	11,05	11,25		

2.4.4	23,01	11,23	6,02	11,00	11,30	1760	1,40
	23,10	11,09	5,90	11,30	11,30		
2.5.1	23,02	11,04	6,21	11,00	11,40	1390	1,11
	23,01	11,14	5,82	11,25	11,05		
2.5.2	23,02	11,16	6,27	11,05	11,30	1440	1,16
	23,01	11,09	6,13	11,30	11,00		
2.5.3	23,04	11,09	6,06	11,10	11,30	1630	1,28
	23,02	11,30	5,99	11,60	11,10		
2.5.4	23,00	11,07	5,93	11,00	11,35	1370	1,09
	23,00	11,04	5,97	11,45	11,15		

TRAÇO 3							
Identificação do corpo-de-prova	Controle dimensional			Ensaio de resistência à compressão			
	Compr. (cm)	Larg. (cm)	Altura (cm)	Face A (cm)	Face B (cm)	Força (kgf)	Tensão (MPa)
3.1.1	23,09	11,05	6,09	11,05	11,1	1730	1,37
	23,06	11,05	6,02	11,4	11,35		
3.1.2	23,05	11,1	6	11,4	11,2	2070	1,64
	23,05	11,1	5,92	11,1	11,3		
3.1.3	23,05	11,05	5,9	11,35	11,1	1990	1,57
	23,1	11,05	5,95	11,1	11,45		
3.1.4	23,1	11,05	6,05	11,15	11,1	1950	1,54
	23,1	11,1	6,05	11,15	11,6		
3.2.1	23	11	6,1	11,05	11,4	2550	2,03
	23	11	6	11,3	11,05		
3.2.2	23	11,1	6,1	11,1	11,4	3070	2,44
	23	11,1	6	11,3	11,1		
3.2.3	23,1	11	6,1	11,3	11,05	2900	2,31
	23	11	6,15	11,05	11,4		
3.2.4	23,05	11,05	6,2	11,15	11,2	3260	2,6
	23,05	11,05	6,15	11,4	11,05		
3.3.1	23	11	6,05	11,3	11	2700	2,16
	23	11	6,15	11	11,4		
3.3.2	23	11,05	6	11,4	11,1	3280	2,61
	23	11,05	6	11,1	11,25		
3.3.3	23	11	6,1	11,3	11,1	2520	2
	23,05	11,1	6	11,05	11,45		
3.3.4	23	11,05	6	11,3	11,1	2690	2,14
	23,05	11,1	5,9	11	11,4		
3.4.1	23,05	11	6	11,3	11	2420	1,94
	23	11,05	6	11	11,35		
3.4.2	23	11,05	6,1	11,1	11,15	2860	2,26

	23	11,05	6,05	11,1	11,6		
3.4.3	23	11,05	6,1	11,2	11	2420	1,94
	23	11	6,1	11	11,5		
3.4.4	23,1	11,05	6,1	11,4	11,15	2400	1,91
	23,05	11,1	6,1	11,05	11,3		
3.5.1	23,1	11	6	11,4	11,05	2230	1,78
	23,05	11,05	6	11,1	11,2		
3.5.2	23	11,05	6,1	11,15	11	2090	1,69
	23	11	6,1	11	11,4		
3.5.3	23	11	6,2	11,3	11	2200	1,77
	23	11,1	6,15	11	11,35		
3.5.4	23,05	11,05	6,1	11	11,3	2110	1,69
	23,1	11,05	6,2	11,4	11,05		

