

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

**DESIDRATAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação de Mestrado

Eliana Maria Ferranti

Porto Alegre, maio de 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**DESIDRATAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

ELIANA MARIA FERRANTI

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Gino R. Gehling

Banca Examinadora

Prof ^a . Luciana Paulo Gomes	(Ciências Exatas e Tecnologia/UNISINOS)
Prof. Antônio Domingues Benetti	(IPH/UFRGS)
Prof. Francisco Ricardo Andrade Bidone	(IPH/UFRGS)

Porto Alegre, maio de 2005.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob a orientação do Professor Dr. Gino Roberto Gehling da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gino Roberto Gehling, pela orientação e principalmente pela compreensão durante todo este trabalho, pois o mesmo foi desenvolvido paralelamente às atividades de servidora pública municipal, no DMAE.

Ao DMAE, por permitir a montagem do experimento no pátio da estação de tratamento de água José Loureiro da Silva e por permitir o uso do lodo de suas estações de tratamento de água no experimento.

À vice-direção do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela aquisição de parte dos materiais utilizados na confecção dos leitos e pela mão-de-obra na montagem dos mesmos.

À Divisão de Tratamento do DMAE, pela realização dos ensaios químicos e físico-químicos, e à Divisão de Pesquisa do DMAE, pela realização dos ensaios de metais, em especial aos colegas do laboratório de absorção atômica.

Aos colegas técnicos em tratamento de água e esgotos da Divisão de Tratamento do DMAE, pelas inúmeras sugestões durante a montagem do experimento e pelo auxílio técnico na realização das análises. Agradeço especialmente às colegas Rejane Ávila, Maria José Sá Brito, Vera Klauck e Genilda Souza Prates pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários da estação de tratamento de água José Loureiro da Silva e da Divisão de Esgoto, pela dedicação e cuidado na coleta do lodo. Devo um agradecimento especial ao colega Eduardo Moreira Fraga, chefe da ETA José Loureiro da Silva, por toda ajuda durante a fase experimental desta dissertação.

À empresa Drenamac Ltda pela doação da manta geotêxtil, bidim OP-20, utilizada nos experimentos.

Agradeço em especial ao meu marido, Bernardo Kloeckner, pelo incentivo, amor, carinho e compressão durante este período.

Por fim, agradeço a minha grande família pela amizade e apoio em todos os momentos.

RESUMO

As estações de tratamento de água (ETAs), que utilizam sulfato de alumínio férrico e possuem sistema de extinção para a cal, geram dois principais resíduos: o lodo de ETA, retido nos decantadores durante a etapa de clarificação da água, constituído principalmente por hidróxidos de alumínio, argilas, siltes, areia fina, material húmico e microrganismos e o resíduo de cal, impureza insolúvel removida do processo de extinção da cal virgem, constituído principalmente de carbonato e hidróxido de cálcio.

A pesquisa realizada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, em conjunto com o Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), avaliou se a adição de resíduo de cal ao lodo de ETA acelera o desaguamento do mesmo. Paralelamente, também foi avaliada a eficiência de uma modificação estrutural nos leitos de secagem convencionais, utilizando-se tijolos cerâmicos na base do mesmo, com o objetivo de avaliar se a capilaridade dos tijolos auxilia o desaguamento do lodo. Uma vez que a quantidade de água presente no lodo da ETA diminua, a utilização deste resíduo na indústria talvez seja economicamente viável.

No primeiro experimento foram montados 12 (doze) leitos de secagem, seis convencionais e seis modificados. Foi analisado o teor de umidade nos leitos em função do tempo, bem como monitorado o teor de umidade relativa do ar. O segundo experimento foi realizado em escala de bancada, utilizando-se 18 (dezoito) leitos de secagem forrados internamente com manta geotêxtil do tipo bidim (OP-20). Os leitos possuíam um dreno de fundo, para captura do líquido percolado. O experimento foi conduzido em triplicata, nas proporções de 0,0%; 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10,0% e 100,0% em peso de resíduo de cal. Foi monitorado o volume de percolado em função do tempo para cada leito. Também foi analisado o pH e a umidade inicial e final dos leitos, bem como o pH e a turbidez do líquido percolado. No resíduo sólido remanescente nos leitos de secagem foi realizada análise de fluorescência de RX.

No experimento de modificação estrutural da base dos leitos com uso de tijolos, não foi observada nenhuma melhora no desaguamento do lodo. Acredita-se que os poros capilares dos tijolos saturaram no início do experimento, perdendo seu poder de sucção. No segundo experimento, foi observada uma melhora muito significativa em relação ao volume de líquido percolado em função do tempo, comprovando que a adição de resíduo de cal ao lodo

favoreceu a rápida desidratação do mesmo (chegando a ser 40 vezes maior). A relação ótima foi verificada nos leitos que continham 5,0 % em massa de resíduo de cal. Todos os leitos que sofreram a adição de resíduo de cal aumentaram bruscamente o pH e solubilizaram o íon alumínio; porém aprisionaram os íons ferro e magnésio. Tanto a análise de fluorescência de raio X do lodo puro, bem como da mistura com resíduo de cal, remanescentes nos leitos de secagem, identificaram a presença de óxidos de cálcio, alumínio, ferro e sílica. Isso indica que estes resíduos (lodo ou lodo mais cal) podem ser incorporado à matéria-prima do cimento. Ter-se-ia, desta forma, um destino ecologicamente correto para os lodos de ETAs, que deixaria de ser lançado em corpos d'água. A incorporação do lodo de ETA ao cimento traria como principal vantagem o aumento da vida útil das jazidas de argila e de calcáreo, reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna.

ABSTRACT

The water treatment plants (WTPs) that use ferric aluminum sulphate and have a lime extinguishing system generate two main residues: the WTP sludge, retained in the decanters during the water clarification stage which is composed mostly of aluminum hydroxides, clays, silts, fine sand, humic matter, and microorganisms, and the lime residue, an insoluble impurity removed from the extinguishing process and composed mainly of calcium carbonate and calcium hydroxide.

The research conducted at the Instituto de Pesquisas Hidráulicas of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) in association with the Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) evaluated whether the addition of lime residue to the WTP sludge accelerates its dewatering. Besides this, a structural modification of the conventional drying beds was evaluated regarding its efficiency, by employing ceramic bricks in its basis, and aiming at verifying if the bricks' capillarity assists in dewatering the sludge. Once the water content of the WTP sludge is reduced, the industrial use of this residue may be economically viable.

In the first experiment, 12 (twelve) drying beds were constructed, six conventional and six modified. The water content in the beds was determined as a function of time, and the air relative humidity was monitored. The second experiment was performed in bench scale, using 18 (eighteen) drying beds covered with geotextile blanket bidim (OP-20). These beds had a bottom drain for capturing the percolated liquid. The experiment was conducted in triplicate, with 0.0%, 2.5%, 5.0%, 7.5%, 10.0%, and 100.0% weight of lime residue. The percolated volume was monitored as a function of time for each bed. The pH and the initial and final water concentrations of the beds were analyzed, as well as the pH and turbidity of the percolated liquid. The solid residue remaining in the drying beds was analyzed with X-ray fluorescence.

The structural modification of the beds with ceramic bricks produced no observed improvement in the sludge dewatering. It is believed that the capillary pores of the bricks were saturated at the beginning of the experiment, thus losing their suction power. In the second experiment, a very significant improvement in the amount of percolated liquid as a function of time was observed, which demonstrates that the addition of lime residue favours its rapid dewatering (eventually being 40 times greater). Optimum results were observed in

beds containing 5.0% weight of lime residue. All beds where the lime residue was added experienced a major pH increase and dissolved the aluminum ion, but captured the iron and magnesium ions. Both X-ray fluorescence analysis of the pure sludge and sludge mixture remaining in the drying beds, revealed the presence of calcium, aluminum, iron and silicon oxides. It indicates that residues (pure sludge or sludge with lime) might be added to the raw materials of cement. It would be had, of this form, a ecologicamente correct destination for the silts of WTPs, that would leave of being launched in bodies water. The main advantage of adding the WTP sludge residue to cement would be the increase in the useful life of clay and limestone deposits and the smaller destruction of landscape, vegetation and wildlife.

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 – Objetivo geral.....	2
2.2 – Objetivos específicos.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1– Lodos de ETAs.....	3
3.1.1 – Origem dos lodos de ETAs: a coagulação da água bruta.....	3
3.1.2 – Características qualitativas e quantitativas dos lodos de ETAs.....	5
3.1.2.1 – Resistência específica à filtração.....	8
3.1.3 – Classificação das frações de água contida nos lodos.....	9
3.1.4 – Impactos ambientais e toxicidade dos lodos de ETAs.....	10
3.1.4.1 – Solubilidade do íon alumínio.....	12
3.1.5 – Efeito da presença de algas nas características dos lodos de ETAs.....	14
3.2 – Secagem.....	15
3.2.1 – Penetração da umidade no interior dos sólidos.....	15
3.2.1.1 – Tensão superficial.....	15
3.2.1.2 – Ascensão capilar.....	16
3.2.1.3 – Penetração da umidade em alvenarias.....	20
3.2.1.4 – Temperatura de bulbo úmido.....	21
3.2.1.5 – Curva de taxa de secagem.....	23
3.2.2 – Perda de umidade por evaporação.....	26
3.2.3 – Umidade crítica.....	27
3.2.4 – Umidade de equilíbrio.....	27

3.3 – Desidratação dos lodos de ETAs.....	28
3.3.1 – Condicionamento químico do lodo de ETA.....	32
3.3.1.1 – Condicionamento químico com cal.....	33
3.3.2 – Disposição da mistura em aterros sanitários.....	35
3.4 – Resíduo do sistema de alcalinização: resíduo de cal.....	36
3.5 – Métodos de tratamento e disposição final dos lodos de ETAs.....	37
3.5.1 – Regeneração do coagulante por via ácida.....	39
3.5.2 – Lançamento dos lodos de ETAs em ETEs.....	40
3.5.3 – Adição do lodo seco ao concreto.....	41
3.5.4 – Fabricação de componentes cerâmicos.....	42
3.5.5 – Matéria-prima na indústria do cimento.....	43
3.5.5.1 – Etapas do processo de fabricação do cimento.....	45
3.5.5.2 – Reações químicas do cimento Portland.....	46
4. METODOLOGIA.....	48
4.1 – Primeiro experimento.....	49
4.1.1 – Aspectos gerais.....	49
4.1.1.1 – ETA José Loureiro da Silva.....	49
4.1.1.2 – ETA São João.....	51
4.1.2 – Montagem dos leitos.....	53
4.1.2.1 - Leitos convencionais.....	54
4.1.2.2 - Leitos modificados.....	56
4.2 – Segundo experimento.....	59
4.2.1 - Montagem dos leitos de secagem.....	59
4.2.2 – Coleta do lodo do decantador.....	60
4.2.3 – Coleta do resíduo de cal.....	60
4.2.4 – O experimento: mistura de lodo com resíduo de cal.....	61
4.3 – Análises realizadas.....	63
4.4 – Tratamento estatístico dos resultados obtidos.....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5.1 – Primeiro experimento.....	64
5.1.1 – Lodo ETA São João.....	64
5.1.2 – Lodo ETA José Loureiro da Silva.....	67
5.2 – Segundo experimento.....	71

5.2.1 – Resultados das análises do resíduo de cal.....	71
5.2.2 – Resultados das análises de lodo.....	72
5.2.3 – Resultados das análises das mesclas de lodo com resíduo de cal.....	72
5.2.4 – Resultados das análises do percolado dos leitos.....	74
5.2.5 – Análise do volume de líquido percolado em função do tempo.....	79
5.2.6 – Resultados da análise de fluorescência de raio X.....	91
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
6.1 – Conclusões.....	93
6.2 - Recomendações.....	95
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Diagrama Estabilidade -Mecanismos de coagulação para o alumínio.....	4
Figura 3.2: Distribuição da água no lodo.....	9
Figura 3.3: Tensões intermoleculares.....	16
Figura 3.4: Mecanismo de ascensão da água.....	17
Figura 3.5: Diâmetro capilar x pressão capilar.....	18
Figura 3.6: Diâmetro capilar x vazão.....	19
Figura 3.7: Determinação do ângulo de contato entre a água e a parede do poro.....	19
Figura 3.8: Força de ascensão capilar x umidade relativa.....	20
Figura 3.9: Esquema ilustrativo da transferência de energia durante a vaporização água..	21
Figura 3.10: Determinação da umidade relativa do ar.....	22
Figura 3.11: Velocidade de secagem contra teor de umidade do sólido.....	23
Figura 3.12: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, durante o período de taxa decrescente.....	24
Figura 3.13: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, no trecho DE.....	25
Figura 3.14: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, no final do processo de secagem.....	25
Figura 3.15: Sistema ilustrativo dos sistemas de leitos modificados por Cordeiro	29
Figura 3.16: Curvas de remoção de águas de sistemas modificados por Cordeiro	30
Figura 3.17: Lodos condicionados submetidos a diferentes forças centrífugas.....	31
Figura 3.18: Fluxograma da ETL da SANASA.....	38
Figura 4.1: ETA José Loureiro da Silva.....	50
Figura 4.2: ETA São João.....	52
Figura 4.3: Estrutura dos leitos de secagem em alvenaria.....	54
Figura 4.4: Seção transversal dos leitos convencionais.....	54
Figura 4.5: Montagem dos leitos convencionais.....	56
Figura 4.6: Seção transversal dos leitos modificados.....	56
Figura 4.7: Detalhe das aberturas laterais nos leitos modificados.....	57
Figura 4.8: Layout da alocação dos leitos de secagem.....	58
Figura 4.9: Cilindros plásticos vazados.....	59
Figura 4.10: Leitos de secagem de resíduo do Sistema de Alcalinização.....	60
Figura 4.11: Fluxograma das etapas do segundo experimento.....	62
Figura 5.1: Lodo da ETA São João sendo descarregado nos leitos.....	64
Figura 5.2: Líquido drenado nos leitos modificados.....	65

Figura 5.3: Tempo (em dias) <i>versus</i> umidade dos leitos.....	66
Figura 5.4: Aspecto do lodo nos leitos de secagem.....	69
Figura 5.5: Umidade média dos leitos em função do tempo.....	70
Figura 5.6: Teor de resíduo de cal <i>versus</i> percentual de redução da umidade do lodo.....	74
Figura 5.7: Aspecto do precipitado formado após a neutralização do percolado.....	76
Figura 5.8: Aspecto do percolado do leito 1, leito 4, leito 7 e do leito 10.....	78
Figura 5.9: Aparência da mistura nos leitos quatro horas após o início do experimento....	79
Figura 5.10: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham apenas lodo.....	86
Figura 5.11: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 2,5 % de resíduo de cal.	86
Figura 5.12: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 5,0 % de resíduo de cal.....	87
Figura 5.13: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 7,5 % de resíduo de cal.	87
Figura 5.14: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 10,0 % de resíduo de cal.....	88
Figura 5.15: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham apenas resíduo de cal.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Principais características do lodo de ETA que utiliza sulfato de alumínio.....	5
Tabela 3.2: Análise química do lodo das ETAs do SEMAE.....	6
Tabela 4.1: Resultados obtidos na análise do lodo desidratado da ETA JLS.....	51
Tabela 4.2: Resultados obtidos na análise do lodo desidratado na ETA SJ.....	53
Tabela 4.3: composição percentual dos leitos de secagem.....	60
Tabela 4.4: métodos empregados nas análises das amostras.....	63
Tabela 5.1: Dados de umidade dos leitos do lodo da ETA São João.....	66
Tabela 5.2: Tabela ANOVA para lodo da ETA São João – umidade.....	67
Tabela 5.3: Dados de umidade do lodo nos leitos de secagem para o lodo da ETA JLS....	70
Tabela 5.4: Tabela ANOVA para lodo da ETA JLS – umidade.....	71
Tabela 5.5: Caracterização do resíduo de cal.....	71
Tabela 5.6: Caracterização do lodo utilizado no experimento.....	72
Tabela 5.7: Ensaio realizados nas misturas presentes em cada leito.....	73
Tabela 5.8: Tabela ANOVA - mistura de lodo com resíduo de cal – umidade.....	73
Tabela 5.9: Ensaio realizados no percolado dos leitos.....	75
Tabela 5.10: ANOVA – turbidez do percolado da mistura de lodo c/ resíduo de cal.....	75
Tabela 5.11: Teores de alumínio antes e após a neutralização do percolado.....	76
Tabela 5.12: Tabela ANOVA - alumínio solúvel no percolado da mistura de lodo c/ cal..	77
Tabela 5.13: Volume de líquido percolado em função do tempo para os leitos que continham apenas lodo.....	80
Tabela 5.14: Volume de líquido percolado em função do tempo para os leitos que continham 2,5 % de resíduo de cal.....	81
Tabela 5.15: Volume de líquido percolado em função do tempo para os leitos que continham 5,0 % de resíduo de cal.....	82
Tabela 5.16: Volume de líquido percolado em função do tempo para os leitos que continham 7,5 % de resíduo de cal.....	83
Tabela 5.17: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 10,0 % de resíduo de cal.....	84
Tabela 5.18: Volume de líquido percolado em função do tempo para os leitos que continham apenas resíduo de cal.....	85
Tabela 5.19: Quantidade de água passível de ser drenada presente nos leitos.....	91
Tabela 5.20: Resultados de fluorescência de RX.....	92

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COT.....	Carbono Orgânico Total
CPGq.....	Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica da UFRGS
DMAE.....	Departamento Municipal de Água e Esgotos
DVP.....	Divisão de Pesquisa do DMAE
DVT.....	Divisão de Tratamento do DMAE
EPAL.....	Empresa Portuguesa de Águas Livres
ETA.....	Estação de Tratamento de Água
ETE.....	Estação de Tratamento de Esgoto
ETL.....	Estação de Tratamento de Lodo
IPH.....	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS
JLS.....	ETA José Loureiro da Silva
pH.....	Potencial Hidrogeniônico
REF.....	Resistência Específica à Filtração
SANASA.....	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento
SEMAE.....	Serviço Municipal de Água e Esgoto de São Leopoldo
SSMA.....	Secretaria da Saúde e Meio Ambiente
SJ.....	ETA São João
TBU.....	Temperatura de Bulbo Úmido
TSC.....	Tempo de Sucção Capilar
UFRGS.....	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNT.....	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UTR.....	Unidade de Tratamento de Resíduos

1 – INTRODUÇÃO

A constante preocupação com a proteção dos mananciais e melhoria da água bruta captada nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) conduz à necessidade de tratamento e destinação final dos lodos gerados no processo de potabilização. O principal resíduo obtido neste processo é o lodo do decantador, formado por um acúmulo de sólidos resultantes de processos de coagulação química, floculação e sedimentação da água bruta, que ficam retidos no fundo do decantador de uma ETA convencional. Este lodo contém altas concentrações de sais de alumínio ou ferro, misturados com materiais orgânicos, inorgânicos e hidróxidos precipitados. O principal empecilho no tratamento deste lodo é sua característica de difícil desidratação.

Atualmente, em virtude da necessidade de adequação do pH da água tratada à Portaria 518 (2004) do Ministério da Saúde, algumas empresas de saneamento passaram a alcalinizar a água que produzem, a fim de manter o pH da mesma na faixa recomendada, entre 6,0 e 9,5. A maioria das empresas optou pelo processo de alcalinização com cal extinta (Ca(OH)_2), a partir da cal virgem (CaO). O processo de extinção da cal virgem ocorre em uma unidade denominada Sistema de Alcalinização e dele se origina um segundo resíduo: o lodo de cal, formado principalmente por impurezas presentes na matéria-prima, como por exemplo, carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio. Este lodo, da mesma forma que o lodo do decantador, também precisa ser adequadamente tratado e disposto.

Este trabalho se concentrou na busca de métodos para acelerar a desidratação do lodo de decantadores, de modo a viabilizar outro destino ao mesmo, que não seja o envio à rede de esgotamento sanitário ou pluvial, como atualmente ocorre na quase totalidade das ETAs. O trabalho buscou ainda identificar um novo destino viável aos lodos de ETA.

2 – OBJETIVOS

2.1 – Objetivo geral

Este trabalho tem o propósito de investigar alternativas para acelerar o processo de desidratação dos lodos de ETA's visando sua posterior disposição ou aproveitamento. Isso foi feito mediante o condicionamento deste com o lodo de cal, formado pelo resíduo do processo de preparação do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Paralelamente, também foi testada uma modificação na montagem dos leitos de secagem, utilizando tijolos cerâmicos vazados de construção civil na sua base. Esperava-se, com isso, que a ação de capilaridade, aliada à convecção natural do ar através dos furos dos tijolos aumente a drenagem da água na base do leito, favorecendo a desidratação.

2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos que se procurou alcançar na primeira etapa deste trabalho foram:

- Avaliar o comportamento de lodos de estações de tratamento de água que operam de forma distintas (decantação convencional e decantação ascendente por contato com manto de lodo), quando dispostos em leitos de secagem convencionais;
- Verificar se a utilização de materiais cerâmicos porosos na base dos leitos de secagem contribuem para acelerar o desaguamento dos lodos de ETAs;

A segunda etapa teve como objetivos específicos:

- Verificar se a adição de resíduo de cal ao lodo de ETA acelera o desaguamento do mesmo, quando disposto em leitos de secagem;
- Verificar qual a relação ótima de lodo de ETA / resíduo de cal, em termos de volume de líquido percolado em função do tempo;
- Avaliar o comportamento dos metais alumínio, ferro e magnésio devido ao alto pH da mistura de lodo com resíduo de cal;
- Avaliar o pH e a turbidez do líquido percolado dos leitos que continham diferentes proporções de lodo de ETA com resíduo de cal;
- Identificar um destino final viável aos lodos de ETA, de modo a minimizar impactos ambientais.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Lodos de ETAs

O tratamento da água é composto por várias etapas. Na etapa de clarificação, a água bruta sofre processos físico-químicos a fim de eliminar as partículas causadoras de turbidez. Ao final deste processo, tem-se água clarificada e um resíduo que fica retido no fundo dos decantadores das ETAs e que é denominado *lodo de ETA*.