A.2. Absorção de água

TRAÇO 2							
Identificação do corpo-de-prova	Controle dimensional			Ensaio de absorção de água			Peso específico aparente seco (g.cm ⁻³)
	Compr. (cm)	Larg. (cm)	Altura (cm)	Tijolo seco (g)	Tijolo saturado (g)	Absorção de água (%)	
2.1.1	23.05	11.1	6	2536	3047	20.15	1.64
	23.05	11.08	6.1				
2.1.2	23.05	11.1	5.95	2574	3065	19.08	1.68
	23.05	11.12	6.02				
2.2.1	23.01	11	6.05	2370	2834	19.58	1.54
	23.03	11.04	6.1				
2.2.2	23.05	11.1	6	2376	2819	18.64	1.55
	23.08	11.08	6				
2.3.1	23	11	6	2324	2779	19.58	1.53
	23	11	6				
2.3.2	23	11	6	2324	2774	19.36	1.52
	23.05	11	6.05				
2.3.3	23.03	11.08	6.15	2350	2792	18.81	1.53
	23.04	11.1	5.91				
2.4.1	23	11.17	6.15	2366	2810	18.77	1.52
	23.03	11.25	5.95				
2.4.2	23	11.08	5.97	2360	2790	18.22	1.55
	23	11.15	5.91				
2.4.3	23.01	11.2	5.7	2270	2690	18.5	1.54
	23.14	11.07	5.77				
2.5.1	23.01	11.04	6.07	2334	2758	18.17	1.54
	23.01	11.05	5.83				
2.5.2	23.02	11.05	5.94	2360	2774	17.54	1.56
	23.09	11.09	5.9				
2.5.3	23.03	11.2	5.94	2376	2800	17.85	1.56
	23.04	11.12	5.9				

TRAÇO 3							
Identificação do corpo-de-prova	Controle dimensional			Ensaio de absorção de água			Peso específico aparente seco (g.cm ⁻³)
	Compr. (cm)	Larg. (cm)	Altura (cm)	Tijolo seco (g)	Tijolo saturado (g)	Absorção de água (%)	
3.1.1	23.05	11.1	6	2418	2916	20.6	1.56
	23.05	11.08	6.1				
3.1.2	23.05	11.1	5.95	2503	2980	19.06	1.63
	23.05	11.12	6.02				
3.1.3	23.07	11.07	6.04	2448	2929	19.65	1.6
	23.08	11.08	5.95				
3.2.1	23.01	11	6.05	2498	2972	18.98	1.62
	23.03	11.04	6.1				
3.2.2	23.05	11.1	6	2540	2998	18.03	1.65
	23.08	11.08	6				
3.2.3	23	11	6	2525	2974	17.78	1.65
	23	11	6.1				
3.3.1	23	11	6	2496	2939	17.75	1.64
	23.05	11	6.05				
3.3.2	23	11.1	5.9	2538	2976	17.26	1.67
	23	11.05	6				
3.3.3	23.05	11	6	2550	2986	17.1	1.66
	23.05	11.05	6.1				
3.4.1	23.05	11	6.05	2447	2882	17.78	1.59
	23.05	11.05	6.1				
3.4.2	23	11	6.1	2491	2918	17.14	1.61
	23	11	6.1				
3.4.3	23	11	5.95	2497	2924	17.1	1.65
	23	11	6				
3.5.1	23	11.1	6	2494	2918	17	1.63
	23	11.05	6				
3.5.2	23.05	11.05	5.9	2404	2830	17.72	1.59
	23	11.05	5.95				
3.5.3	23.1	11.1	6	2479	2907	17.27	1.61
	23.05	11.05	6.05				

APÊNDICE B - Resultados dos ensaios tecnológicos dos tijolos do experimento de mistura

B.1. Controle dimensional e massa específica

Solo	Lodo	Cimento	Identificação do corpo-de-prova	Comprimento (cm)		Largura (cm)		Altura (cm)		Peso (Kg)	Massa específica (g.cm ⁻³)
				1	2	1	2	1	2		
92.5	0	7.5	1.1	23	22.99	11	11	5.85	5.88	2.4	1.62
			1.2	23	23	11.05	11.08	5.7	5.7	2.52	1.74
			1.3	23	22.96	11	11	5.71	5.7	2.52	1.75
			1.4	23	23	11	11.04	5.88	5.82	2.52	1.7
			1.5	23	23	11.1	11.1	5.7	5.7	2.56	1.76
			1.6	22.99	22.99	11.1	11.11	5.76	5.8	2.5	1.69
87.5	5	7.5	2.1	23.08	23.05	11.03	11	6	6.5	2.6	1.64
			2.2	23.02	23.06	11.06	11.1	5.93	5.8	2.62	1.75
			2.3	23.01	23.06	11.04	11.02	5.86	5.79	2.52	1.7
			2.4	23.02	23.05	11	11.05	5.92	6	2.52	1.66
			2.5	23.02	23.02	11.1	11.1	5.98	5.88	2.56	1.69
			2.6	23.02	23.04	11.01	11.09	5.9	5.8	2.54	1.71
87.5	0	12.5	3.1	23.01	23.04	11	11	6.05	6.1	2.84	1.85
			3.2	23.02	23.05	11.08	11.1	6	5.9	2.88	1.89
			3.3	23.05	23.04	11.01	11.02	6	5.9	2.8	1.85
			3.4	23.05	23.07	11	11.01	6.01	6.1	2.82	1.84
			3.5	23.04	23.03	11.1	11.1	6.09	5.99	2.9	1.88
			3.6	23	23.01	11	11.01	5.98	5.9	2.8	1.86
82.5	10	7.5	4.1	23.18	23.12	11.05	11.1	6.18	6.25	2.68	1.68
			4.2	23.15	23.15	11.15	11.15	6.18	6.1	2.68	1.69
			4.3	23.15	23.16	11.11	11.15	6.11	6.1	2.66	1.69
			4.4	23.18	23.15	11.05	11.1	6.35	6.25	2.8	1.73
			4.5	23.2	23.2	11.15	11.17	6.2	6.1	2.78	1.75
			4.6	23.15	23.12	11.1	11.1	6.15	6.05	2.7	1.72
82.5	5	12.5	5.1	23.05	23.05	11	11.03	6.12	6.05	2.7	1.75
			5.2	23.05	23.05	11.1	11.1	6.01	5.9	2.7	1.77
			5.3	23.05	23.01	11.01	11.05	5.85	5.95	2.62	1.75
			5.4	23.04	23.01	11	11.02	6.04	6.15	2.66	1.72
			5.5	23.02	23.02	11.1	11.12	6.01	5.95	2.66	1.74
			5.6	23.02	23	11.02	11.01	6	5.88	2.58	1.71
82.5	0	17.5	6.1	23.1	23	11	11	6	5.9	2.64	1.75
			6.2	23	23	11.1	11.1	5.7	5.9	2.68	1.81
			6.3	23	23	11	11	5.8	5.7	2.56	1.76
			6.4	23.04	23.02	11.01	11	5.95	5.8	2.58	1.73
			6.5	23	23	11.05	11.1	5.75	5.9	2.64	1.78
			6.6	23.01	23	11	11.01	5.7	5.9	2.58	1.76

			6.7	23	23	11.06	11.08	5.77	5.85	2.64	1.78
77.5	15	7.5	38	23.2	23.15	11.11	11.1	6.25	6.4	2.54	1.56
			39	23.2	23.15	11.15	11.15	6.1	6.3	2.58	1.61
			40	23.2	23.2	11.1	11.1	6.8	6.26	2.54	1.51
			41	23.19	23.13	11.1	11.1	6.28	6.35	2.54	1.56
			42	23.15	23.17	11.11	11.18	6.1	6.2	2.58	1.63
			43	23.14	23.19	11.1	11.1	6.2	6.05	2.52	1.6
77.5	10	12.5	7.1	23.1	23.07	11	11.05	6	6.05	2.44	1.59
			7.2	23.07	23.09	11.1	11.1	5.9	6	2.5	1.64
			7.3	23.09	23.09	11.07	11.06	6.06	5.98	2.5	1.63
			7.4	23.1	23.1	11	11.05	6.05	6.1	2.46	1.59
			7.5	23.9	23.9	11.12	11.1	5.94	6	2.48	1.56
			7.6	23.09	23.09	11.05	11.04	5.91	6	2.44	1.61
77.5	5	17.5	8.1	23.05	23.05	11	11.03	6.02	5.98	2.52	1.65
			8.2	23.05	23.05	11.1	11.08	5.9	5.99	2.6	1.71
			8.3	23.05	23.05	11.04	11.04	5.95	5.85	2.56	1.71
			8.4	20.05	20.05	11	11.02	6.05	6	2.58	1.94
			8.5	23.1	23.05	11.1	11.05	6	5.9	2.6	1.71
			8.6	23.1	23.05	11.05	11	5.92	5.85	2.54	1.7
77.5	0	22.5	9.1	23.02	23	11.1	11.07	5.95	5.9	2.78	1.84
			9.2	23.05	23.05	11.02	11.01	5.9	5.8	2.7	1.82
			9.3	23.02	23.02	11.01	11	5.95	5.99	2.64	1.75
			9.4	23.01	23	11.05	11.09	5.9	5.95	2.78	1.84
			9.5	23	23.01	11.04	11.02	5.94	5.88	2.72	1.81
87.5	2.5	10	10.1	23	23	11.01	11.02	6.05	6	2.56	1.68
			10.2	23.05	23.06	11.1	11.07	6	5.9	2.6	1.71
			10.3	23.01	23.02	11.02	11	5.9	5.85	2.58	1.73
			10.4	23.03	23	11	11.01	6.01	6.11	2.64	1.72
			10.5	23.02	23.01	11.1	11.06	6.01	5.9	2.64	1.74
			10.6	23	23.05	11.01	11	5.95	5.88	2.6	1.73
80	10	10	11.1	23.1	23.1	11.01	11.05	6.25	6.15	2.56	1.62
			11.2	23.1	23.1	11.11	11.1	6.11	6.01	2.6	1.67
			11.3	23.1	23.11	11.08	11.06	6.1	5.99	2.56	1.66
			11.4	23.1	23.1	11.02	11.06	6.25	6.26	2.58	1.62
			11.5	23.1	23.1	11.11	11.1	6.1	6	2.58	1.66
			11.6	23.06	23.09	11.05	11.05	5.9	6	2.48	1.63
80	2.5	17.5	12.1	23	23.02	11	11.02	6.15	6.02	2.7	1.75
			12.2	23.01	23.02	11.11	11.09	6.07	5.94	2.7	1.76
			12.3	23.05	23.02	11.09	11.04	6.02	5.9	2.68	1.76
			12.4	23.02	23.01	11	11.02	6.1	6.19	2.7	1.73
			12.5	23	23.02	11.09	11.08	6.08	5.92	2.68	1.75
			12.6	23.01	23.03	11.02	11.02	6	5.85	2.64	1.76