3.1.1 – Origem dos lodos de ETAs: a coagulação da água bruta

Na água bruta, além de partículas sedimentáveis, existem impurezas que se apresentam como partículas sólidas que se mantêm em suspensão devido a sua carga eletrostática, seu pequeno tamanho e seu peso reduzido. Estas partículas, ditas colóides, apresentam diâmetro entre 10^{-3} e 1 micra. O procedimento mais comum para eliminar estes sólidos consiste em desestabilizá-los e uni-los, formando flocos, que sedimentam com facilidade.

Coagulação é a adição de um agente químico a uma dispersão coloidal que resulta na desestabilização das partículas através da redução das forças que as mantêm separadas. Os mecanismos de coagulação da água são muito complexos e envolvem propriedades de superfície, potenciais elétricos, interações solvente-soluto, solvente-partículas, produtos de solubilidade, condições de mistura e de pH, entre outros.

A agregação destas partículas consiste, então, na redução de sua carga elétrica ou na superação dos efeitos desta carga. Os mecanismos de coagulação da água ocorrem das seguintes formas (DI BERNARDO, 1992; *apud* GONÇALVES, 1997):

- **compressão da dupla camada:** de natureza eletrostática. Ocorre quando uma grande quantidade de eletrólitos indiferente é atraída para as proximidades da superfície dos colóides, fazendo com que haja a compressão da dupla camada formada na superfície das partículas.

- **neutralização-adsorção de cargas:** neste mecanismo, os hidróxido-complexos, os cátions hidratados e os precipitados carregados positivamente são adsorvidos na superfície dos colóides, possibilitando sua coagulação e remoção por sedimentação, flotação ou filtração.
- **varredura:** se as concentrações de coagulante são elevadas há excessiva formação de precipitados. A precipitação flocculenta destes hidróxidos removerá por captura os colóides presentes no meio, e os próprios colóides servirão como sementes para a formação do precipitado.
- **formação de pontes:** é típico para sistemas nos quais sejam adicionados compostos orgânicos de cadeia longa (polieletrólitos). As interações entre os sítios ativos destas macromoléculas e os colóides promovem a sua aglomeração.

Vários estudos (DI BERNARDO, 1992; *apud* GONÇALVES, 1997) têm proposto diagramas de equilíbrio que relacionam as espécies de alumínio solúveis e a quantidade de alumínio precipitado com os mecanismos de coagulação. Um exemplo deste tipo de diagrama é mostrado na Figura 3.1. Também as eficiências de remoção de parâmetros como cor e turbidez para diferentes tipos de água bruta e dosagens de coagulante podem ser representadas nos referidos diagramas.

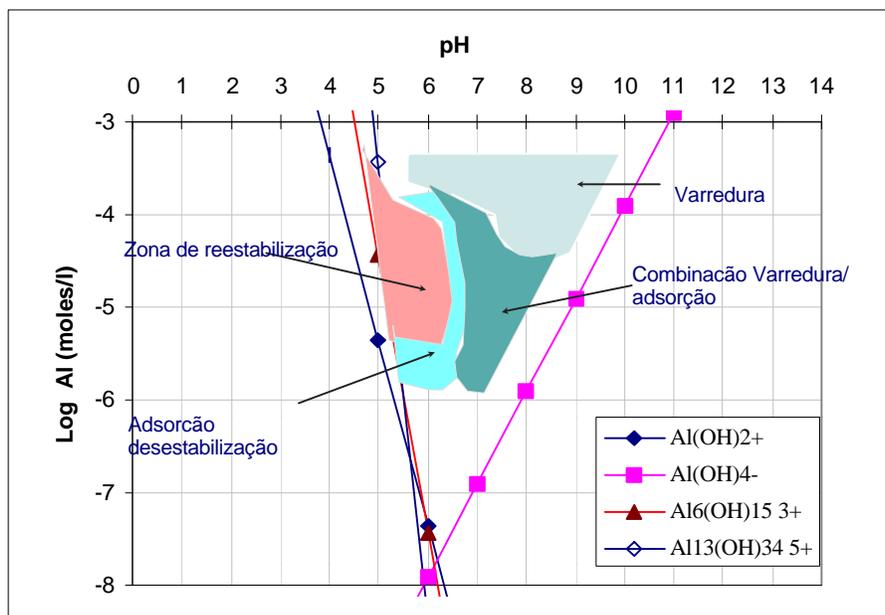


Figura 3.1: Diagrama Estabilidade -Mecanismos de coagulação para o alumínio (GONÇALVES, 1997).

3.1.2 – Características qualitativas e quantitativas dos lodos de ETAs

O resíduo do processo de clarificação, que fica retido nos decantadores, é um lodo composto por hidróxidos de alumínio, argilas, siltes, areia fina, material húmico e microrganismos. É uma substância não-newtoniana, extremamente gelatinosa e resistente ao adensamento, principalmente quando a água bruta possui baixa turbidez.

A tabela 3.1 apresenta as principais características observadas no lodo (fresco) de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como agente clarificante:

Tabela 3.1: Principais características do lodo de ETA que utiliza sulfato de alumínio

Parâmetro	Valor médio
Alumínio (% peso seco)	21,2
Cálcio (% peso seco)	2,7
Ferro (% peso seco)	3,2
Potássio (% peso seco)	1,7
Magnésio (% peso seco)	0,45
Enxofre (% peso seco)	2,0
Fósforo (% peso seco)	0,35
COT (% peso seco)	3,1
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	45
DQO (mgO ₂ /L)	500
Carbonato de cálcio equivalente (%)	15

Fonte: ELLIOT & DEMPSEY (1991) *apud* ABOY (1999).

As estações de tratamento de água operadas pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), em Porto Alegre, empregam sulfato de alumínio como coagulante. As ETAs São João e Belém Novo utilizam, ainda, polímero não-iônico como coagulante auxiliar.

ABOY (1999) e SILVA (1999) analisaram os lodos desidratados das ETAs São João e José Loureiro da Silva, operadas pelo DMAE. A principal diferença entre o lodo destas ETAs está no tempo em que o mesmo permanece no decantador. Na ETA José Loureiro da Silva a descarga do lodo é feita em média a cada 40 dias, e na ETA São João, a cada 10 minutos, com sistema de pulsos; porém, no referido estudo, o mecanismo de pulsos do decantador da ETA São João foi alterado, de modo que o lodo permaneceu três dias no sistema antes de ser coletado.

SANTOS et al. (1993) efetuou a caracterização química do lodo das ETAs do SEMAE (Serviço Água e Esgoto de São Leopoldo/RS) por fluorescência de raios-X. A análise química do lodo é apresentada na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Análise química do lodo das ETAs do SEMAE

Composição Química	Lodo da ETA
SiO ₂	34,80 %
Al ₂ O ₃	22,30 %
TiO ₂	0,94 %
Fe ₂ O ₃	6,60 %
CaO	0,40 %
K ₂ O	0,57 %
Na ₂ O	0,23 %
MgO	0,69 %
MnO	0,17 %
S	2990 ppm
FeO	2,90 %
perda por ignição	27,99 %

De acordo com a NBR-10.004 (2004), os lodos são enquadrados como “resíduos sólidos”. ABOY (1999) realizou alguns ensaios recomendados por esta norma e concluiu que eles são resíduos sólidos – Classe II A – não inertes e, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios estabelecidos por esta norma.

A natureza e a quantidade de lodos gerados numa ETA depende, entre outros, dos seguintes fatores (GRANDIN, 1993 *apud* ABOY, 1999):

- Sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente da água bruta;
- Dosagens de produtos químicos coagulantes e condicionantes como cal, sulfato de alumínio, cloreto férrico, polieletrólitos e carvão ativado;
- Frequência de remoção de lodo dos decantadores;

Segundo CORNWELL et al. (1987) *apud* CORDEIRO (2001), a concentração de sólidos que entra no decantador pode ser relacionada à turbidez da água bruta, sendo multiplicada por um fator que pode variar entre 1,5 e 2,2.

Assim, a concentração de partículas que entra no decantador pode ser dada por:

$$C_e = 1,5.T \quad (1)$$

em que:

C_e = concentração de partículas que entram no decantador (mg/L);

T = turbidez da água bruta (uT);

Em relação à dosagem de coagulante, considerando-se que seja aplicado sulfato de alumínio, estequiometricamente, cerca de 44 % da dosagem utilizada fica sob a forma de sólido. Assim, CORNWELL *et al.* (1987) *apud* CORDEIRO (2001) desenvolveu a seguinte equação:

$$W = 0,0864.Q.(0,44.D + 1,5.T + A) \quad (2)$$

onde:

W = quantidade de lodo (kg/d);

Q = vazão de adução de água bruta (L/s);

D = dosagem de sulfato de alumínio (mg/L);

T = turbidez de água bruta (uT);

A = dosagem de “auxiliares” ou outros produtos adicionados (mg/L).

O tempo de sucção capilar (TSC) e resistência específica à filtração (REF) são os indicadores mais comumente utilizados para caracterizar a desidratabilidade de lodos. O índice TSC representa a filtrabilidade do lodo e apresenta resultados realísticos, desde que não atue nenhuma pressão sob o sistema. O índice REF indica a permeabilidade do lodo e sua determinação é similar à operação de um filtro prensa. Geralmente, muitos erros são encontrados quando se trata de lodos com conteúdo de sólidos muito baixo (PAN *et al.* , 2003).

3.1.2.1 – Resistência específica à filtração

Quando se força uma suspensão contra um leito poroso, parte do sólido fica retida sobre esse meio, formando um depósito denominado torta, e cuja espessura vai aumentando no decurso da operação. Esta torta formada é que será o verdadeiro leito poroso filtrante. As características da torta variam com o tipo de partículas suspensas e com as condições gerais da filtração, sendo que a resistência oferecida ao escoamento do filtrado varia ainda com a espessura da mesma. Se a vazão de filtrado aumenta, essa resistência também deve aumentar e, considerando o escoamento do fluido como laminar, a perda de carga deveria aumentar linearmente com a taxa de filtração (BRAGA, 2003).

Esse comportamento ideal denomina-se incompressibilidade; entretanto, não é o que se observa quando as partículas em suspensão são floculentas ou gelatinosas, e não perfeitamente cristalinas. Sendo assim, a resistência ao fluxo aumenta mais rapidamente do que a velocidade do escoamento, determinando uma relação que não será de primeira ordem entre essas grandezas. Dessa forma, a literatura preconiza a utilização de auxiliares de filtração, que funcionam como uma espécie de esqueleto incompressível, entre a torta e o leito filtrante original. São muito utilizados: areia fina, diatomita, amianto, gesso e carvão, etc.

A resistência específica à filtração (REF), clássico parâmetro utilizado na avaliação da desidratabilidade de suspensões, tem a seguinte equação constitutiva, de acordo com os experimentos mais recentes, desde o pioneiro trabalho de HENRY DARCY, 1856 (BRAGA 2003):

$$m = \frac{\eta}{k} \left[1 + \frac{c \rho \sqrt{k} q}{\eta} \right] q \quad (3)$$

onde:

η é a viscosidade do fluido, k (permeabilidade) e c são parâmetros que dependem apenas de fatores estruturais da matriz porosa, quando não ocorrem interações físico-químicas entre esta e o fluido (MASSARANI, 1997 apud BRAGA, 2003).

COACKLEY e JONES (1956) apud BRAGA (2003), derivaram uma equação, a partir do trabalho de CARMAN (1933), de adaptação da Lei de Darcy para a filtração, em especial à vácuo, definindo a resistência específica à filtração, (R), conforme:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P A}{L} \cdot \frac{1}{\eta R} \quad (4)$$

onde:

dV/dt = Vazão;

ΔP = Diferença de pressão no sistema;

A = Superfície do meio filtrante;

L = Espessura do meio filtrante;

η = Viscosidade do fluido e

R = Resistência Específica à Filtração (REF).

Valores típicos de resistência específica à filtração para lodos de ETEs são $4-12 \cdot 10^{13}$ m/kg para lodos ativados, $3-30 \cdot 10^{13}$ m/kg para lodos digeridos, $3-10 \cdot 10^{11}$ m/kg para lodos primários condicionados, $2-20 \cdot 10^{11}$ m/kg para lodos digeridos condicionados (BERNES *et al.* 1981 *apud* BERKTAY, 1998). Valores elevados de resistência específica à filtração indicam que o lodo é de difícil desidratação.

3.1.3 – Classificação das frações de água contida nos lodos

A água contida nos lodos pode ser dividida em três frações, conforme ilustrado na figura 3.2:

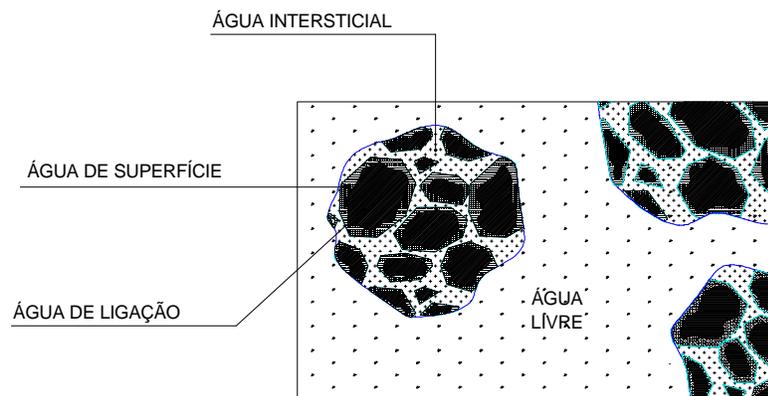


Figura 3.2: Distribuição da água no lodo.

Fonte: TSANG & VESILIND (1990) *apud* IDE (1994)

- *Água intersticial*: está adsorvida na superfície das partículas sólidas. Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de floculante.
- *Água intracelular ou de ligação*: É a água de constituição da partícula. É parte da fase sólida e só pode ser removida através de forças térmicas que provoquem uma mudança no estado de agregação da água, isto é, através do congelamento ou evaporação
- *Água superficial*: água de superfície ou coloidal, que é a umidade que está presa na superfície das partículas sólidas por adsorção e adesão,
- *Água livre*: é a água retida entre os flocos de maneira similar a uma esponja; não é associada com as partículas sólidas, e pode ser facilmente separada por gravidade;

3.1.4 – Impactos ambientais e toxicidade dos lodos de ETAs

O despejo dos lodos de ETAs nos cursos d'água aumenta a turbidez e a cor aparente das águas receptoras, ocasionando impactos aos mananciais, principalmente à camada bentônica.

A resolução CONAMA 357/05, em seu capítulo IV estabelece as condições e os padrões para o lançamento de efluentes em corpos d'água. Com relação aos materiais sedimentáveis, a norma estabelece o limite de até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff.

A Lei nº 9.605, publicada no Diário Oficial da União, em 13 de fevereiro de 1998, trata das sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Seção III – Da Poluição e outros Crimes Ambientais, artigo 54 “causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”; pena: reclusão, de 1 a 4 anos e multa.

Existem numerosas pesquisas do efeito do alumínio no meio ambiente. Ele é comumente encontrado em águas naturais de pH maior que 4,0 em concentrações menores que 0,1 mg/L. A química do alumínio na água é extremamente complexa no que se refere à forma molecular ou à concentração de cada espécie, sendo essencialmente dependente do pH (STUMM & MORGAN, 1996).

Um efeito secundário do alumínio em meio aquático está relacionado a sua forte ligação com fosfatos, imobilizando-os. Conseqüentemente, a presença não natural de alumínio no meio ambiente, ocasiona impactos no ciclo do fósforo, que é um nutriente essencial para a vegetação aquática, plânctons e perifitons.

KAGGWA et al., (2001), estudando o impacto dos descartes de lodos de alumínio nos banhados de Uganda, concluíram que a presença do lodo afetou a produtividade da *Cyperus papyrus*. A produtividade da espécie caiu de 13-14 g/m².d para 5 g/m².d em banhados que recebiam descartes constantes de lodo. Observações microscópicas revelaram anomalias nas raízes da planta, mas sintomas de toxicidade de alumínio não foram diagnosticados. Acredita-se que as anomalias estão relacionadas à deficiência de fósforo, imobilizado pela presença do alumínio no lodo.

Estudos (MILLER, 1984 *apud* CORDEIRO, 1999) mostraram que pacientes submetidos à diálise sofriam de demência quando a concentração de alumínio na água utilizada encontrava-se acima de 0,08 mg/L. Outros pesquisadores (REDICDIT, 1975 *apud* CORDEIRO, 1999) acreditam que o alumínio seja responsável por doenças cardiovasculares, como a coagulação cardiovascular. Esta pesquisa também sugere que altas concentrações de alumínio estão diretamente ligadas ao mal de Alzheimer.

Por outro lado, STAUBER et al. (1999) estudando a biodisponibilidade do alumínio na água potável, afirma que é pouco conhecido o mecanismo de absorção, transporte, distribuição nos tecidos e excreção do alumínio em seres humanos.

Tem-se estimado que apenas uma fração (0,1 a 1,0 %) do alumínio ingerido é absorvido no trato intestinal. A absorção gastrointestinal do alumínio varia largamente entre indivíduos. A biodisponibilidade do alumínio em água potável pode depender de fatores tais como: a espécie de alumínio, a idade do indivíduo, a quantidade de alimento no intestino, a concentração de ácido silícico e a habilidade da parede do intestino em seqüestrar o alumínio (PRIEST, 1996 *apud* STAUBER et al., 1999).

Uma vez absorvido, o alumínio acumula-se nos ossos, rins, fígado e cérebro. No plasma sangüíneo o alumínio é usado para transportar albumina. A meia vida do alumínio no sangue é de sete a oito horas. A maior parte do alumínio absorvido é excretado na urina como

uma pequena carga de íons solúveis ou como um complexo citrato-fosfato, enquanto que menos de 5 % é excretado nas fezes e bÍlis.

Em indivíduos saudáveis com função renal normal, a quantidade de alumínio oriunda da água potável é baixa. A biodisponibilidade do alumínio nessa condição é de 0,37 % e é similar à encontrada nos alimentos (0,28 – 0,64 %), confirmando que o alumínio oriundo da água potável não é mais facilmente absorvido que o alumínio oriundo de alimentos, e portanto, é improvável que contribua para a incidência do mal de Alzheimer (STAUBER et al., 1999).

3.1.4.1 - Solubilidade do íon alumínio

Aboy (1999), procurando verificar o comportamento do metal alumínio durante a desidratação dos lodos de ETAs, utilizou leitos de secagem construídos em alvenaria, recobertos com uma manta geotêxtil do tipo Bidim OP-20. Os resultados das análises das amostras do líquido drenado dos três leitos de secagem estudados durante toda a operação de desidratação, mostraram que as cargas de alumínio foram extremamente baixas e não se diferenciaram estatisticamente entre si. O lodo desidratado mostrou altas cargas do metal, sugerindo que o mesmo ficou praticamente todo retido na massa desidratada, sobre os leitos. Os possíveis fatores responsáveis por esse fenômeno não foram avaliados, mas provavelmente a componente orgânica do lodo, com a sua capacidade adsortiva/quelante “aprisionou” o metal, proporcionando a formação de complexos metálicos estáveis.

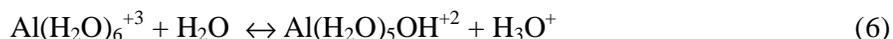
Segundo ELLIOT et al. (1991) *apud* ABOY (1999) a toxicidade do alumínio está relacionada com sua solubilidade e não com sua quantidade.

A Norma Técnica estadual nº 01/89 da SSMA/RS, que dispões sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lançam seus efluentes nos corpos d'água interiores do Rio Grande do Sul, fixa em 10 mg/L de alumínio (III) a concentração máxima permitida para lançamento de efluentes. (Rio Grande do Sul, 1989).

A solubilidade dos eletrólitos depende de numerosos fatores, tais como: pH, temperatura, natureza do solvente, tamanho das partículas e força iônica, entre outros. Nem sempre todos eles são perfeitamente conhecidos e definidos para um dado sistema em estudo (LEE, 1996).

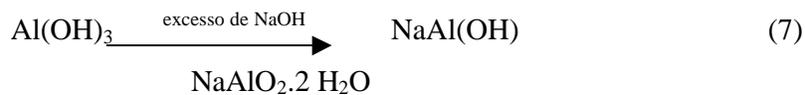
Segundo OHLWEILER (1982), muitos eletrólitos pouco solúveis se ionizam de uma maneira simples, mas a situação torna-se mais complexa porque os íons respectivos reagem com a água e, então, a descrição do comportamento da solução tem que levar em conta os vários equilíbrios.

Este é o caso do alumínio, que se comporta, quando hidratado, como ácidos polipróticos de Brønsted:



As reações deste tipo determinam a dependência do cátion hidratado ao pH do meio. E, no caso do pH alcalino em que será efetuado o estudo de co-disposição dos lodos, necessário se faz um acompanhamento deste íon no percolado dos leitos (OHLWEILER, 1982).

Ainda segundo o mesmo autor, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ é anfótero. Ele reage principalmente como base, isto é, reage com ácidos para formar sais que contêm o íon $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$. Contudo, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ mostra um caráter ácido quando se dissolve em NaOH, formando aluminato de sódio (mas o $\text{Al}(\text{OH})_3$ é reprecipitado mediante a adição de CO_2 , mostrando que as propriedades ácidas são muito fracas).