B. 2. Ensaio de resistência à compressão simples

Solo (%)	Lodo (%)	Cimento (%)	Corpo -de-prova n°	Face 1 (cm)		Face 2 (cm)		Seção Transversal Média (cm ²)	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
				a	b	a	b				
92.5	0	7.5	1.1	11.15	11.15	11.40	11.00	124.86	1700	1.36 ⁽¹⁾	1.97
			1.2	11.35	11.10	11.00	10.90	122.94	2240	1.82	
			1.3	11.00	11.00	11.15	11.00	121.83	2420	1.99	
			1.4	10.90	11.00	11.30	11.00	122.10	2400	1.97	
			1.5	11.10	11.50	11.20	11.15	126.27	2580	2.04	
			1.6	11.20	11.00	10.90	11.25	122.91	2488	2.02	
87.5	5	7.5	2.1	11.35	11.00	11.05	11.00	123.20	1020	0.83	0.91
			2.2	11.00	11.00	11.60	11.05	124.59	1180	0.95	
			2.3	11.05	11.25	11.35	11.00	124.58	1150	0.92	
			2.4	11.00	11.10	11.20	10.85	121.81	1140	0.94	
			2.5	11.10	11.30	11.25	11.10	125.15	1260	1.01	
			2.6	11.00	10.90	10.80	11.40	121.51	960	0.79	
87.5	0	12.5	3.1	11.30	11.05	11.15	11.00	123.76	5540	4.48	4.69
			3.2	11.10	11.35	11.05	11.00	123.77	6460	5.22	
			3.3	11.20	11.00	11.40	10.90	123.73	5910	4.78	
			3.4	11.15	10.95	11.25	11.00	122.92	5400	4.39	
			3.5	11.30	11.50	11.10	11.15	126.86	6460	5.09	
			3.6	11.20	10.85	10.90	11.00	120.71	5050	4.18	
82.5	10	7.5	4.1	11.20	11.30	11.60	11.10	127.66	700	0.55	0.55
			4.2	11.00	11.50	11.40	11.10	126.52	700	0.55	
			4.3	11.40	11.00	11.00	11.20	124.30	520	0.42	
			4.4	11.00	11.40	10.90	11.15	123.47	730	0.59	
			4.5	11.30	11.35	11.00	11.50	127.38	640	0.50	
			4.6	11.25	11.50	11.40	11.40	129.67	860	0.66	
82.5	5	12.5	5.1	10.90	11.30	11.00	11.25	123.46	2500	2.02	1.95
			5.2	11.10	11.10	11.20	11.00	123.21	2520	2.05	
			5.3	11.00	11.20	11.40	11.05	124.59	2540	2.04	
			5.4	11.30	11.10	11.20	10.90	123.76	1860	1.50	
			5.5	10.90	11.00	11.00	11.50	123.20	2450	1.99	
			5.6	11.35	11.00	11.15	11.40	125.98	2610	2.07	
82.5	0	17.5	6.1	11.00	11.10	11.00	11.30	123.20	5830	4.73	5.03
			6.2	11.50	11.00	11.00	11.20	124.85	7040	5.64	
			6.3	11.25	10.85	11.00	11.20	122.63	5970	4.87	
			6.4	11.35	11.00	11.00	11.10	123.48	5550	4.49	
			6.5	10.90	11.20	10.90	11.45	123.44	6020	4.88	
			6.6	11.20	11.00	11.10	11.20	123.76	6140	4.96	
			6.7	10.90	11.15	11.00	11.25	122.64	6890	5.62	
77.5	10	12.5	7.1	11.20	11.25	11.00	11.50	126.25	1240	0.98	0.97
			7.2	11.00	11.20	11.00	11.30	123.75	1140	0.92	
			7.3	11.40	11.20	11.10	11.20	126.00	1240	0.98	
			7.4	11.10	11.10	11.40	11.00	124.31	990	0.80	