A fórmula dos aluminatos é freqüentemente representada como $\text{NaAlO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (que é equivalente a $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$). Espectros Raman sugerem que a estrutura do íon aluminato é mais complicada do que parece, variando a estrutura tanto com o pH como com a concentração (OHLWEILER, 1982).

Entre pH 8,0 e 12,0 os íons se polimerizam, usando pontes OH, e cada alumínio apresenta coordenação octaédrica. Em solução diluída e a valores de pH acima de 13,0 existe um íon tetraédrico, $[Al(OH)_4]^-$. Em soluções concentradas, acima de 1,5 molar, e em valores de pH superiores a 13, 0 o íon existe na forma de dímero: $[(HO)_3Al-O-Al(OH)_3]^{-2}$.

3.1.5 – Efeito da presença de algas nas características dos lodos de ETAs

Devido à eutrofização dos corpos d'água, os lodos de ETAs, predominantemente constituídos de materiais inorgânicos, começaram a apresentar uma quantidade muito maior de material orgânico devido ao conteúdo de algas que ficam retidos no mesmo, durante o processo de potabilização da água. Estudos mostraram que a presença de matéria orgânica na água bruta produz flocos de lodo menores, com maior índice de água, resultando em uma capacidade de desidratação menor. KONNO *apud* PAN et al. (1999) verificou que a carga negativa na superfície das partículas de lodo aumentava com a quantidade de algas (e com sua matéria orgânica extracelular).

PAN et al. (1999) investigou a influência das algas e de sua matéria orgânica extracelular no condicionamento e desidratação dos lodos provenientes de corpos d'água eutrofizados de Taiwan (lodos com alto conteúdo de algas). Foi monitorado o índice de COT (carbono orgânico total), o TSC (tempo de sucção capilar) e o conteúdo de água de ligação durante o envelhecimento do lodo. Foi identificado que o COT diminuía durante o envelhecimento do lodo, indicando que as algas, bem como a matéria orgânica extracelular delas, foram degradadas anaerobicamente por bactérias e microrganismos presentes no lodo.

No início do envelhecimento (três primeiros dias) o material orgânico adsorvido na superfície dos flocos de lodo substituíam a água de superfície resultando numa diminuição do conteúdo de água de ligação. À medida que o envelhecimento do lodo progredia, mais material orgânico ia sendo produzido e adsorvido, o que tornava a superfície dos flocos de lodo hidrofílica. Desta forma, mais água era atraída para o floco, e o aumento do índice de água de ligação foi observado entre os dias 4 e 7. Ao final do processo de envelhecimento, as células de algas e o material orgânico extracelular foram completamente destruídos, libertando a água adsorvida na superfície e tornando hidrofóbico o floco de lodo.

A variação do potencial zeta também foi monitorada durante o envelhecimento do lodo, que iniciou com valores ligeiramente negativos, tendo um pico no quinto dia. Após, os valores do potencial zeta tornaram-se menos negativos, e uma inversão da carga foi observada no 12º dia. Acredita-se que isso foi devido à destruição gradual das células das algas (carregadas com carga negativa) a partir do 5º dia. A variação do TSC apresentou valor mais baixo entre os dias 5 e 7, devido, provavelmente, à formação de flocos maiores, causados pela bio-floculação. Testes de condicionamento do lodo com polímero catiônico, indicaram que a dosagem mínima de polímero foi utilizada no 5º dia, justamente quando a carga da superfície do lodo estava mais negativa e o TSC era menor. Isso comprova que o condicionamento do lodo está intimamente ligado com as propriedades da superfície dos flocos e que estas, por sua vez, se alteram durante o processo de envelhecimento do lodo.

3.2 – Secagem

3.2.1 – Penetração da umidade no interior dos sólidos

Um mecanismo essencial para que se compreenda o fenômeno da infiltração de umidade no interior de um sólido é o da capilaridade, o qual se esclarece a partir do entendimento de comportamento intermolecular da água e sua conformação superficial.

3.2.1.1 – Tensão superficial

As superfícies que delimitam os volumes dos materiais possuem características diferentes daquelas existentes no seu interior. A diferença, entretanto, não é de natureza visual ou química, mas de comportamento. Uma propriedade notável de tal comportamento é a tensão superficial, responsável pela manutenção da conformação externa do material.

Segundo AGOPYAN *apud* KAZMIERCZAK (1989), a tensão superficial de um líquido é proveniente da configuração das tensões intermoleculares. A figura 3.3 apresenta uma idéia desta configuração.

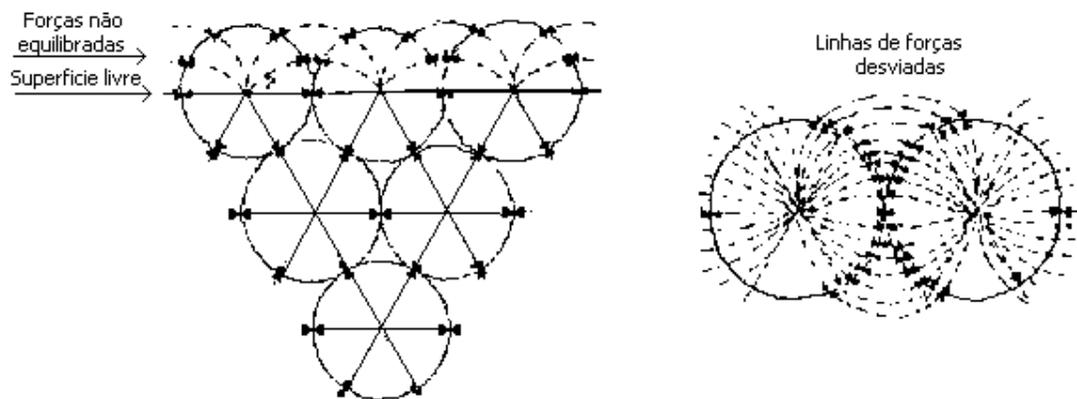


Figura 3.3: Tensões intermoleculares.

(Fonte: KAZMIERCZAK, 1989).

Na figura acima percebe-se que as moléculas no interior do líquido tem suas forças equilibradas pelas moléculas que a cercam. As moléculas que se encontram na superfície, não tem suas forças equilibradas. Nestas, as linhas de forças são desviadas de modo a reforçar as ligações com as moléculas que a cercam, causando o fenômeno denominado tensão superficial.

A tensão superficial atua sobre uma pequena profundidade, correspondendo a zona em que as moléculas não estão equilibradas.

As forças das ligações intermoleculares dependem da densidade dos corpos. A ligação é mais intensa em sólidos e líquidos do que em gases. Nos líquidos, verificamos que sempre que a força da gravidade supera as forças intermoleculares as superfícies se mantêm num mesmo nível, a distância constante do centro da Terra. Nas moléculas da água, as forças intermoleculares atingem um raio de 10^{-8} m. As moléculas que estiverem afastadas a uma distância superior a esta não sofrerão influência de outras moléculas.

3.2.1.2 – Ascensão capilar

Em pequenos volumes, a tensão superficial é superior à gravidade e o líquido adquire forma esférica. Quando o líquido está em contato com uma superfície sólida com tensão superficial demasiado elevada, a forma esférica não se conserva.

Segundo GRATWICK *apud* KAZMIERCZAK, 1989, ao aumentar o volume, a força da gravidade passa a exercer maior influência sobre o líquido e a conformação muda. Quando

uma grande gota de água é colocada sobre uma superfície sólida horizontal, ela se estende em todas as dimensões até que haja equilíbrio entre as forças atuantes. Entretanto, se o líquido entrar em contato com uma superfície vertical antes de entrar em equilíbrio, ele tenderá a subir nesta como se fosse uma extensão da superfície horizontal, até que haja equilíbrio de forças. Para diminuir a resistência devido à tensão superficial que se contrapõe à ascensão da água, o líquido toma a forma de uma curvatura esférica, que lhe proporciona menor superfície com tensão superficial. O processo segue o esquema apresentado pela figura 3.4:

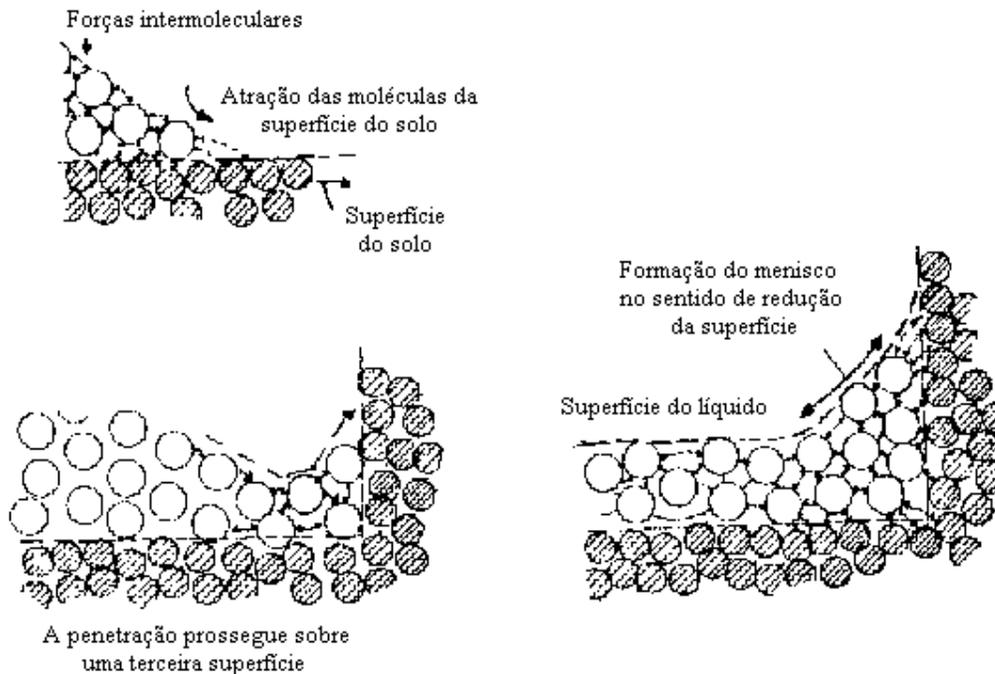


Figura 3.4: Mecanismo de ascensão da água. (KAZMIERCZAK, 1989).

Se houverem duas paredes verticais, quanto menor a distância entre estas superfícies, maior será a disparidade entre as forças das moléculas do líquido, das moléculas das superfícies verticais e a força da gravidade, que é constante. Portanto, para pequenos capilares, a água subirá mais pelas paredes, até que o equilíbrio com a força da gravidade seja efetuado.

As figuras 3.5 e 3.6 apresentadas por AGOPYAN *apud* KAZMIERCZAK (1989), mostram a influência do diâmetro capilar para a pressão de infiltração e para o valor do fluxo da água em materiais porosos, respectivamente.

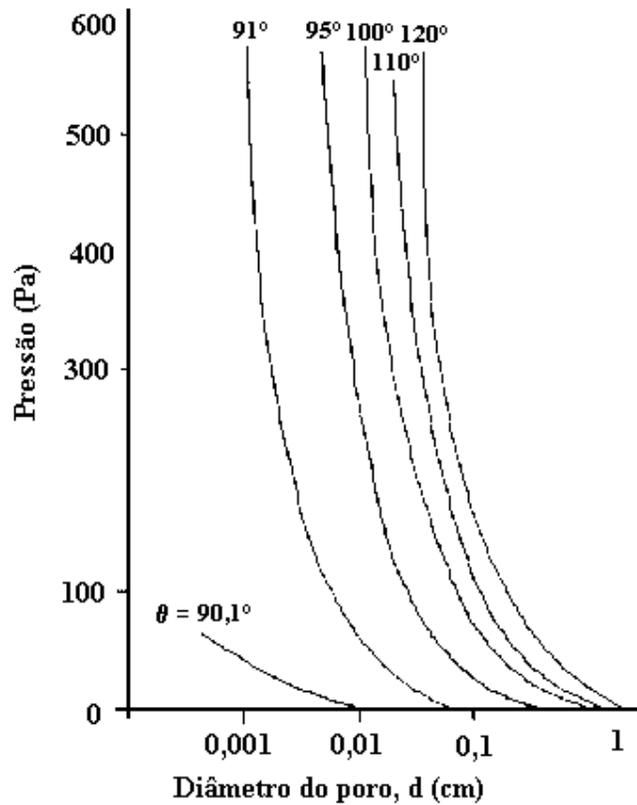


Figura 3.5: Diâmetro capilar x pressão capilar.

(Fonte: KAZMIERCZAK, 1989).

Conforme indicado na figura 3.5, constata-se que, para um mesmo ângulo de contato entre o avanço da água e a superfície do poro, quanto menor o diâmetro do poro, maior será a pressão no mesmo.

Entretanto, para uma mesma porosidade e pressão, quanto maior o diâmetro do poro, maior será a vazão correspondente.

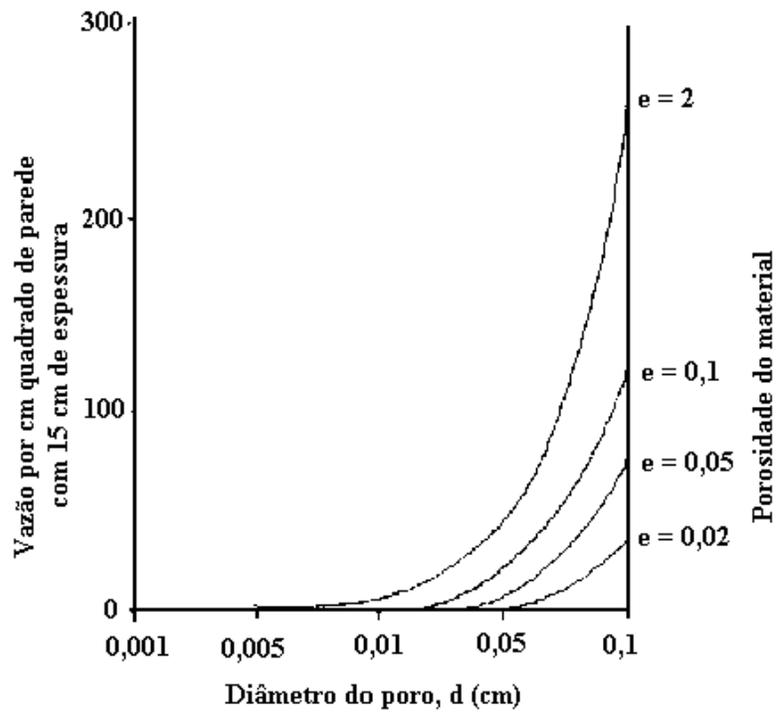


Figura 3.6: Diâmetro capilar x vazão.

(Fonte: KAZMIERCZAK, 1989).

A figura 3.7 (GRATWICK *apud* KAZMIERCZAK, 1989) mostra a determinação do ângulo de contato entre as paredes de um poro.

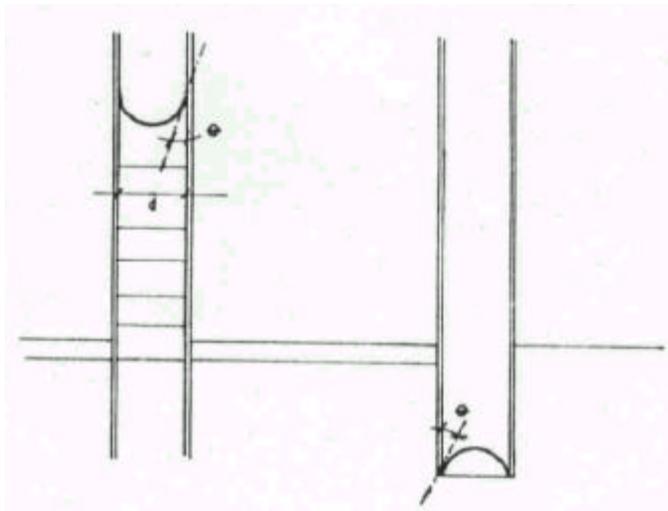


Figura 3.7: Determinação do ângulo de contato entre a água e a parede do poro.

3.2.1.3 – Penetração da umidade em alvenarias

Segundo BABA *apud* KAZMIERCZAK, (1989) outro fator que influi na força da ascensão capilar é a umidade relativa do componente, uma vez que após a saturação dos poros a força capilar deixa de existir, como pode ser observado na figura 3.8:

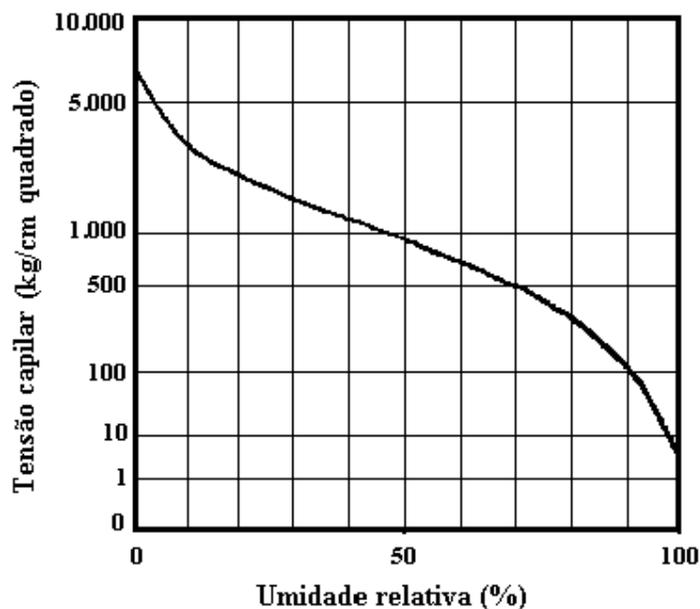


Figura 3.8: Força de ascensão capilar x umidade relativa.
(Fonte: KAZMIERCZAK, 1989).

A diferença de pressão entre a superfície interna e externa da alvenaria atua sob as aberturas de pequeno diâmetro, favorecendo a penetração da água (KAZMIERCZAK, 1989). O movimento de um líquido nos capilares é dado pela Lei de Poiseuille:

$$V = \frac{r^2 \cdot (P_2 - P_1)}{8h \cdot \ell} \quad (8)$$

Onde:

V = velocidade, em cm/s

r = raio do capilar, em cm;

η = viscosidade dinâmica do líquido, em poises;

P_1, P_2 = pressão nos dois extremos do capilar, em pascais;

ℓ = comprimento do capilar, em cm.

Todos os sólidos são descontínuos, principalmente os materiais usados na construção civil. Entre seus cristais ou células, apresentam pequenos espaços ou poros, que podem se tornar contínuos e que podem formar verdadeiros tubos e planos capilares.

Segundo VERÇOZA (1987), a capilaridade também pode agir em outro sentido, mas sempre se caracteriza pela passagem da água através de poros. No entanto, a direção do fluxo influi muito. No caso de capilaridade de cima para baixo, a gravidade aumenta a força de penetração; e de baixo para cima, diminui.

Ainda segundo o mesmo autor, quando a base de uma peça com tubos capilares – é o caso de tijolos, argamassas e concretos porosos – encosta-se a uma superfície úmida, a água sobe até atingir o equilíbrio, que variará em cada canal. No caso de paredes de tijolos ou concreto, a umidade geralmente sobe até 70 – 75 cm. Em casos especiais, no entanto, pode alcançar alturas bem maiores.

3.2.1.4 - Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)

Uma corrente de ar, não saturada de umidade, circulando sobre uma película de água, à temperatura do próprio ar, criará junto a superfície do líquido, uma pressão parcial de vapor da água superior à existente na corrente principal do gás. (PERRY & CHILTON, 1980).

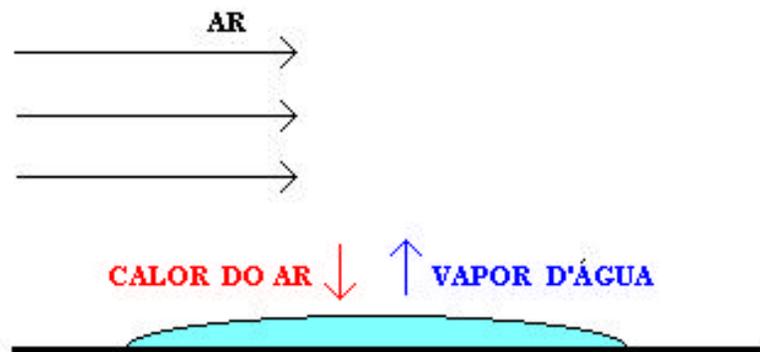


Figura 3.9: Esquema ilustrativo da transferência de energia durante a vaporização da água.

Essa diferença de concentração será o potencial causador da difusão de vapor d'água da superfície para a corrente principal. Há necessidade de ocorrer vaporização da água para

manter a pressão parcial de vapor, com a exigência de suprir-se o calor de vaporização. Essa energia é obtida normalmente do calor sensível da camada de líquido, estabelecendo-se uma diferença de temperatura entre a superfície do líquido e a corrente de ar, transferindo-se o calor da corrente principal de ar para a superfície do líquido.

Admitindo-se que o processo se realiza adiabaticamente, estabelecer-se-á um equilíbrio nesta queda de temperatura, quando o calor transferido para a superfície líquida for igual ao consumido na vaporização da água da superfície molhada. Como a água evapora às custas do calor sensível contido na película de água, esta baixa sua temperatura.

A temperatura de equilíbrio que a superfície molhada atinge é chamada de *temperatura de bulbo úmido* (TBU) do ar. Essa temperatura se mantém constante, pois todo calor entregue pelo ar para a película será igual ao calor necessário para a água evaporar. Assim, percebe-se que a TBU depende não só da temperatura do ar na corrente principal (temperatura de bulbo seco), mas também da pressão parcial de vapor nessa corrente, ou seja, da umidade relativa, que rege a difusão do vapor da superfície líquida para o ar (PERRY & CHILTON, 1980).