			7.5	11.05	11.20	11.00	11.40	124.58	1400	1.12	
			7.6	11.30	11.15	11.40	11.00	125.70	1270	1.01	
77.5	5	17.5	8.1	10.90	11.10	11.40	11.05	123.48	3350	2.71	
			8.2	11.00	11.25	11.20	11.05	123.76	3860	3.12	
			8.3	11.10	11.30	11.20	11.10	124.88	3870	3.10	2.83
			8.4	11.25	11.00	10.90	11.15	122.64	3180	2.59	
			8.5	11.00	10.90	11.00	11.60	123.75	3550	2.87	
			8.6	11.10	11.30	11.20	11.20	125.44	3240	2.58	
77.5	0	22.5	9.1	11.00	11.25	11.30	10.95	123.74	9310	7.52	
			9.2	10.80	11.10	10.80	11.20	120.42	9080	7.54	
			9.3	11.35	11.00	11.00	11.15	123.75	8210	6.63	7.21
			9.4	11.00	10.90	11.00	11.50	123.20	9140	7.42	
			9.5	11.10	10.85	11.35	10.90	122.08	8490	6.95	
87.5	2.5	10	10.1	11.00	11.40	11.05	11.15	124.30	2110	1.70	
			10.2	11.00	11.10	11.25	10.95	122.64	2490	2.03	
			10.3	11.15	11.25	11.05	11.40	125.70	2620	2.08	1.99
			10.4	11.00	11.25	11.25	10.95	123.47	1910	1.55	
			10.5	11.00	11.00	11.00	11.40	123.20	2810	2.28	
			10.6	11.15	11.00	10.90	11.30	122.91	2840	2.31	
80	10	10	11.1	11.00	11.45	11.15	11.10	124.86	880	0.70	
			11.2	11.10	11.20	11.20	11.40	126.00	900	0.71	
			11.3	10.90	11.30	11.00	11.30	123.74	1070	0.86	0.77
			11.4	11.50	11.00	11.10	11.10	124.86	830	0.66	
			11.5	10.90	11.55	11.30	11.00	125.10	950	0.76	
			11.6	11.50	10.90	10.90	11.30	124.26	1160	0.93	
80	2.5	17.5	12.1	11.00	11.00	11.50	11.20	124.90	4690	3.76	
			12.2	11.10	11.20	11.30	10.90	123.75	5710	4.61	
			12.3	11.15	11.00	10.90	11.50	124.00	6020	4.85	4.20
			12.4	11.20	10.90	11.40	10.90	123.17	5020	4.08	
			12.5	11.00	11.00	11.15	11.00	121.83	5260	4.32	
			12.6	11.25	11.00	10.90	11.40	124.01	4410	3.56	

(1)retirado da análise por apresentar defeitos.