Uma forma de se determinar a umidade relativa do ar é calcular a velocidade de evaporação da água. Para isso, dois termômetros idênticos são expostos ao ar: um trás o bulbo descoberto; outro tem o bulbo coberto por gaze umedecida, conforme visualizado no esquema apresentado na figura 3.10:

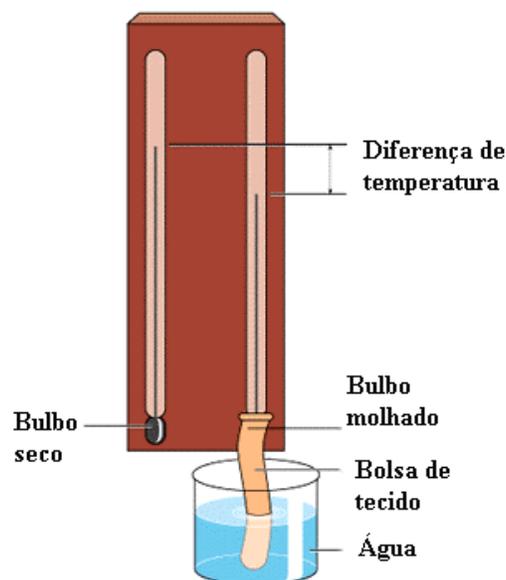


Figura 3.10: Determinação da umidade relativa do ar.

A temperatura do segundo termômetro é, pelo arranjo, inferior à do primeiro, porque a água evaporada da gaze resfria o bulbo. A partir da diferença de leitura entre os dois termômetros, e com a ajuda de uma tabela, pode ser encontrado o valor da umidade relativa.

3.2.1.5 – Curva de taxa de secagem

Curva que caracteriza os diferentes períodos de secagem por que passa um sólido, em função do decréscimo do teor de umidade, enquanto avança a secagem. Um esboço da curva pode ser visualizado na figura 3.11:

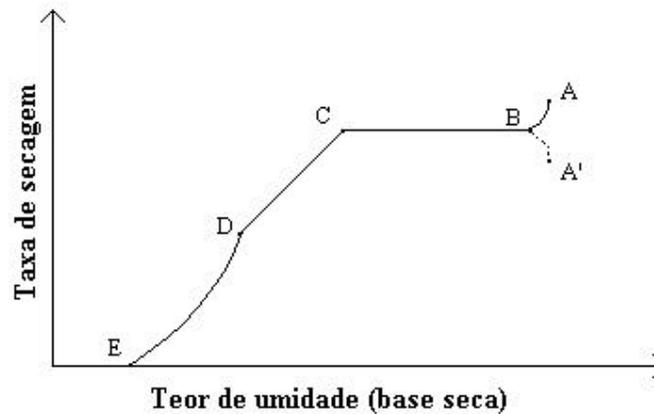


Figura 3.11: Velocidade de secagem contra teor de umidade do sólido.

(Fonte: PERRY & CHILTON, 1980)

TRECHO AB ou A'B: Período inicial, onde a taxa aumenta ou diminui, conforme encontra-se a temperatura do sólido no início da secagem. Período curto, até que a temperatura inicial do sólido seja igual a temperatura de bulbo úmido do ar.

TRECHO BC: Período de taxa constante, caracterizada pela velocidade de secagem constante. Neste período a superfície do sólido acha-se coberta por uma película de água. A temperatura do sólido mantém-se constante e a taxa de secagem é determinada pelas mesmas leis que regem a evaporação de uma camada líquida, sem sólido presente. A temperatura do sólido é aproximadamente igual a da TBU do ar quando o calor é transmitido para a superfície de evaporação do sólido, por convecção.

TRECHO CDE: Período de taxa decrescente inicia quando a umidade do sólido atinge um valor determinado, conhecido como umidade crítica, e a taxa de secagem começa a decrescer, dividida em duas zonas:

➤ *Zona de superfície de secagem não saturada (não toda molhada):* **TRECHO CD:** vem logo a seguir a da taxa constante, iniciando logo após a umidade crítica onde o sólido começa a apresentar áreas secas, que se ampliam a medida que a secagem avança. Vai, assim, diminuindo a taxa, já que é referida à área molhada em contato com o ar de secagem.

Nesta zona, a taxa de secagem é, freqüentemente, função linear da umidade do sólido, pois a resistência à difusão interna do líquido é pequena frente a resistência de remoção do vapor superficial. O aspecto do sólido pode ser visualizado na figura 3.12:

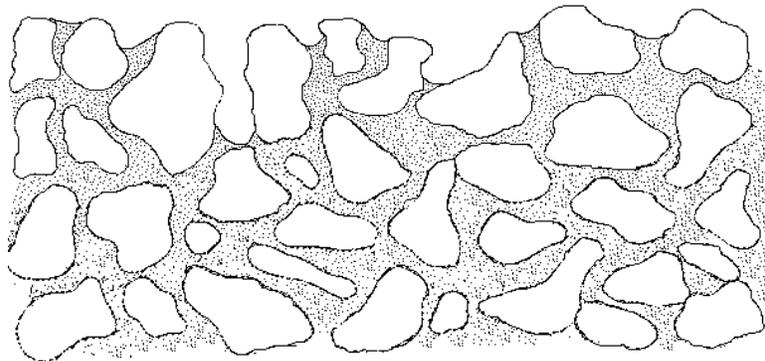


Figura 3.12: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, durante o período de taxa decrescente (Fonte: FOUST, 1982).

➤ *Zona em que o fluxo interno governa a secagem:* **TRECHO DE:** os fatores que influenciam a taxa de secagem nesta zona são os mesmos que afetam a difusão da água através de sólidos. Observa-se que a umidade e velocidade do ar não têm efeito na taxa de secagem, pois esta depende da resistência a difusão interna da água (PERRY, 1980, adaptado).

À medida que a umidade do sólido baixa, a velocidade de difusão decresce. Nesta zona, a evaporação ocorre dentro da estrutura do sólido, num plano que tende a se retrair cada vez mais para o interior do sólido, a medida que a secagem prossegue.

O aspecto do sólido pode ser visualizado na figura 3.13:

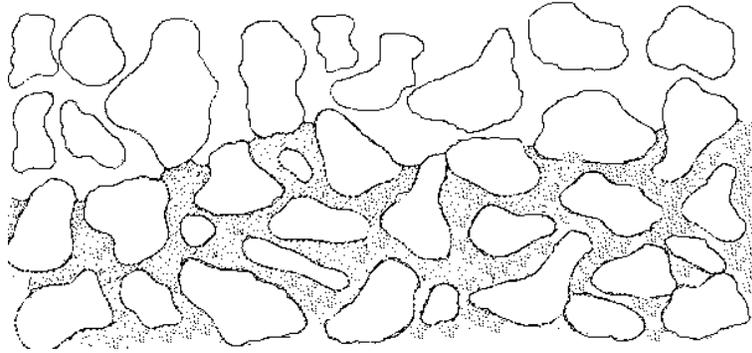


Figura 3.13: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, no trecho DE
(Fonte: FOUST, 1982).

Muitos sólidos não atravessam todos os períodos, dependendo do teor de umidade do sólido, das condições do ar e características físicas do sólido. O ponto E é denominado de umidade de equilíbrio e é fixo para um determinado material nas condições do ar de secagem.

Assim, por mais que se prolongue o tempo de secagem, não se variando as condições do ar, o teor de umidade do material não diminui além da umidade de equilíbrio (PERRY, 1980). No final da secagem o sólido tem o aspecto ilustrado na figura 3.14:

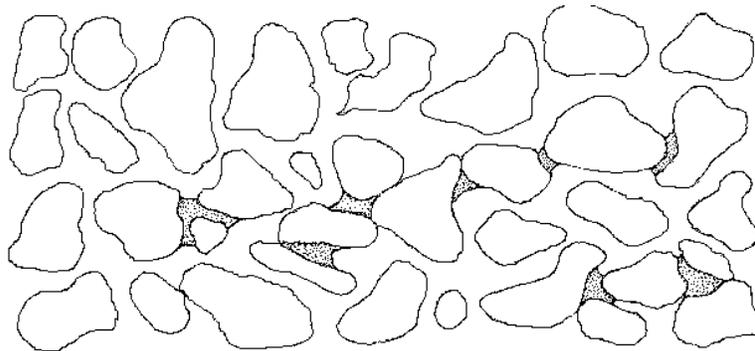


Figura 3.14: Distribuição da umidade num leito sólido particulado, no final do processo de secagem (Fonte: FOUST, 1982).

3.2.2 - Perda de umidade por evaporação

Quando ocorre a evaporação na superfície de um sólido, a umidade se desloca das camadas internas para a superfície. Este mecanismo de movimento exerce papel importante na secagem, principalmente durante o período de taxa de secagem decrescente.

Algumas teorias já tentaram explicar o mecanismo, que buscava encontrar a equação da curva de velocidade com o tempo durante o período decrescente. Entre estas teorias estão:

➤ *Teoria da difusão do líquido (no sólido):* alguns autores julgam que o movimento de líquido (umidade) no sólido é causado pelo gradiente de concentração de umidade entre as partes internas e a superfície. Ao aplicar-se as leis da teoria da difusão, para muitos casos, obtiveram dados teóricos e levantamentos experimentais coincidentes, quando se buscava o tempo de secagem (FOUST, 1982).

O processo de deslocamento de umidade é, provavelmente, limitado a soluções sólidas de uma única fase, formada com a umidade, como o sabão, gelatina e matérias que contém a chamada umidade ligada.

Entende-se por umidade ligada aquela que exerce pressão de vapor de equilíbrio inferior à pressão de vapor do líquido puro na mesma temperatura.

Durante o período de taxa de secagem constante, o teor de umidade do material é elevado e o gradiente também, resultando que a quantidade de líquido difundida no sólido é igual a evaporada na superfície. Continuando, o gradiente pode baixar a um valor tal que a taxa de secagem fique controlada pela difusão líquida no sólido (FOUST, 1982).

➤ *Teoria do movimento pela capilaridade:* nos materiais granulares e porosos, o movimento da água no sólido se dá devido a forças capilares. Durante o período de taxa constante, o movimento por capilaridade é bastante rápido e mantém a superfície molhada. A medida em que há o avanço da secagem, a água que se desloca no interior dos capilares é substituída por ar.

Quando os minúsculos reservatórios de líquido abaixo da superfície do sólido secam, a superfície líquida se retrai para dentro dos capilares e a evaporação ocorre abaixo da

superfície, num plano que se desloca tanto mais ao fundo do sólido, quanto mais seco o material fica. É o período de taxa decrescente (FOUST, 1982).

3.2.3 - Umidade crítica

Esta é a umidade que possui o material quando termina o período de taxa constante e inicia o período de taxa decrescente. Nestas condições, o movimento do líquido do interior para a superfície é insuficiente para repor a água que vaporiza na superfície.

Assim, esta umidade depende da velocidade de deslocamento da água do interior até a superfície e, portanto, da porosidade, espessura e outras características físicas que influem no deslocamento. Até hoje não foram obtidas relações satisfatórias que permitem calcular a umidade crítica, pela complexidade de funções dependentes (PERRY & CHILTON, 1980).

3.2.4 - Umidade de equilíbrio

Se um material em secagem é posto em contato com o ar de condições definidas e constantes, por um tempo suficientemente longo para que seja atingido o equilíbrio relativo à umidade e temperatura, esta umidade final que o material tiver atingido é conhecida como umidade de equilíbrio. Esta condição de umidade não se alterará por maior que seja o tempo de contato, a não ser que se mude a condição do ar.

A umidade de equilíbrio depende das características do sólido (porosidade, etc) e das condições do ar (temperatura, umidade, etc). Para muitos materiais, a umidade de equilíbrio depende também da maneira como o material foi trazido às condições de equilíbrio com o ar. Materiais orgânicos, coloidais e fibrosos possuem umidade de equilíbrio bastante elevada se comparada com materiais granulares de sólidos insolúveis (PERRY & CHILTON, 1980).

3.3 – Desidratação dos Lodos de ETAs

Muitos pesquisadores (GONÇALVES, 1997; LERSCH, 1992; SALES & CORDEIRO, 2001; HOPPEN *et al.*, 2003) têm se dedicado ao estudo de alternativas para a disposição final do lodo: regeneração do coagulante, incorporação do lodo desidratado ao concreto ou a componentes cerâmicos, fabricação de cimentos, etc. Apesar de muitos destes estudos apresentarem resultados altamente positivos, os corpos d'água continuam sendo o destino da maioria dos lodos produzidos nas ETAs no Brasil.

É economicamente inviável destinar o lodo para alguma empresa que o aceite como matéria-prima; isso porque o transporte do mesmo torna-se extremamente dispendioso devido a enorme quantidade de água (aproximadamente 97 %) agregada ao lodo. Necessário se faz que, em primeira instância, promova-se sua desidratação, reduzindo seu volume; porém, devido à natureza gelatinosa do lodo, sólido em repouso e líquido quando agitado, sua desidratação é extremamente difícil.

Em 1991, a Administração do DMAE criou uma comissão interna de técnicos de nível superior, através da Portaria 321/91, com o propósito de estudar o tratamento e a disposição dos lodos provenientes do uso de sulfato de alumínio como agente clarificante no processo de potabilização da água. Este trabalho gerou um relatório (LERSCH *et al.*, 1992), e nele foram abordadas as seguintes tecnologias:

- Filtro rotativo a vácuo;
- Prensas desaguadoras;
- Centrifugação;

O estudo contou com testes pilotos com os lodos do DMAE no filtro rotativo a vácuo do SITEL (Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos do Pólo Petroquímico do Sul), bem como com testes pilotos na centrífuga instalada na ETA Belém Novo, cedida pela empresa Westfalia, além de visita à empresas da região que utilizavam prensas desaguadoras. O parecer final do relatório apresentado pela comissão recomenda a utilização de centrífugas, devido à sua simplicidade de instalação, facilidade de operação, pequena manutenção, reduzida mão-de-obra para manter a operação do sistema, requerendo apenas operadores para o preparo do polieletrólito e descarte do lodo desidratado (LERSCH *et al.*, 1992).

Apesar da conclusão do estudo (ainda em 1992) o lodo continua a ser descartado no lago Guaíba, em virtude dos elevados custos de implementação deste sistema. Cabe destacar que as três tecnologias testadas, o filtro rotativo à vácuo, a prensa desaguadora e a centrifugação, requerem o aporte de energia elétrica.

Os leitos de secagem têm sido utilizados para remoção de água de rejeitos de diversos tipos de tratamento de águas residuárias e de abastecimento desde o início de século XX, praticamente sem mudanças consideráveis na sua estrutura física (CORDEIRO, 2001).

Nos sistemas tradicionais, a estrutura básica é formada por camada suporte, meio filtrante e sistema drenante. A possibilidade de mudança nos arranjos físicos foram testadas por CORDEIRO (2001), que utilizou uma manta geotêxtil sobre a camada filtrante do leito, como mostra o esquema da figura 3.15 (a), denominado leito modificado 1. Os estudos evoluíram para uma proposta de leito modificado 2 (figura 3.15 (b)), em que a areia foi removida e o leito, constituído por uma camada de brita de 01 a 05 cm e, sobre esta, uma manta geotêxtil.

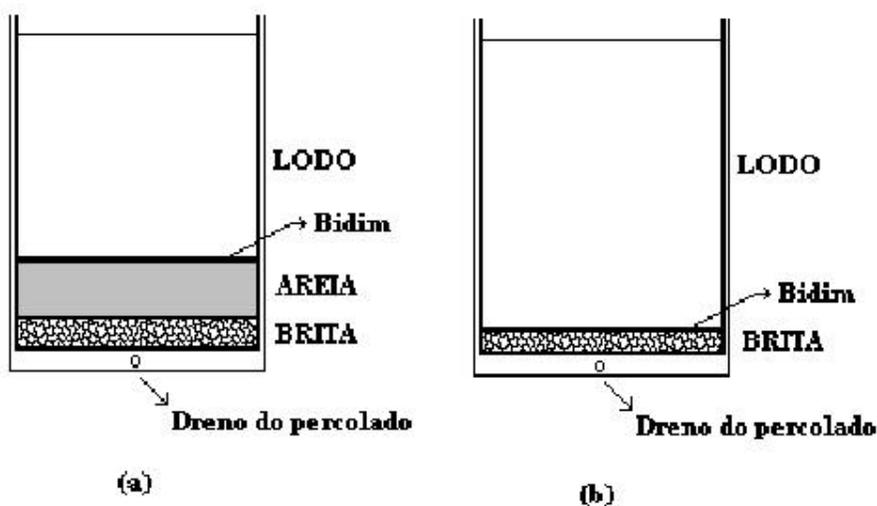


Figura 3.15: Sistema ilustrativo dos sistemas de leitos modificados por Cordeiro (1993) e (2000), respectivamente. (Fonte: CORDEIRO, 2001)

Esta evolução (b) mostrou-se muito mais eficiente que a anterior (a), pois o tempo de drenagem da água livre diminuía bruscamente com o novo arranjo, conforme pode ser visualizado na figura 3.16 (CORDEIRO, 2001).

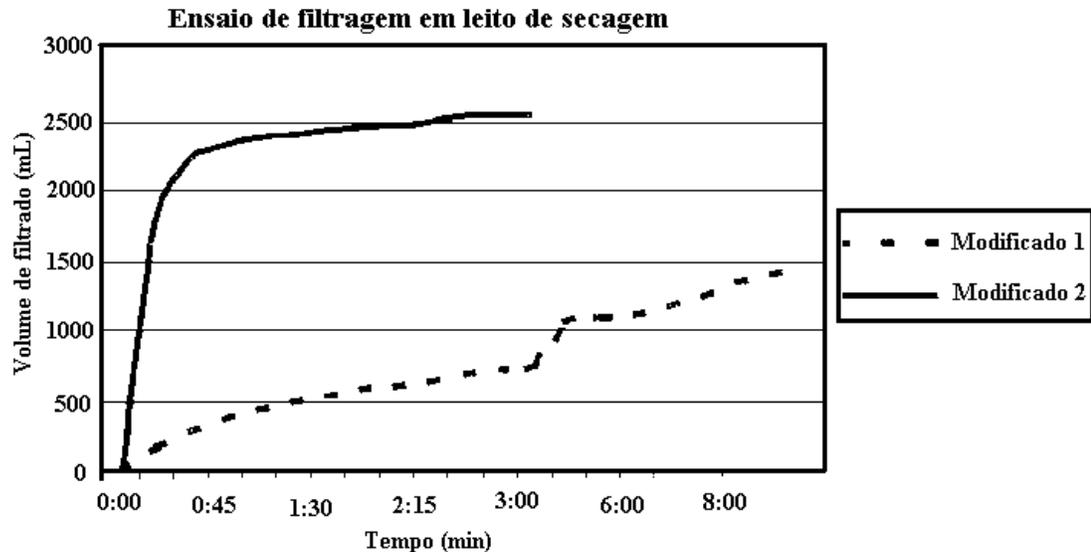


Figura 3.16: Curvas de remoção de águas de sistemas modificados por Cordeiro (1993) e remodelado em 2000. (Fonte: CORDEIRO, 2001)

WU et al. (2003) efetuaram testes com uma centrífuga de elevada velocidade para avaliar a influência de G (expresso em termos do número de vezes que a força centrífuga aplicada é maior que a força gravitacional) na desidratabilidade do lodo. A umidade residual das tortas desidratadas foi avaliada. Os resultados estão ilustrados na figura 3.17. Os índices de umidade das tortas de lodos condicionados com polímeros diminuíram continuamente com valores crescentes de G , enquanto que lodos não condicionados diminuíam com G inicialmente até o valor de 6244, a partir do qual não se alteravam expressivamente. Isso indica que água ainda pode ser removida da torta de lodo condicionado aumentando G acima 6244 e que o mesmo não ocorre com o lodo não condicionado. Assim, embora os polímeros não produzam água mais removível, eles possibilitam a formação de flocos mais resistentes para suportar a força elevada da centrifugação. Entretanto, os flocos quebrados e deformados dos lodos não condicionados tendem a reter mais umidade. Desta forma, os sistemas de desidratação que envolvem alta pressão, devem utilizar lodos condicionados, pois eles possibilitam a formação de flocos mais resistentes o que aumenta a desidratabilidade dos lodos, levando a tortas mais secas.

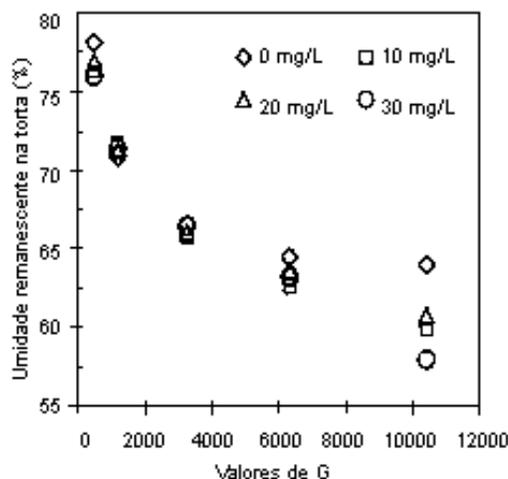


Figura 3.17: Lodos condicionados submetidos a diferentes forças centrífugas.

FONTE: WU et al. (2003).

BACHE & PAPAVALOPOULOS (2003) estudaram os fatores que influenciam o condicionamento e a desidratação de lodos obtidos pela coagulação de águas coloridas com baixa turbidez (aproximadamente 2 UNT). Havia muitos indicadores da presença de $Al(OH)_3$ (s) dentro dos flocos deste tipo de lodo, de modo que eles realizaram uma série de comparações entre este lodo e uma suspensão de hidróxido de alumínio de concentração equivalente à fração coagulada dentro do lodo. Os parâmetros estudados foram: tamanho e densidade do floco, adsorção de polímeros e desempenho de desidratação a diferentes escalas de tempo. Em todos os casos, havia fortes similaridades nas características das duas suspensões – evidenciando a presença de hidróxido de alumínio sólido no interior dos flocos. Experimentos de condicionamento e desidratação de ambas as suspensões, utilizando-se polímero não-iônico, também apresentaram resultados similares.

TURCHIULI & FARGUES (2004) estudaram a relação entre a estrutura do floco e a desidratação do lodo e caracterizaram a estrutura dos flocos por sua dimensão fractal e pelo tamanho das unidades básicas (conjuntos, agregados) de que são formados. A desidratação do lodo foi avaliada pelo índice de água de ligação e pelo tempo capilar da sucção, informações que fornecem, respectivamente, a extensão e a taxa da remoção da água. Estes pesquisadores verificaram que os flocos formados a partir do cloreto férrico contêm aproximadamente 20% menos água de ligação, mas exibem valores mais elevados de tempo de sucção capilar e, conseqüentemente, maior resistência à remoção da água do que os flocos formados a partir do

sulfato de alumínio. A estrutura dos flocos e a desidratação dos lodos estão intimamente relacionadas: flocos menos compactados contêm mais água; porém, menor conteúdo de água de ligação.

3.3.1 - Condicionamento químico do lodo de ETA

Condicionamento químico refere-se aos métodos químicos usados para alterar as propriedades do lodo, permitindo que a água seja removida mais prontamente. Em geral, o objetivo é transformar a massa gelatinosa amorfa do lodo em um material poroso.

O condicionamento químico antes da desidratação reduz as forças coesivas entre os sólidos e a água presente entre os flocos de lodo, além de precipitar substâncias dissolvidas dependendo do produto químico usado. Ou seja, o condicionamento químico reduz a resistência específica da torta de lodo, facilitando a filtração e a drenagem da água, resultando num processo de desidratação mais econômico. Na literatura encontra-se que cinzas, cal virgem, cal hidratada, carvão pulverizado, serragem e palha seca tem sido utilizados com sucesso no processo de condicionamento do lodo (WEBER, 1972).

Devido à influência da concentração do íon de hidrogênio nas partículas do lodo, a eficiência da técnica de condicionamento químico é extremamente dependente do pH. Um condicionamento econômico e eficaz pode ser conseguido adicionando-se cal ao lodo. Um benefício adicional deste condicionamento é que o carbonato de cálcio possui características de filtrabilidade muito melhores do que os precipitados formados pela adição de coagulantes metálicos.

ZALL *et al.* (1987) apud ZHAO (2002) investigou os efeitos da cal hidratada no condicionamento de lodos industriais oleosos. Foi observado que a adição do agente condicionante ao lodo reduziu a compressibilidade do mesmo e produziu uma estrutura incompressível mais rígida, capaz de manter a porosidade do lodo durante o processo de filtração a alta pressão.

São também muito utilizados os polieletrólitos orgânicos sintéticos (polímeros) no condicionamento do lodo. Os polímeros possuem alto peso molecular e podem ser: polímeros

catiônicos solúveis em água, aniônicos e não-iônicos. Eles se prestam para aglomerar os sólidos presentes no lodo através da adsorção.

Uma diferença significativa entre o condicionamento do lodo por polímeros e por produtos químicos inorgânicos está na quantidade de produto químico usado. As doses típicas de polímero são menores de 1% do peso de sólidos secos, ao passo que a quantidade de produtos químicos inorgânicos usados no condicionamento pode chegar a 20% do peso dos sólidos.

3.3.1.1 – Condicionamento químico com cal

NOVAK e CALKINS (1973) *apud* THOMPSON *et al.* (1998) sugeriram que os lodos de ETAs poderiam ser mais facilmente desidratados com a adição de cal. A Water Environment Federation caracteriza o cal $[Ca(OH)_2]$ como um eficiente condicionador devido aos densos e porosos cristais que são incorporados ao lodo, fornecendo uma matriz que permite a remoção da água.

THOMPSON *et al.* (1998) estudaram a desidratação de lodos da estação de tratamento de água da Universidade de Iowa gerados com dois diferentes coagulantes inorgânicos: sulfato de alumínio e sulfato de ferro, utilizando resíduo de cal como agente condicionante. A concentração original de lodos de sulfato de alumínio e de sulfato de ferro era de aproximadamente 4 %, enquanto que a concentração de sólidos no resíduo de cal era de 20 %. A análise química do resíduo de cal seco indicou 3,3 % de magnésio e 34 % de cálcio.

Foram testadas diferentes concentrações de misturas de lodo com resíduo de cal. As misturas foram submetidas a prensagem em filtro prensa (690 kPa, com incrementos de 172 kPa a medida que o fluxo de líquido diminuía) . Os resultados indicaram que misturas com 7 a 13 % de sólidos apresentaram resultados de teor de torta seca semelhante a misturas com teor de sólidos mais elevados (com maior proporção de resíduo de cal), indicando que o aumento de resíduo de cal na mistura, a partir de 13 %, não aumentava mais o teor de sólidos na torta seca (THOMPSON *et al.*, 1998).

FULTON (1974) *apud* ABOY (1999) destaca que a cal é um dos condicionantes mais usados, devido a sua capacidade em aglomerar as partículas finas, formando uma massa com

porosidade razoável, que permite a fácil passagem da água, e rápida desidratação. Os condicionantes como a cal, cloreto férrico e cinzas, tornam as tortas de lodo seco mais rígidas e aumentam o peso específico das partículas.

Como a cal parece ser eficiente para desidratações em geral, é de se esperar que o resíduo de cal oriundo dos sistemas de alcalinização de água também o seja. Desta forma, se o resíduo de cal fosse adicionado ao lodo do decantador da ETA, a característica de difícil desidratação do lodo da ETA seria melhorada, e o processo poderia ser otimizado.

Estudos realizados pelo COMMITTEE REPORT- PARTE 2 (1978) apontam os lodos que são acondicionados a pH acima de 11,5 (utilização de cal, por exemplo) podem converter uma grande fração do hidróxido de alumínio insolúvel, para alumínio solúvel. Neste caso, é recomendado que este filtrado sofra um pré-tratamento composto pelas técnicas de neutralização e sedimentação, antes de sua disposição final.

No projeto e gerenciamento de uma estação de tratamento de lodo um critério importante diz respeito ao controle de vetores transmissores de doenças. Embora a contaminação deste lodo seja muito menor que a do lodo de esgotos, moscas, mosquitos e baratas podem ser atraídos pelo lodo armazenado.

Neste aspecto, a adição de resíduo de cal como condicionante do lodo atuaria, também, como agente no controle destes vetores, pois o hidróxido de cálcio é um composto que propicia níveis do pH tão elevados quanto 12,8. Segundo WESTPHAL & CHRISTENSEN, 1983, em pH próximo a 12, as membranas dos organismos patogênicos são destruídas e a alta solubilidade do hidróxido de cálcio fornece, também, íons livres de cálcio, que reagem e dão forma a complexos com espécies de enxofre tais como o sulfito de hidrogênio e mercaptanos orgânicos, fazendo com que o odor séptico, característico de matéria orgânica em decomposição, diminua acentuadamente. Desta forma o pH elevado conseguido com o uso de resíduo de cal, fornece uma barreira contra a atração de vetores que eventualmente venham a se proliferar durante o manuseio do lodo.

3.3.2 – Disposição da mistura em aterros sanitários

O COMMITTEE REPORT - PARTE 2 descreve um estudo em lisímetro feito pela Monroe County Water Authority, em Nova Iorque, em 1975, que avaliou as características do lixiviado resultante da disposição da torta de lodo de ETA seco. No estudo foi utilizado o lodo acondicionado com cal até obtenção de uma concentração de sólidos de 4 %, com posterior desidratação mecânica, até uma concentração de 40 %.

O experimento era composto por uma camada de 21 cm de espessura de lodo seco compactado, sobre a qual foi posta uma camada de 42 cm de espessura de areia. Água destilada era distribuída sobre a camada de areia, permitindo a percolação através da areia simulando a chuva em um aterro sanitário.

Amostras do lixiviado eram coletadas e analisadas para verificar a mudança na qualidade de água recirculada no experimento. O lisímetro foi operado por um período de 74 dias; durante esse tempo um total de 12 m³ de água deionizada foi aplicada sobre a camada de lodo. A taxa de aplicação da água deionizada foi baseada na média de chuva local do experimento, de maneira que o volume total de água deionizada aplicada equivaleu ao volume de água precipitada durante um período de 70 anos.

As principais observações realizadas durante o experimento foram:

- O pH do lixiviado do lodo da ETA acondicionado com cal foi sempre alcalino, com valores iguais a 10,0 para taxas de escoamento de água elevadas e valores de pH iguais a 9,0 para taxas de fluxos menores;
- A concentração de alumínio no lixiviado aumentou para mais de 11 mg/L durante os sete primeiros dias de operação do lisímetro. Do oitavo dia em diante, até o vigésimo dia, as concentrações diminuíram e permaneceram relativamente constantes em 3 mg/L, tendo sido obtido também valores menores durante o período de teste;
- A concentração de alumínio no lixiviado foi um pouco menor que a concentração molar teórica de alumínio para os níveis de pH encontrados durante o teste. A concentração de alumínio depende do pH: entre pH 5,0 e 8,5, o hidróxido de alumínio é relativamente estável, com pH acima ou abaixo deste valor, o alumínio é solúvel em várias formas complexas;

- A concentração de cloretos no lixiviado incrementou durante o período de análise. No final do período de ensaio, a concentração de cloretos no lixiviado era de 16,1 mg/L;
- O pH do lixiviado dependia da taxa de escoamento da água através do aterro sanitário, com o pH variando no intervalo de 8,0 a 9,0.

A conclusão do estudo afirma que o lodo da ETA acondicionado com cal pode ser disposto em aterros sanitários, pois a combinação do lixo com o elevado pH do lodo ajuda na neutralização das características de pH baixo no aterro e conseqüentemente, na redução de solubilidade do alumínio e outros metais (COMMITTEE REPORT- PARTE 2 ,1978.

SILVA (1999) estudando o comportamento do metal alumínio presente nos lodos de ETAs desidratados, concluiu que os mesmos podem ser dispostos em aterros sanitários, pois mesmo durante a fase acidogênica observada nos aterros, a quantidade de alumínio lixiviado continuava sendo baixa.

3.4 - Resíduo do Sistema de Alcalinização: resíduo de cal

A Portaria 1469/2000 do Ministério da Saúde sugere que o pH da água distribuída à população esteja entre 6,5 e 8,5. Com isso, muitas companhias de saneamento no Brasil implantaram sistemas de abrandamento para atender a nova portaria. O DMAE optou pelo abrandamento com hidróxido de cálcio, construindo uma unidade denominada “Sistema de Alcalinização” em cada uma das suas três principais ETAs. Neste sistema, ocorre a extinção da cal virgem (CaO) de acordo com a seguinte reação



Deve-se salientar que a principal impureza da cal virgem é o carbonato de cálcio, CaCO₃, um sal insolúvel, que confere turbidez à água tratada, além de se depositar nas tubulações da rede de abastecimento.

A norma ABNT (NBR 10790/1995) tolera até 5,5 % de CaCO₃ na cal usada no tratamento de água; porém, a matéria-prima não é a única fonte de carbonato de cálcio. Ele se forma a partir da reação entre a cal extinta e o gás carbônico atmosférico, conforme a reação:



Devido à presença do carbonato de cálcio, uma quantidade considerável de resíduos se origina deste processo, necessitando ser removido. Esta remoção ocorre em um tanque de decantação, onde o carbonato fica depositado. A remoção do mesmo é feita com frequência diária, com descargas pelo fundo do tanque. Este resíduo de cal formado é encaminhado a um leito de secagem externo de onde posteriormente é recolhido e estocado em uma das unidades do DMAE, constituindo, juntamente com o lodo do decantador, mais um resíduo do tratamento da água.

3.5 – Métodos de Tratamento e Disposição Final dos Lodos de ETAs

Segundo REALI (1999), existem várias alternativas de disposição final deste lodo de ETA a serem adotados, no entanto, dependem da viabilidade técnica, econômica e ambiental. Entre estas alternativas de disposição usualmente utilizadas, incluiu-se: lançamento em cursos de água; aplicação ao solo; aterro sanitário; incineração; fabricação de cimento; e fabricação de tijolos.

A Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento (SANASA), localizada na cidade de Campinas, divulgou a inauguração de uma unidade destinada ao tratamento de lodo produzido em duas de suas ETAs:

“Está em funcionamento em Campinas a maior estação de tratamento de lodo do país e uma das pioneiras em destinar o lodo seco para a fabricação de materiais para a construção civil. A Estação de Tratamento de Lodo (ETL), localizada na Rodovia Heitor Penteado, km 7, distrito de Sousas, Campinas/SP, foi inaugurada pela SANASA em 2004, recebeu um investimento de R\$ 4,5 milhões e representa um salto positivo na preservação do meio ambiente e do desenvolvimento sustentável para Campinas. Cerca de 51 toneladas de lodo resultantes das estações de tratamento de água (ETAs 3 e 4) deixaram de ser despejadas por dia no rio.

As ETAs 3 e 4, responsáveis por 70% da água que abastece Campinas, tratam, em média, 2,5 metros cúbicos por segundo de água vinda do rio Atibaia. Antes da ETL, o lodo era lançado na cabeceira do Ribeirão dos Pires que, além de provocar o assoreamento de sua calha, voltava para o rio Atibaia, contribuindo para sua poluição.

Um convênio entre a Unicamp e a SANASA está desenvolvendo alternativas para a utilização do lodo na fabricação de materiais para a construção civil, gerando emprego e renda. A universidade estuda a viabilidade técnica e econômica de agregar o lodo à argila para fabricar tijolos cerâmicos. Outro fator é juntar o lodo ao entulho triturado vindo da indústria da construção civil na fabricação de blocos e pisos de concreto.”(REVISTA ELETRÔNICA ÁGUA E CIDADANIA, 2004)

Um esquema ilustrativo do funcionamento da ETL pode ser visualizado na figura 3.18:

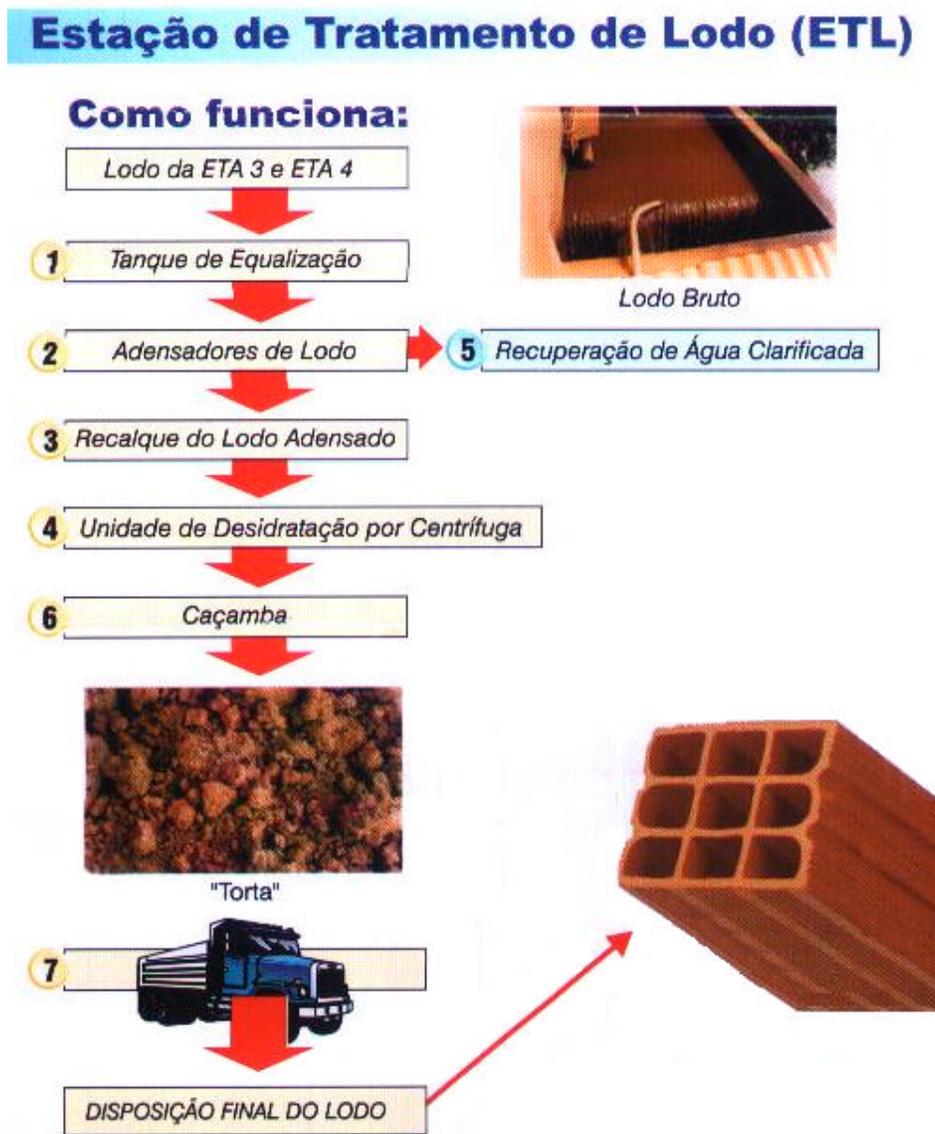
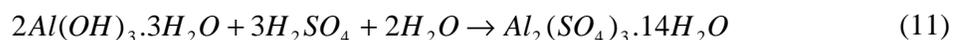


Figura 3.18: Fluxograma da ETL da SANASA. (Fonte: SANASA)

3.5.1 - Regeneração do coagulante por via ácida

A regeneração dos lodos de ETAs se processa com o ataque ácido, conforme a seguinte reação:



Esta mostra que o ácido reage com a fração do lodo que está sob a forma de hidróxido tri-hidratado (gerada a partir da coagulação da água bruta no mecanismo varredura). A fração de alumínio presente no lodo sob outras formas (hidroxocomplexos adsorvidos em colóides inorgânicos e o alumínio presente na estrutura dos materiais argilosos e silicosos contidos na água bruta) dificilmente será solubilizada nas condições usualmente utilizadas na regeneração de coagulantes (GONÇALVES, 1997).

Testes realizados indicaram que lodos provenientes de águas com elevado teor de matéria orgânica, formados através do mecanismo de varredura, apresentaram percentual de regeneração superior ao do lodo gerado através do mecanismo de adsorção/neutralização de cargas, sugerindo que apenas os lodos produzidos através dos mecanismos de varredura seriam passíveis de regeneração nas condições estudadas. Estudos de viabilidade econômica da regeneração e da reutilização do coagulante regenerado no tratamento de água e esgoto doméstico, indicaram que para as populações de 20.000 e 50.000 habitantes, a regeneração de coagulantes e sua reutilização na própria ETA ou em ETE é economicamente viável (GONÇALVES, 1999). Já CASTRO *et al.*, 1997, concluiu que o processo é antieconômico, uma vez que os custos envolvidos na recuperação do coagulante chegam a ser o dobro do custo de aquisição do produto no mercado.

A COPASA-MG contratou uma empresa de engenharia para elaboração do projeto da Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) do Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas, na região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O resíduo em questão é o lodo gerado nos decantadores da ETA do Sistema Rio das Velhas, que chega a descarregar no manancial 9.400 toneladas de lodos por mês.

A UTR prevista para tratar o lodo produzido na ETA Rio das Velhas é constituída das seguintes unidades:

- Três adensadores de lodo, com diâmetro de 24,0 m cada;
- Dois acumuladores de lodo, com diâmetro de 21,0 m cada;
- Cinco centrífugas;
- Estações elevatórias de lodo;
- Correias transportadoras do lodo que sai das centrífugas;

A operação da UTR prevê a aplicação de polieletrólito antes da centrifugação, com consumo de 4 a 6 kg por tonelada de sólidos secos. Além destas unidades, foram concebidas cinco lagoas de lodo com o objetivo de armazenar o lodo excedente produzido pelo sistema, quando as centrífugas não comportarem a produção. Cada lagoa deverá ter 3,0 m de altura útil, abrangendo uma área de 23.000 m² (CASTRO, 1997).

Ainda segundo o mesmo autor, a disposição final dos resíduos sólidos será efetuada em uma área destinada a este fim. A construção da pilha deverá se estender por aproximadamente seis anos, envolvendo serviços de operação e manutenção concomitantemente à sua construção. Percebe-se que, apesar do projeto prever a desidratação mecânica, com consumo de produtos químicos auxiliares e energia elétrica, a UTR ainda assim necessita de uma área considerável para a construção das lagoas de lodo e das pilhas para destinação do resíduo sólido.

CASTRO (1997) salienta que os custos envolvidos no projeto da URT são elevados, mas se justificam em nome da preservação dos mananciais, constituindo um componente indispensável da ETA

3.5.2 - Lançamento dos lodos de ETAs em ETEs

Um método de disposição alternativo é o lançamento dos lodos de ETAs nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), via rede coletora de esgoto. Tal procedimento eliminaria a implantação de sistemas de tratamento de lodos nas próprias ETAs. Entretanto, algumas interferências podem ocorrer nas unidades da ETE, principalmente nos digestores de lodo e nos decantadores primários, que possivelmente, irão receber a maior parte das impurezas contidas nesses despejos, de maneira que tal procedimento deve ser criteriosamente analisado. Desta forma,

CARVALHO (1999) simulou as interferências que possam ocorrer no desempenho dos decantadores primários e digestores de ETEs que passem a receber lodos de ETAs, via rede coletora de esgoto. De acordo com os resultados obtidos, provavelmente não ocorrerá inibição no processo de digestão de lodo nem interferência prejudicial ao desempenho dos decantadores primários, apesar de possível aumento de volume de lodo acumulado no fundo dos decantadores primários, devido provavelmente à coagulação do esgoto, em decorrência do coagulante contido no lodo da ETA e às próprias partículas em suspensão presentes nestes;

MELO et al. (2003) avaliou o impacto do recebimento do lodo de ETA na ETE Franca, entre os anos 2001 e 2003. Foi observado que o recebimento do lodo na ETE não reduziu significativamente a eficiência de remoção dos parâmetros analisados, ou seja, a eficiência de remoção da ETE Franca manteve-se estável após o recebimento de lodo de ETA. Na fase sólida, foi observado um aumento na concentração dos sólidos, com efeito benéfico em termos de operação; porém, foi verificado aumento na de manutenção nas bombas de alimentação, homogeneização dos biodigestores e nos filtros prensas de esteira e, principalmente em relação às telas de prensagem e filtração. Esta ocorrência parece estar relacionada com uma maior abrasividade provocada pelo lodo de ETA.

Estudos realizados por Di BERNARDO *et al.* (1999) para verificar a possibilidade de disposição dos resíduos líquidos de ETAs em ETEs, não apresentou interferência significativa na digestão anaeróbia do lodo de esgoto. Foi relatada uma diminuição substancial de coliformes totais, *Escherichia coli*, DQO, nitrogênio, fósforo e cor no sobrenadante das colunas que receberam a mistura de esgoto com resíduo líquido de ETA.

3.5.3 - Adição do lodo seco ao concreto

A imobilização da fase sólida dos resíduos de ETAs foi estudada por SALES e CORDEIRO, 2001. No estudo foi analisada a possibilidade de utilização dos lodos de ETAs secos em conjunto com resíduos de construção e demolição no preparo de argamassas e concretos não-estruturais. Esses dois resíduos foram moídos e peneirados até atingirem granulometria de um agregado natural utilizado como referencia (areia média, para o agregado miúdo e brita nº 1, para o agregado graúdo). Em seguida, foram misturados com cimento Portland, mantendo-se a mesma consistência do traço de referência, tanto no preparo da argamassa, como no preparo do concreto não-estrutural.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção conforme a normalização utilizada para argamassas e concretos, comparado os valores destas grandezas com os usualmente obtidos sem adições. Os resultados mostraram que a adição de 3 % de lodo (em relação à massa de agregado miúdo) possibilita a obtenção de concretos com resistência mecânica e absorção similares às do concreto natural. Em ambos os ensaios, o tipo de lodo não influenciou de modo significativo os resultados obtidos SALES e CORDEIRO, 2001.

Em termos ambientais, a imobilização da fase sólida dos lodos de ETAs, bem como dos resíduos da construção civil, em matrizes de argamassa e concreto, reduz a necessidade de matérias-primas naturais, como a areia e a pedra britada, cuja extração produz um intenso impacto ambiental em rios e mananciais. Tal extração muitas vezes provoca o assoreamento de rios e córregos e contribui para a ocorrência de enchentes. Além disso, o resíduo reciclado não ocupa espaço em depósitos clandestinos e aterros sanitários (SALES e CORDEIRO, 2001) .

HOPPEN *et al*, 2003 adicionou lodo da ETA Passaúna em matrizes de concreto com dosagens DE 0% a 7% de lodo de ETA e observou que à medida que o teor de lodo aumentava ocorria uma redução do consumo de cimento. A conclusão do estudo indicou que a adição do lodo na matriz de concreto foi viável tecnicamente e que a mistura de 3% de lodo pode ser usada em aplicações normais (fabricação de artefatos, estruturas pré-moldadas e construção de pavimento em concreto).

3.5.4 - Fabricação de componentes cerâmicos

SANTOS *et al*. (1993), procurando verificar a viabilidade da utilização do lodo das ETAs do SEMAE (Serviço Municipal de Água e Esgoto de São Leopoldo/RS) como matéria-prima na produção de componentes cerâmicos para a construção civil, efetuou a caracterização química do lodo por fluorescência de raios-X. A análise química do lodo já foi apresentada na tabela 3.3 .

Os resultados da análise química mostram que este resíduo tem em seus principais constituintes, valores semelhantes aos das argilas normalmente usadas como matéria-prima de produtos cerâmicos.

3.5.5 – Matéria-prima na indústria do cimento

A humanidade descobriu, há muito tempo, que algumas rochas naturais, depois de uma simples calcinação, davam um produto que endurecia pela adição da água. Em 1824, Joseph Aspdin patenteou um cimento artificial que chamou de portland, pois o concreto que se obtinha com ele assemelhava-se a uma famosa pedra de construção proveniente da Ilha de Portland, nas vizinhanças da Inglaterra. Este foi o passo inicial da indústria do cimento, tal como a conhecemos na atualidade. O cimento é um dos produtos de construção civil mais utilizados na sociedade moderna. Bastam mencionar as paredes e vigas de concreto, os túneis, as barragens e as estradas para perceber a dependência que a civilização atual tem sobre este produto (SHREVE, 1977).

Segundo KAWAMURA et al. (1991) *apud* ABOY (1999) a estação de tratamento de água de Toyono, na cidade de Osaka (Japão) utiliza 33 leitos de secagem com 1.410 m² cada um e com uma profundidade útil variando de 0,5 a 0,8 m. Todo lodo seco produzido nesta estação de tratamento é utilizado como matéria prima nas fábricas de cimento.

A EPAL – Empresa Portuguesa de Águas Livres, possui capacidade de produção diária de 1.017.000 m³ e atende a mais de 350 mil clientes diretos. Utiliza sistema de alcalinização da água a fim de corrigir o caráter excessivamente doce da mesma, o que se traduz na baixa quantidade de sais de cálcio existentes. A correção da agressividade é realizada com base na adição de cal hidratada, sob a forma de uma solução de água de cal, seguindo-se a injeção de dióxido de carbono, formando, deste modo, os bicarbonatos que permanecem na água. Os efluentes líquidos derivados do processo de tratamento da água são os lodos e os insolúveis de cal, que resultam da preparação da água de cal. Os lodos são espessados em dois espessadores, com o uso de polieletrólito aniônico. O sobrenadante é recirculado à entrada da ETA e o lodo espessado é misturado com os insolúveis de cal. Essa mistura é submetida a dois filtros de banda contínua, de onde saem com 20 % de matéria seca. Estes lodos secos estão sendo utilizados na indústria do cimento, o que permite a redução de seu impacto ambiental. (EPAL, 2004)

TORRES (1941) descreve os principais componentes da matéria-prima do cimento portland:

CaO: a cal é o componente essencial dos cimentos, figurando numa percentagem de 60 a 67 %. Na maior parte provém da decomposição do carbonato de cálcio. Pode-se dizer que as propriedades mecânicas do cimento portland aumentam com o teor de cal, desde que se encontre completamente combinada.

SiO₂: a proporção de sílica no cimento portland varia de 17 a 25%. Ela encontra-se combinada com outros componentes e e provém das argilas usadas como matéria-prima. É da sua combinação com a cal que resultam os compostos mais importantes do portland.

Al₂O₃: também da argila provém a alumina do cimento; seu teor varia geralmente de 3 a 8%. O composto formado pela combinação deste óxido com a cal acelera a pega do aglomerante e reduz sua resistência aos sulfatos, pelo que a quantidade presente deve ser pequena. Praticamente não se pode prescindir da alumina porque agindo como fundente facilita o desenvolvimento das reações que possibilitam a formação do clínquer (produto intermediário que sai do forno rotativo, durante a etapa de fabricação do cimento, com massa granular dura e tamanho de partícula ente 3 e 19 mm).

Fe₂O₃: esse óxido, oriundo da argila, aparece geralmente no cimento portland em quantidades muito pequenas, 0,5 a 6%, combinado com outros óxidos presentes. O óxido de ferro, desde que em percentagem não muito elevada, é útil pelo seu papel de fundente, desenvolvendo nesse sentido uma ação talvez mais enérgica que da alumina. Acredita-se que os teores relativamente altos de alumina e óxido de ferro possam facilitar a produção comercial de um cimento com percentagem de cal suficientemente alta para converter toda a sílica em silicato tricálcico sem que resulte cal livre em quantidades indesejáveis.

SO₃: tem sua origem principalmente no sulfato de cálcio adicionado corretamente ao cimento para regular sua pega, retardando-a. Estabelecem as especificações o teor máximo de 3% de SO₃, considerando-se perigosa sua presença acima deste limite em virtude da formação de sulfoaluminato.

MgO: a magnésia no cimento provém do carbonato de magnésio presente no calcáreo, geralmente sob a forma de dolomita (CaCO₃, MgCO₃), ou, em pequena quantidade na argila. Seu teor no cimento varia de 0,1 a 6%. Admite-se que no cimento a magnésia não se encontra combinada. Em quantidades superiores a certos limites, esse óxido atua como expansivo, agindo de forma nociva sobre a estabilidade de volume das argamassas e concretos.

K₂O e Na₂O: os álcalis encontram-se com frequência no cimento portland , em teores de 0,5 a 1,3%, desenvolvendo papel de fundentes na cozedura e agindo como aceleradores da pega.

3.5.5.1 - Etapas do processo de fabricação do cimento

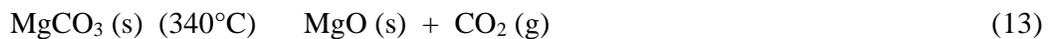
a) Evaporação da água livre

Ocorre em temperaturas abaixo de 100°C.



b) Decomposição do carbonato de magnésio

A decomposição da dolomita tem início em 340°C, porém a medida que o teor de cálcio aumenta, também se eleva a temperatura de decomposição.



c) Decomposição do carbonato de cálcio

Esta reação tem início em temperatura acima de 805°C, sendo 894°C a temperatura crítica de dissociação do carbonato de cálcio puro a 1 atm de pressão.



d) Desidroxilação das argilas

As primeiras reações de formação do clínquer iniciam-se em 550°C, com a desidroxilação da fração argilosa. A argila perde a água combinada, que oscila entre 5 e 7%, dando origem a silicatos de alumínio e ferro altamente reativos com o CaO que está sendo liberado pela decomposição do calcário.

e) Formação do 2CaO.SiO₂

A formação do 2CaO.SiO₂ tem início em temperatura de 900°C onde mesmo sílica livre e CaO já reagem lentamente. Na presença de Ferro e Alumínio esta reação é acelerada.



f) Formação do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$

O silicato tricálcico inicia sua formação entre 1200°C e 1300°C a 1400°C os produtos de reação são $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ e o restante de CaO não combinado.



g) Resfriamento

A complementação das reações de clinquerização podem ser afetadas pelo resfriamento sofrido pelo clínquer. Um resfriamento lento leva a um cimento de baixa qualidade.

Nesta etapa pode ocorrer a decomposição do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ segundo a reação:

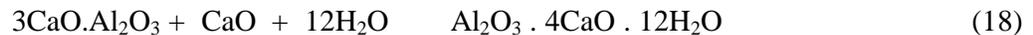


O cimento é produzido moendo-se o clínquer produzido no forno, com o gesso. O gesso é destinado ao controle do tempo de pega do cimento, para propiciar o manuseio ao adicionar água. O teor de gesso varia em torno de 3% no cimento (BASILIO, 1983).

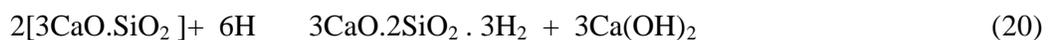
3.5.5.2 - Reações químicas do cimento Portland

Os compostos anidros do cimento Portland reagem com a água, por hidrólise, dando origem a numerosos compostos hidratados. Em forma abreviada são indicadas algumas das principais reações de hidratação (BASILIO, 1983):

1) O $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ é o primeiro a reagir, da seguinte forma:



2) O $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ reage a seguir:



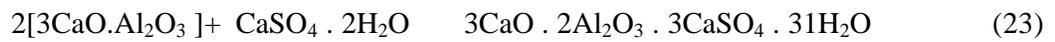
3) O $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ reage muito mais tarde, do seguinte modo:



Os silicatos de cálcio anidros dão origem a silicatos monocálcicos hidratados e ao hidróxido de cálcio, que cristaliza em escamas hexagonais, dando origem à portlandita.

O silicato de cálcio hidratado apresenta-se com semelhança ao mineral denominado tobermorita e como se parece com um gel é denominado gel de tobermorita.

4) Reação de retardo do endurecimento - utilizando gesso



4. METODOLOGIA

A parte prática deste trabalho foi dividida em dois experimentos distintos.

No **primeiro experimento**, foi testada uma modificação na montagem dos leitos de secagem convencionais, utilizando tijolos cerâmicos vazados na sua base, com o objetivo de avaliar o efeito da capilaridade dos tijolos na desidratação do lodo. Foram estudados lodos provenientes de duas ETAs do DMAE que operam com características bem distintas.

No **segundo experimento**, foi avaliada a possibilidade de condicionamento do lodo com resíduo de cal, proveniente do sistema de alcalinização de água, existente na própria ETA. Foram testados diferentes percentuais de resíduo de cal misturados ao lodo, bem como o efeito do pH desta mistura na solubilidade dos metais presentes no lodo.

4.1 – Primeiro Experimento

4.1.1 – Aspectos gerais

O objetivo deste experimento é verificar se a ação de capilaridade dos materiais cerâmicos (tijolos) dispostos na base dos leitos de secagem aumenta a drenagem da água presente no lodo. É importante lembrar que a ação da capilaridade somente atuará enquanto os tijolos não estiverem totalmente saturados de umidade. Para tanto, espera-se que a convecção natural do ar atmosférico através dos furos dos tijolos promova a secagem constante dos mesmos.

Todos os leitos receberam cobertura, a fim de que chuvas intensas não interferissem no desenvolvimento do experimento. Esta cobertura foi montada de forma a não prejudicar a secagem do lodo na superfície do leito. Também foram monitoradas as temperaturas máxima e mínima e a umidade relativa do ar no local do experimento.

Como a velocidade de desidratação dos lodos depende, principalmente, da qualidade da água bruta e do processo de clarificação utilizado na ETA, foi utilizado lodo de duas ETAs que operam de forma distintas. As principais características destas ETAs são descritas a seguir.

4.1.1.1 – ETA José Loureiro da Silva

Localizada no bairro Menino Deus, a estação de tratamento de água José Loureiro da Silva (JLS) atende, atualmente, uma população de aproximadamente 500.000 habitantes. Apesar de possuir capacidade de recalque de água bruta de 3.200 L/s, a vazão máxima atual é de 2.900 L/s.

A ETA JLS utiliza sulfato de alumínio como agente coagulante e opera com sistema convencional, isto é, a floculação é se dá por fluxo mecânico seguida de três decantadores e de oito filtros rápidos. Seus decantadores estão ilustrados na figura 4.1.



Figura 4.1: ETA José Loureiro da Silva

A desinfecção é realizada com gás cloro, em duas etapas: inter-cloração (imediatamente anterior à filtração) e pós-cloração (imediatamente posterior à filtração).

A etapa de fluoretação é realizada com bombas dosadoras de ácido fluossilícico e a alcalinização é realizada com cal hidratada, obtida a partir da cal virgem, através de uma unidade de extinção para a cal existente na própria ETA. A dosagem do agente alcalinizante é realizada com bombas dosadoras.

Quando necessário é realizada a aplicação de carvão ativado na água bruta, com o objetivo de remover odores ocasionados pela proliferação exagerada de algas no manancial que abastece a ETA.

Na ETA JLS a extração do lodo gerado na etapa de clarificação ocorre no momento da lavagem dos decantadores da ETA. A limpeza se dá aproximadamente a cada 40 dias. As características deste lodo estão ilustradas na tabela 4.1:

Tabela 4.1: Resultados obtidos na análise do lodo desidratado da ETA José Loureiro da Silva.

Parâmetro	Lodo desidratado
Sólidos totais (%)	22,6
Sólidos fixos totais (%)	20,0
Nitrogênio (%)	0,430
Fósforo (%)	0,220
Potássio (%)	0,056
Zinco (%)	0,008
Cálcio (%)	0,016
Magnésio (%)	0,122
Ferro (%)	3,879
Alumínio (%)	4,957
Cobre (%)	<0,003
Manganês (%)	0,063

Fonte: SILVA (1999). Os parâmetros foram expressos em base seca.

4.1.1.2 – ETA São João

A estação de tratamento de água São João (SJ) está localizada no bairro Higienópolis abastece a população de aproximadamente 430.000 habitantes. Apesar de possuir capacidade de recalque de água bruta de 4.000 L/s, a vazão máxima atual é de 2.200 L/s.

A ETA São João utiliza sulfato de alumínio como agente coagulante primário e polieletrólito não iônico como auxiliar de coagulação. A ETA opera com sistema do tipo pulsator, isto é, a floculação é se dá por contato com manto de lodo seguido de decantação ascendente e filtração rápida. A ETA São João encontra-se ilustrada na figura 4.2:

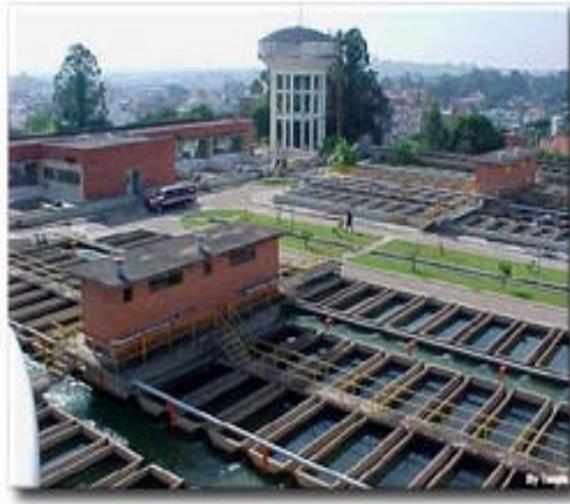


Figura 4.2: ETA São João

A desinfecção é realizada com gás cloro, em três etapas: pré-cloração (aplicação de cloro na água bruta), inter-cloração (imediatamente anterior à filtração) e pós-cloração (imediatamente posterior à filtração).

Assim como a na ETA José Loureiro da Silva, a ETA São João também realiza a fluoretação com bombas dosadoras de ácido fluossilícico e a alcalinização com cal hidratada, obtida a partir da cal virgem. Quando necessário é realizada a aplicação de carvão ativado na água bruta.

Na ETA São João a extração do lodo gerado ocorre de forma intermitente, em intervalos de 10 minutos. Como conseqüência, as características deste lodo são bem distintas das características do lodo da ETA José Loureiro da Silva e estão ilustrados na tabela 4.2:

Tabela 4.2: Resultados obtidos na análise do lodo desidratado na ETA São João.

Parâmetro	Lodo desidratado
Sólidos totais (%)	23,6 – 23,96
Sólidos fixos totais (%)	2,10 – 3,50
Nitrogênio (%)	0,02 – 1,99
Fósforo (%)	0,22 – 0,41
Potássio (%)	0,29 – 0,40
Zinco (%)	1,36 – 1,60
Cálcio (%)	0,01 – 0,03
Magnésio (%)	0,27 – 0,52
Ferro (%)	5,7 – 6,1
Alumínio (%)	4,49 – 7,49
Cobre (%)	0,66 – 0,75
Manganês (%)	3,99 – 4,83
Sódio (%)	1,77 – 2,53

Fonte: ABOY (1999). Os parâmetros foram expressos em base seca.

Este experimento tem por objetivo testar o comportamento dos lodos frente a uma modificação na estrutura e montagem dos leitos de secagem, utilizando tijolos perfurados cerâmicos na sua base e eliminando as camadas de areia no leito filtrante.

4.1.2 – Montagem dos leitos

Os leitos de secagem foram montados no pátio de uma unidade do DMAE, a ETA José Loureiro da Silva, bairro Menino Deus, em Porto Alegre. Foram construídos seis leitos convencionais e seis leitos modificados, com estrutura em alvenaria, sobre uma laje de concreto armado. Cada leito media 0,60 m de largura por 0,80 m de comprimento e possuía um caimento de fundo na ordem de 1 cm, no sentido do comprimento. Tal caimento tinha o objetivo de melhorar o escoamento do percolado em direção a um dreno de fundo. A estrutura dos leitos de secagem foi totalmente construída de tijolos maciços e a mesma recebeu cobertura contra chuvas intensas (telhado), conforme ilustrado na figura 4.3.



Figura 4.3: Estrutura dos leitos de secagem em alvenaria.

4.1.2.1 - Leitos convencionais

Os leitos convencionais foram montados conforme o esquema apresentado na figura 4.4. A altura de cada leito era de 0,50 m.

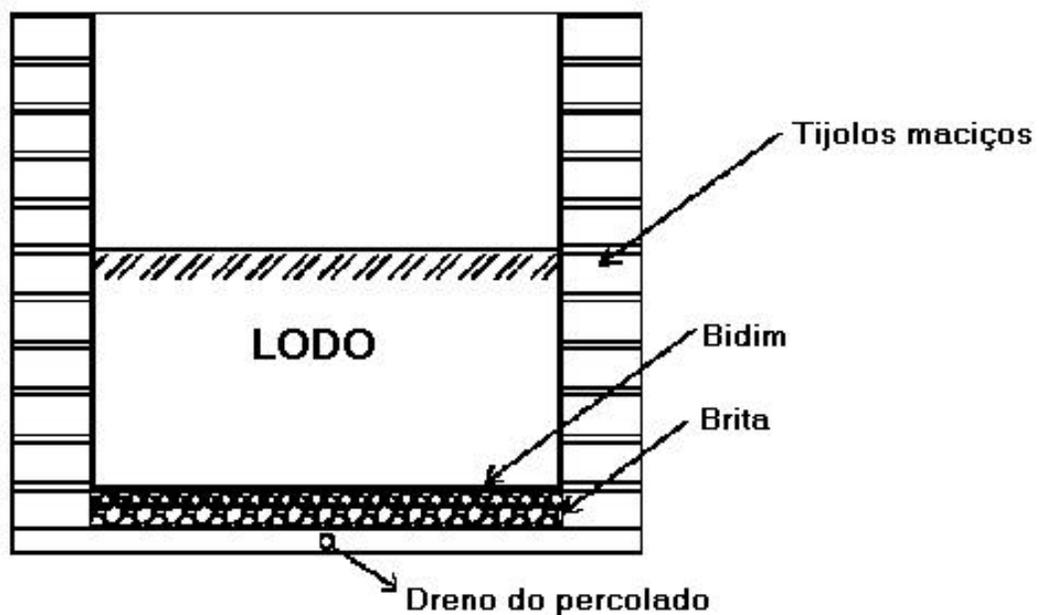


Figura 4.4: Seção transversal dos leitos convencionais.

A seqüência da montagem consistiu em:

- 1) Forrar internamente (fundo e laterais) de cada leito com a lona preta de 170 micra de espessura. Tal lona servia de material isolante entre a parede de tijolos e o lodo. É importante salientar que a lona era inteira, pois a mesma não podia ser cortada e nem ter emendas, sob risco de ocorrerem vazamentos;
- 2) Colocar o dreno de fundo perfurando a lona. O dreno consistia em um pedaço de mangueira de jardim, que atravessava a parede de tijolos. A vedação do dreno junto à lona foi realizada com massa de calafetar;
- 3) Colocar no fundo do leito uma camada de brita número zero, com altura aproximada de 5 cm, de forma a cobrir o dreno de fundo;
- 4) Sob a brita, cobrindo as laterais e o fundo dos leitos foi colocado a manta geotêxtil, Bidim, OP-20.

Bidim é um geotêxtil de excelente qualidade e resistência, 100% poliéster de filamentos contínuos mecanicamente ligados por agulhagem. São classificados pela gramatura. Ex: BIDIM OP 20 = 200 gr/m².

A escolha da manta geotêxtil OP-20 deu-se em função dos resultados obtidos por SILVA (1999), que testou vários tipos diferentes de mantas geotêxtil e verificou que a OP-20 apresentou os melhores resultados na desidratação dos lodos de ETAs.

A seqüência de montagem dos leitos convencionais está ilustrada na figura 4.5:



Figura 4.5: Montagem dos leitos convencionais: (a) lona revestindo o fundo e as paredes laterais internas do leito; (b) brita colocada sobre a lona, cobrindo o dreno de fundo; (c) bidim colocado sobre a brita.

4.1.2.2 - Leitos modificados

Os leitos modificados foram montados como ilustrado na figura 4.6:

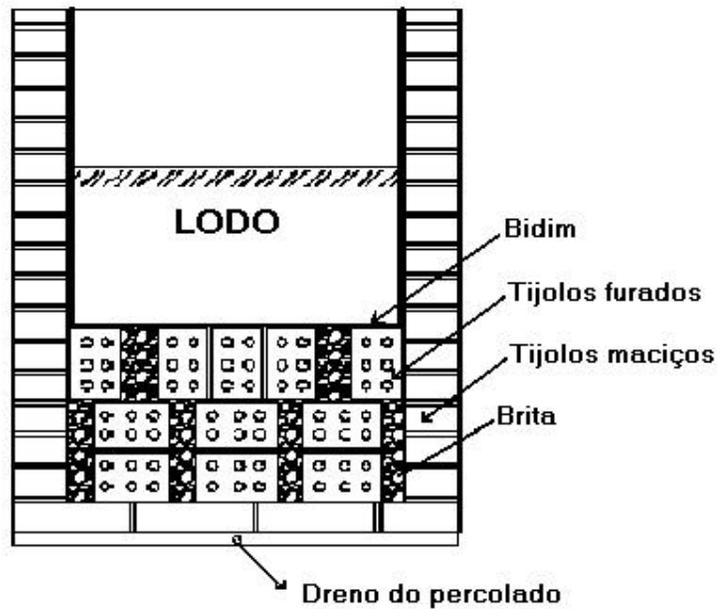


Figura 4.6: Seção transversal dos leitos modificados.

É importante salientar que os leitos modificados eram dotados de uma abertura (janela) rente ao fundo, com 20 cm de altura e ocupando toda a dimensão lateral do leito no sentido da largura. A seqüência da montagem dos leitos modificados consistiu em:

- 1) Forrar internamente (fundo e laterais) de cada leito com a lona. Neste caso, a lona também era inteira; porém, foi cortada fora no encaixe da abertura;
- 2) Colocar o dreno de fundo perfurando a lona. O dreno estava localizado três centímetros abaixo da abertura. A vedação do dreno junto à lona foi realizada com massa de calafetar;
- 3) Colocar no fundo do leito uma camada de brita, de modo que a camada de brita e a abertura lateral ficassem no mesmo nível. Neste caso, a brita tem também a função de nivelar os tijolos, já que o fundo do leito tinha um caimento de 1 cm;
- 4) Colocar sobre a brita três fileiras de tijolos perfurados deitados com os furos direcionados para a abertura lateral do leito, de modo a permitir a passagem de ar pelos furos dos tijolos;
- 5) Preencher o vão formado entre as fileiras de tijolos com brita;
- 6) Adicionar mais cinco fileiras de tijolos perfurados, desta vez de pé, ocupando, assim, toda a altura da janela lateral do leito. Preencher o vão formado nesta segunda camada, também com brita.
- 7) Sobre a segunda camada de tijolos, colocar a manta geotêxtil, Bidim, OP-20, de modo a cobrir o fundo e as paredes internas dos leitos;

Detalhe das aberturas laterais (no sentido da largura) nos leitos modificados podem ser visualizadas na figura 4.7:



Figura 4.7: Aberturas laterais nos leitos modificados.

Foi posto ao lado dos leitos, sob a estrutura de alvenaria, um termômetro de máximas e mínimas para registrar as temperaturas extremas ao longo do dia. Também foi utilizado um conjunto de termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido para a determinação da umidade relativa do ar no local do experimento.

Para efeito de comparação, os leitos de controle foram denominados C1, C2, C3, C4, C5 e C6; os leitos modificados M1, M2, M3, M4, M5 e M6. A figura 4.7 apresenta um layout da alocação destes leitos na estrutura montada no pátio da ETA.

M6	M5	M4	C6	C5	C4
M3	M2	M1	C3	C2	C1

Figura 4.8: Layout da alocação dos leitos de secagem.

Após a realização do ensaio com o lodo da ETA São João, o lodo remanescente nos leitos foi removido com o auxílio de uma pequena pá. Optou-se pela limpeza da manta geotêxtil *in loco*, de modo que a mesma não foi removida dos leitos. A manta geotêxtil recebeu jatos de água provenientes de uma mangueira, conectada a uma tubulação de água. O objetivo era preparar os leitos para a segunda etapa deste experimento, ou seja, utilizar o lodo da ETA José Loureiro da Silva. A opção pela limpeza da manta *in loco* se justifica, pois a retirada das mantas de cada leito para a limpeza não seria viável em termos operacionais.

4.2 - Segundo Experimento

Neste experimento, utilizou-se uma mistura de lodo com resíduo de cal oriundo do Sistema de Alcalinização da ETA José Loureiro da Silva. Tal resíduo, após seco, é depositado no pátio da referida ETA.

4.2.1 - Montagem dos Leitos de secagem

O experimento foi montado nas dependências do Laboratório de Físico-Química, da Divisão de Tratamento do DMAE. Utilizaram-se 18 leitos de secagem, cada um constituído de um balde plástico de 18 litros, dotado de um dreno de fundo, para recolhimento do líquido percolado. No interior do leito foi colocada uma camada de material de sustentação (cilindros plásticos vazados), de altura aproximada de 5 cm, sobre o qual o líquido teria que percolar, antes de atingir o dreno de fundo, conforme ilustrado na figura 4.8:



Figura 4.9: Cilindros plásticos vazados,
(camada de sustentação)

Sobre esta camada de sustentação foi colocada a manta geotêxtil (bidim), OP-20, previamente costurada, de forma a cobrir o fundo e as paredes laterais do leito. Cada leito de secagem recebeu 10 kg da mescla lodo/resíduo de cal, nas proporções indicadas na tabela 4.3. Conforme pode ser observado, os ensaios foram realizados em triplicatas.

Tabela 4.3: composição percentual dos leitos de secagem

leitos	Lodo	Resíduo de cal
1, 2 e 3	100 %	0,0 %
4, 5 e 6	97,5 %	2,5 %
7, 8 e 9	95,0 %	5,0 %
10, 11 e 12	92,5 %	7,5 %
13, 14 e 15	90,0 %	10,0 %
16, 17 e 18	0,0 %	100 %

4.2.2 – Coleta do lodo do decantador

O lodo utilizado no experimento foi gerado nos decantadores da ETA José Loureiro da Silva. A coleta do lodo neste dia não pôde ser realizada com o caminhão sugador, que estava em manutenção. Desta forma, a coleta foi realizada manualmente, utilizando-se baldes e corda.

4.2.3 – Coleta do resíduo de cal

O resíduo de cal foi recolhido dos leitos de secagem de resíduo do sistema de alcalinização da ETA José Loureiro da Silva, conforme visualizado na figura 4.10:



Figura 4.10: Leitos de secagem de resíduo do sistema de alcalinização

O resíduo foi armazenado em um recipiente plástico de 60 litros, para posterior utilização.

4.2.4 - O Experimento: mistura de lodo com resíduo de cal

A massa necessária de lodo a ser adicionada a um determinado leito era inicialmente depositada em um recipiente. Posteriormente, pesava-se a massa necessária de resíduo de cal e a mesma era adicionada ao recipiente que continha o lodo, homogeneizando-se a mistura com uma pá. Após, a mistura era vertida nos leitos de secagem. Mesmo nos leitos que receberam apenas um dos constituintes da mistura (apenas lodo ou apenas resíduo de cal) o processo de homogeneização era realizado.

Após a homogeneização, uma pequena amostra da mistura era coletada em frasco hermético e armazenada em câmara-fria (temperatura de $\pm 4^{\circ}\text{C}$) para posteriores análises (umidade, pH, etc).

Durante o experimento, foi monitorado o volume de percolado de cada leito em função do tempo. Inicialmente, foram utilizados intervalos de ± 10 minutos, aumentando-se o valor do intervalo de tempo à medida que o volume de percolado coletado diminuía.

Todo o percolado dos leitos foi coletado, exceção feita aos leitos 1,2 e 3, que, mesmo depois de decorridas 72 horas do início do experimento ainda continuavam drenando líquido. O experimento foi dado por encerrado após as 72 horas de início e esta última parcela nestes leitos foi desprezada. Havia um recipiente para a coleta do líquido percolado abaixo do dreno de cada leito e um outro recipiente, maior, para o armazenamento deste líquido.

O percolado foi armazenado para análises futuras (pH e turbidez). Uma parte foi preservada com ácido nítrico para as análises de metais.

Uma fração do percolado dos leitos 5, 9, 11 e 13 foi neutralizada com ácido clorídrico até pH 6,5 – 7,5 e deixada em repouso por 24 horas. Após este período, procedeu-se a coleta do líquido sobrenadante, o qual foi encaminhado para análise de alumínio.

A massa sólida remanescente nos leitos de secagem, após o término do experimento, foi seca em estufa a 105°C e moída até passagem em peneira de 200 mesh. Amostras foram encaminhadas ao Centro de estudos em Petrologia e Geoquímica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para análises de espectrometria de fluorescência de Raio X.

A parcela de percolado destinada à análise de metais foi digerida durante 15 dias com porções de ácido nítrico concentrado. A digestão foi realizada no Laboratório Central da Divisão de Tratamento do DMAE e após, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Absorção Atômica da Divisão de Pesquisa do DMAE, onde foram realizadas as leituras. Utilizou-se uma prova em branco contendo apenas água ultra-pura, utilizada nas diluições, e o ácido nítrico concentrado.

No fluxograma da figura 4.11 são apresentadas as etapas do segundo experimento:

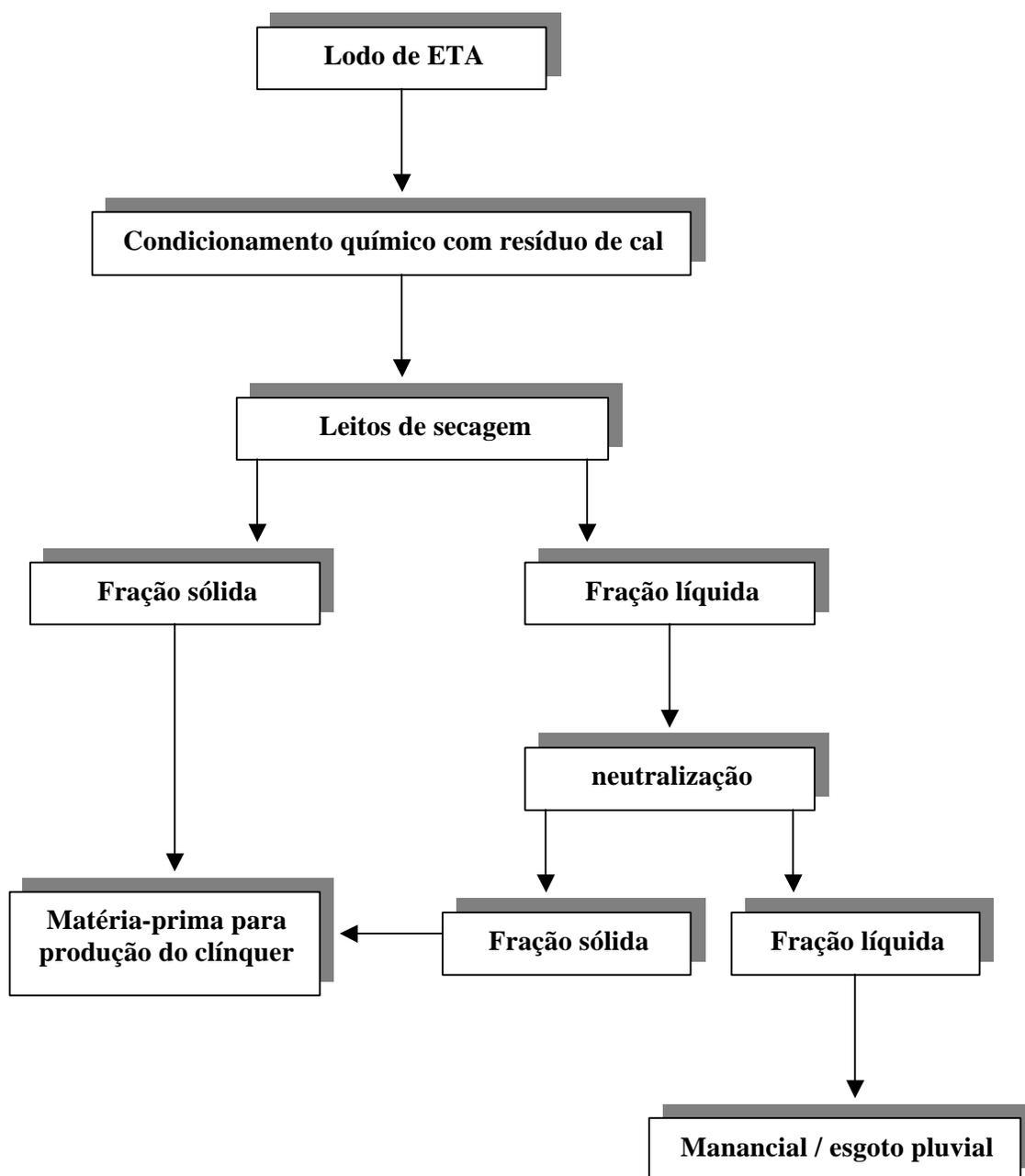


Figura 4.11: Fluxograma das etapas do segundo experimento.

4.3 – Análises realizadas

A análise de teor de umidade foi realizada ao longo do primeiro experimento. No segundo experimento, as análises químicas e físico-químicas foram efetuadas apenas no início e no final do experimento. No percolado, a análise foi realizada apenas no final do experimento (amostra composta).

A caracterização do resíduo de cal empregado no experimento foi realizada no Laboratório Central da Divisão de Tratamento do DMAE, conforme NBR 10.790.

Para a realização das análises dos efluentes líquidos, foram seguidas as recomendações da STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER – APHA, AWWA, WPCF (1992).

A tabela 4.4 apresenta a relação dos métodos empregados nas análises das amostras, bem como o laboratório em que a mesma foi realizada.

Tabela 4.4: métodos empregados nas análises das amostras

Análise	Método	Laboratório
pH	eletrométrico	DVT/DMAE
turbidez	turbidimétrico	DVT/DMAE
metais	espectrofotometria de absorção atômica	DVP/DMAE
fluorescência de raio X	Amostras fundidas em tetraborato de lítio	CPGq/UFRGS
teor de umidade	Diferença após aquecimento em estufa (105 °C)	DVT/DMAE

4.4 – Tratamento estatístico dos resultados

A interpretação dos resultados obtidos foi realizada pela análise de variância a um fator (tabela ANOVA), para verificar a semelhança entre os dois tipos de leitões (convencionais e modificados).

Este tratamento estatístico também foi empregado no segundo experimento, comparando os cinco tratamentos em termos de diferença de umidade, turbidez do líquido percolado e teor de alumínio solúvel no líquido percolado.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Primeiro Experimento

5.1.1 – Lodo ETA São João

Na primeira etapa deste experimento, os leitos foram colocados em carga com o lodo da ETA São João. No momento do descarregamento observou-se que o lodo era muito fluido, como pode ser visualizado na figura 5.1:



Figura 5.1: Lodo da ETA São João sendo descarregado nos leitos.

Logo no início do experimento, enquanto o leito era posto em carga, uma quantidade muito grande de líquido foi drenado. Nos instantes iniciais a aparência do líquido drenado era muito escura. Após, talvez devido à formação de uma película de lodo compactado no leito rente ao bidim, o líquido drenado passou a ter aparência límpida. Foi impossível realizar a coleta do líquido drenado, pois a quantidade foi muito grande desde o início do processo.

Nos leitos modificados, o líquido drenado não se restringia a sair apenas pelo dreno, mas por qualquer local onde pudesse escoar, conforme ilustrado na figura 5.2. Nesta mesma figura, a aparência do líquido drenado já é límpido nos leitos 1 e 2, enquanto que o leito 3 ainda está sendo carregado.



Figura 5.2: Líquido drenado nos leitos modificados.

Após aproximadamente uma hora do descarregamento do lodo, formaram-se, nos leitos, duas camadas distintas: uma de aproximadamente dois centímetros, rente ao fundo do leito, constituída de lodo compactado; e outra camada, sob a primeira, de líquido límpido, medindo aproximadamente 10 centímetros. Salienta-se que os leitos foram carregados até 30 cm, o que indica que o restante do líquido já havia sido drenado.

Aproximadamente 16 horas após o início do processo, o lodo encontrava-se sem a camada de líquido por cima, restando apenas a fina camada de lodo compactado. Observou-se, visualmente, que os leitos convencionais pareciam estar com o processo de secagem mais acelerado. Isso foi confirmado na análise de teor de umidade nos leitos. A média da umidade dos leitos convencionais era de 94,16 %, contra 96,05 % dos leitos modificados.

Cinco dias após o início, o experimento foi interrompido, pois a ETA José Loureiro da Silva iniciava seu ciclo de lavagem de decantadores. Era de interesse preparar os leitos para receber o lodo desta ETA, uma vez que o lodo da ETA São João não se mostrou adequado para a análise experimental em questão. Antes da interrupção do experimento, foi realizada a coleta de amostra para a determinação final da umidade do lodo. Os resultados estão ilustrados na figura 5.3:

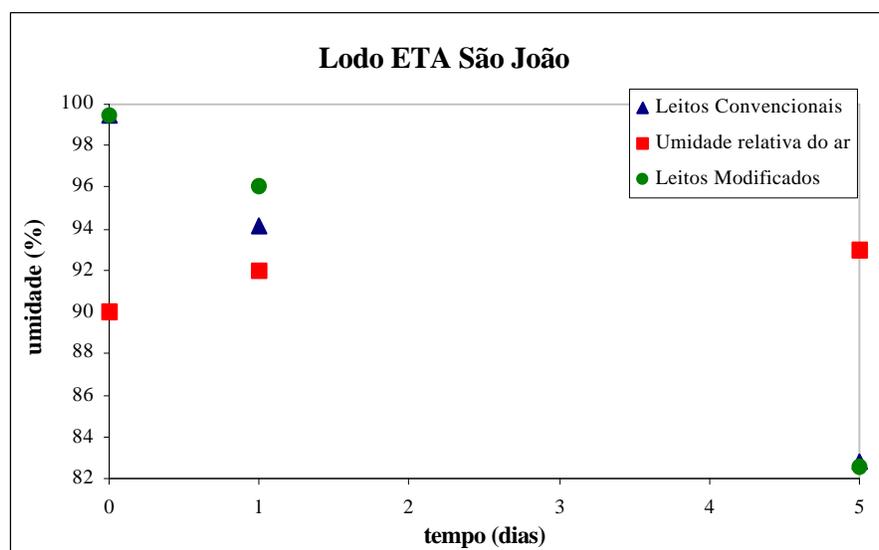


Figura 5.3: Tempo (em dias) *versus* umidade dos leitos.

Salienta-se que, no fim do experimento, não foi observada diferença visual entre os leitos: ambos pareciam estar com o processo de secagem no mesmo estágio. Dados detalhados encontram-se na tabela 5.1. A diferença de umidade apresentada na última coluna da tabela é relativa a hora zero. Nos leitos C4 e M4 houve problemas de vazamentos que comprometeram os resultados; portanto, os mesmos não foram considerados.

Tabela 5.1: Dados de umidade do lodo dos leitos da ETA São João.

leitos	0 hora	16 horas	138 horas	diferença
C1	99,37%	93,49%	83,14%	16,23%
C2	99,42%	95,86%	83,67%	15,75%
C3	99,38%	95,27%	84,04%	15,34%
C5	99,51%	93,59%	82,49%	17,02%
C6	99,47%	92,61%	84,04%	15,43%
M1	99,41%	95,96%	83,03%	16,38%
M2	99,39%	95,12%	82,55%	16,85%
M3	99,42%	95,64%	84,30%	15,12%
M5	99,43%	96,55%	83,35%	16,29%
M6	99,45%	96,22%	84,12%	16,08%

Durante os cinco dias de desenvolvimento dos testes com o lodo da ETA São João, a temperatura máxima registrada nos termômetros localizados junto aos leitos de secagem foi

de 31,5 °C. Já a temperatura mínima foi de 22,0 °C. A umidade relativa do ar manteve-se em torno de 92 %, registrando-se um máximo de 93%, no final do experimento e um mínimo de 90 %, no início do experimento.

Ao final do experimento, o teor umidade tanto nos leitos convencionais, quanto nos leitos modificados ficou em torno de 82,5 %.

A análise de variância a um fator para a diferença de umidade permite afirmar que estatisticamente não existe diferença ao nível de significância de 5% entre os leitos convencionais e modificados, conforme resultados apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tabela ANOVA para lodo da ETA São João – umidade

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Leitos convencionais	5	79,77	15,9537	0,47644
Leitos modificados	5	79,76	15,9517	0,51711

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crí (5%)</i>	<i>F crí (1%)</i>	<i>F crí (0,1%)</i>
Entre grupos	9,19E-06	1	9,2E-06	1,85E-05	5,318	11,259	25,415
Dentro dos grupos	3,974172	8	0,49677				
Total	3,974182	9					

5.1.2 – Lodo ETA José Loureiro da Silva

Na segunda etapa deste experimento, os leitos foram colocados em carga com o lodo da ETA José Loureiro da Silva. A coleta do lodo foi realizada em um ponto do decantador em que o lodo encontrava-se bastante denso e, por vezes, a bomba do caminhão sugador que fazia a retirada do lodo teve dificuldades em operar.

Foi realizada a coleta de amostras em cada leito, para a análise de umidade inicial do lodo. Para tanto, amostras de lodo eram recolhidas, procurando-se seguir a diagonal de fundo e recolher a amostra em toda a profundidade do leito. As amostras eram colocadas em recipientes de vidro de boro-silicato (copos de béquer) e imediatamente cobertos com filme plástico. A alocação dos leitos seguiu os padrões estabelecidos na figura 4.6; porém, o leito C4 não foi posto em carga, pois foi verificada uma perfuração na lona, o que poderia ser causa de vazamentos, comprometendo o resultado do experimento.

O experimento foi conduzido ao longo de 40 dias. Neste período foram realizadas seis análises de umidade no lodo. Quatro horas após o início do experimento, houve uma chuva bem forte, que atingiu mais os leitos M3 e M6; porém, não prejudicou o andamento dos testes. No segundo dia era perceptível a formação de uma camada de lodo mais espessa junto às paredes laterais de todos os leitos e, apesar de ainda haver uma lâmina de líquido incolor sobre o lodo, os leitos trincaram. As trincas formadas estavam encobertas pelo líquido sobrenadante que apresentava-se confinado no centro do leito.

É possível que a formação destas trincas deva-se à forma como os leitos foram operados: quando foi realizada a remoção do lodo de dentro dos leitos, no experimento anterior (lodo da ETA São João), não foi efetuada a substituição da manta geotêxtil. O lodo apenas foi removido, raspando-se bem o fundo e as laterais do leito. Após, a limpeza foi concluída com o auxílio de um jato de água, fornecido por uma mangueira. A manta geotêxtil em nenhum momento foi removida do leito. Com isso, as laterais ficaram bem limpas, mas no fundo de cada leito ficou depositada uma camada muito fina de lodo, que pode ter obstruído os poros da manta geotêxtil na base do leito. Talvez o fato de que nas laterais do leito o bidim estivesse desobstruído (limpo), a passagem da água tenha sido favorecida por ali, acelerando a drenagem do líquido e formando, indesejavelmente, uma camada de lodo mais espessa junto às paredes laterais do leito. Essa secagem mais acelerada nas laterais pode ter provocado o trincamento do lodo no centro devido à contração do lodo nas laterais.

Nos dias seguintes, a camada de líquido sobrenadante desapareceu e as trincas foram aumentando, bem como a camada de lodo mais espessa junto às paredes laterais do leito, que se apresentava cada vez mais seca (chegando, inclusive, a se soltar da parede, envergando para o centro do leito). É importante salientar que estas observações dizem respeito a todos os leitos, pois não foi observada nenhuma diferença visual entre os leitos convencionais e os leitos modificados.

O aspecto do lodo nos leitos pode ser visualizado na figura 5.4. Nesta figura também está ilustrado o aspecto do lodo ao término do experimento, onde é possível determinar os locais onde foram coletadas as amostras de lodo para a execução das análises de umidade. Procurou-se coletar o lodo em toda a profundidade do leito, em três pontos distintos, seguindo a diagonal de fundo.

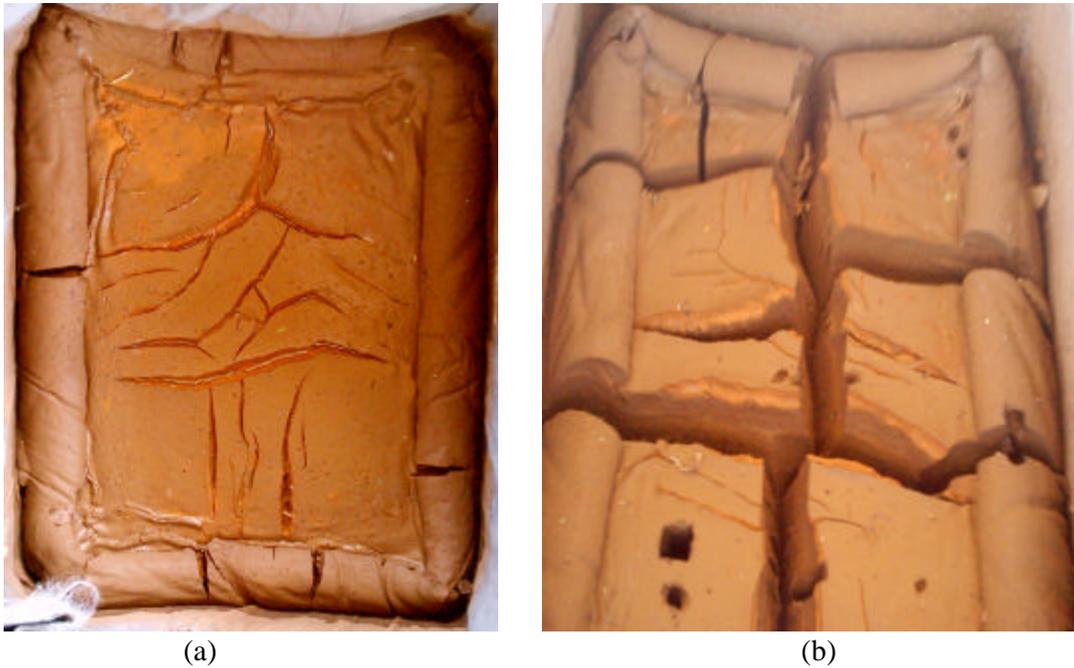


Figura 5.4: Aspecto do lodo nos leitos de secagem; (a) trincas sem líquido sobrenadante; (b) lodo pronto para ser removido do leito, ao término do experimento (38 dias).

Durante o desenvolvimento dos testes com o lodo da ETA José Loureiro da Silva, a temperatura máxima registrada nos termômetros localizados junto aos leitos de secagem foi de 37,0 °C e a média das temperaturas máximas diárias foi de 34,3 °C. Já a temperatura mínima foi de 18,0 °C, sendo a média das temperaturas mínimas diárias de 23,3 °C. A umidade relativa do ar manteve-se em torno de 87 %, registrando-se um máximo de 90%, no início do experimento e um mínimo de 80 %, no final do experimento.

O gráfico que relaciona a umidade do lodo nos leitos em função do tempo pode ser visualizado na figura 5.5.

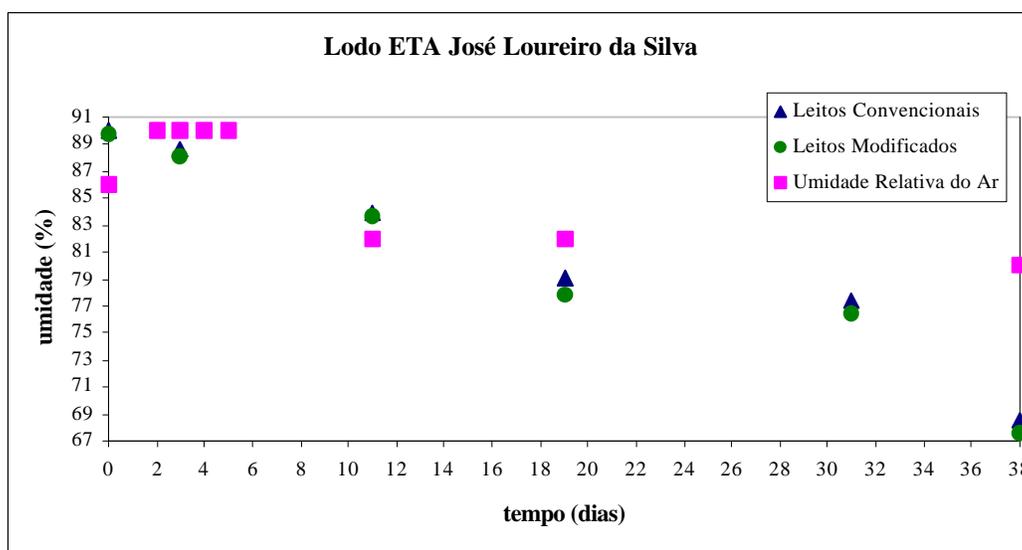


Figura 5.5: Umidade média dos leitos em função do tempo.

Dados mais detalhados podem ser visualizados na tabela 5.3, que exhibe a umidade do lodo em cada leito de secagem. No leito C1, a partir do décimo nono dia verificou-se que as laterais da lona no leito haviam se desprendido, caindo sobre o lodo. Desta forma, optou-se por desprezar este leito, em função de o mesmo não contar com a secagem por convecção superior. O mesmo foi verificado com o leito M1 no momento da coleta da última amostra.

Tabela 5.3: Dados de umidade do lodo nos leitos de secagem para o lodo da ETA José Loureiro da Silva.

leitos	umidade do lodo (%)						Diferença
	dia 0	dia 3	dia 11	dia 19	dia 31	dia 38	
C1	90,21	88,12	83,47	AP	AP	AP	
C2	89,68	AP	83,86	79,62	75,71	70,59	19,09
C3	89,49	88,27	84,46	79,89	78,06	69,59	19,90
C5	90,44	88,96	84,33	78,04	76,50	64,85	25,59
C6	90,07	89,12	83,74	78,78	79,30	69,09	20,98
M1	89,72	87,46	83,10	77,80	76,70	AP	
M2	88,55	87,23	82,45	75,71	75,50	67,17	21,38
M3	89,03	88,01	83,19	76,67	76,20	66,82	22,21
M5	90,57	88,98	84,23	79,04	77,38	66,19	24,38
M6	90,36	87,91	84,74	78,40	76,67	69,58	20,78

AP = amostra prejudicada.

A análise de variância a um fator para a diferença de umidade permite afirmar que estatisticamente não existe diferença ao nível de significância de 5% entre os leitos convencionais e modificados, conforme resultados apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Tabela ANOVA para lodo da ETA JLS – umidade

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contag</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Leitos convencionais	4	85,57	21,3916	8,448367
Leitos modificados	4	88,76	22,1899	2,482443

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crít (5%)</i>	<i>F crít (1%)</i>	<i>F crít (0,1%)</i>
Entre grupos	1,2744	1	1,27448	0,233	5,987	13,745	35,507
Dentro dos grupos	32,792	6	5,46541				
Total	34,066	7					

5.2 – Segundo Experimento

5.2.1 – Resultados das análises do resíduo de cal

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do resíduo de cal utilizado no experimento encontram-se ilustrados na tabela 5.5:

Tabela 5.5: Caracterização do resíduo de cal.

Parâmetros	Valores
Teor de hidróxido de cálcio – Ca(OH) ₂	68,9 % *
Teor de carbonato de cálcio – CaCO ₃	13,6 % *
Teor de hidróxido de magnésio – Mg(OH) ₂	2,3 % *
Teor de umidade	53,4 %

*base seca (105 °C)

Pode-se perceber, pelos resultados obtidos, que uma quantidade considerável de hidróxido de cálcio é perdida no momento do descarte dos insolúveis (carbonato de cálcio).

5.2.2 – Resultados das análises de lodo

O lodo utilizado apresentou as características constantes na tabela 5.6:

Tabela 5.6: Caracterização do lodo utilizado no experimento.

Parâmetros	Valores
pH	6,5
Teor de umidade	90,6 %

5.2.3 – Resultados das análises das mesclas de lodo com resíduo de cal

Foram realizados ensaios de pH e umidade das mesclas de lodo com resíduo de cal depositadas nos leitos, no início do experimento. Os resultados são apresentados na tabela 5.7.

O valor de pH inicial verificado no leito número seis destoa muito dos demais leitos (números quatro e cinco) que apresentam a mesma percentagem de resíduo de cal. No momento em que o experimento terminou, foi verificado que a mistura entre o lodo e o resíduo de cal neste leito não havia sido suficientemente homogeneizada, pois havia pequenos acúmulos de resíduo de cal no interior da massa desidratada. Por este motivo, os resultados de diferença de umidade para este leito não foram considerados e a média foi realizada apenas com os resultados dos leitos quatro e cinco.

Verificou-se que a mistura lodo com resíduo de cal apresentava forte odor característico das argamassas comumente utilizadas na construção civil. O odor permaneceu no ambiente mesmo depois de decorridos vários dias do término do experimento, quando já não havia mais resquício da mistura na sala.

A análise de variância a um fator para a diferença de umidade permite afirmar que existe diferença estatística ao nível de significância de 0,1 % entre os leitos, pois o valor de F calculado é maior do que o valor de F crítico a 0,1 %, conforme resultados apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.7: Ensaios realizados nas misturas presentes em cada leiteo.

Leitos	teor de resíduo de cal	pH inicial	umidade inicial	umidade final	diferença	média da diferença
1	0,0 %	6,5	90,6%	87,4%	3,2%	
2	0,0 %	6,5	90,6%	86,3%	4,3%	4,1 %
3	0,0 %	6,5	90,5%	85,8%	4,7%	
4	2,5 %	10,1	90,2%	82,5%	7,7%	
5	2,5 %	10,7	90,1%	82,5%	7,6%	7,7 %
6	2,5 %	8,7				
7	5,0 %	11,2	90,2%	81,7%	8,5%	
8	5,0 %	11,8	88,7%	80,5%	8,2%	8,0 %
9	5,0 %	12,0	87,5%	80,4%	7,2%	
10	7,5 %	12,4	86,4%	80,3%	6,0%	
11	7,5 %	12,3	86,9%	81,1%	5,8%	6,2 %
12	7,5 %	12,2	86,6%	80,0%	6,6%	
13	10,0 %	12,2	87,0%	80,1%	6,9%	
14	10,0 %	12,3	86,6%	80,0%	6,5%	6,1 %
15	10,0 %	12,7	84,4%	79,7%	4,8%	
16	100,0 %	12,8	54,6%	49,9%	4,6%	
17	100,0 %	12,8	52,9%	48,6%	4,3%	4,7 %
18	100,0 %	12,8	52,9%	47,6%	5,2%	

Tabela 5.8: Tabela ANOVA - umidade da mistura de lodo com resíduo de cal.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contag.</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0% de resíduo cal 3		12,302	4,101	0,60402
2,5% de resíduo cal 3		24,223	8,074	0,588204
5,0% de resíduo cal 3		23,845	7,948	0,48035
7,5% de resíduo cal 3		18,474	6,158	0,158952
10,0% de resíduo cal 3		18,154	6,051	1,287303

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crít (5%)</i>	<i>F crít (1%)</i>	<i>F crít (0,1%)</i>
Entre grupos	31,933	4	7,983	12,79848	3,4780498	5,9943659	11,2831913
Dentro dos grupos	6,2376	10	0,624				
Total	38,170	14					

O gráfico que relaciona o teor de resíduo de cal adicionado ao lodo com a diferença de umidade obtida entre o início e o final do experimento encontra-se ilustrado na figura 5.6:

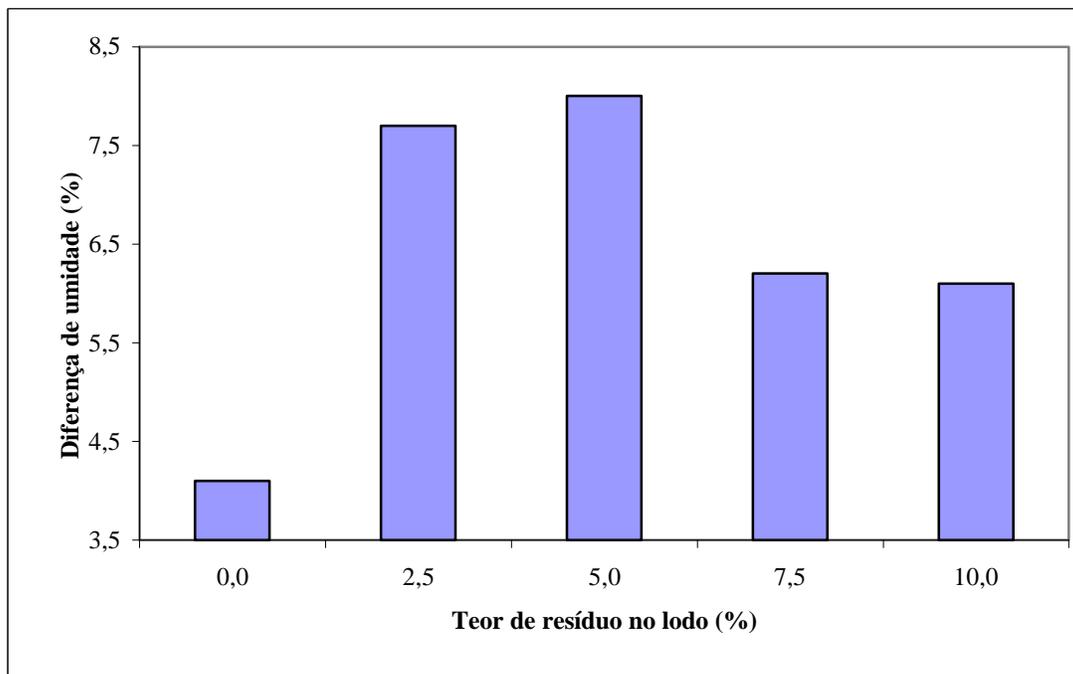


Figura 5.6: Teor de resíduo de cal *versus* percentual de redução de umidade obtido.

5.2.4 – Resultados das análises do percolado dos leitos

No percolado recolhido dos leitos, foram realizados ensaios de pH, turbidez e metais na amostra composta. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 5.9.

A turbidez média do percolado obtido nos leitos que continham apenas lodo é de 162 NTU. A adição de 2,5 % de resíduo de cal ao lodo produziu líquido percolado com turbidez média de 110 NTU, o que indica uma redução de 32 %. O percentual de redução da turbidez para o percolado dos leitos que continham 5,0 % de resíduo de cal, quando comparados ao percolado dos leitos que continham apenas lodo foi de 71 % (turbidez média de 47 NTU). Seguindo o mesmo procedimento, encontram-se os valores de 81 % de redução para os leitos com 7,5 % de resíduo de cal, e de 90 %, para os leitos com 10,0 % de resíduo de cal.

Tabela 5.9: Ensaios realizados no percolado dos leitos.

Leitos	teor de resíduo de cal	pH do percolado	turbidez do percolado (NTU)	Alumínio (mg/L)	Ferro (mg/L)	Cálcio (mg/L)	Magnésio (mg/L)
1	0,0 %	5,9	168	10,1	17,2	11,76	3,71
2	0,0 %	5,7	157	8,9	17,7	10,82	3,48
3	0,0 %	5,5	161	7,3	19,4	8,63	3,56
4	2,5 %	9,4	97	68,4	2,0	128,35	0,14
5	2,5 %	9,8	128	146,9	2,9	139,99	0,17
6	2,5 %	10,0	104	138,9	2,3	139,84	0,14
7	5,0 %	11,8	33	171,6	1,5	> 150,00	< 0,09
8	5,0 %	11,5	64	213,1	2,8	> 150,00	0,19
9	5,0 %	11,1	44	191,8	1,6	148,98	0,14
10	7,5 %	11,9	38	175,1	2,4	> 150,00	0,11
11	7,5 %	12,0	31	158,7	1,3	> 150,00	0,10
12	7,5 %	12,2	23	86,1	1,4	> 150,00	< 0,09
13	10,0 %	11,8	24	163,7	< 0,9	> 150,00	< 0,09
14	10,0 %	12,0	12,2	111,3	< 0,9	> 150,00	ND
15	10,0 %	12,2	12,2	37,4	0,9	> 150,00	< 0,09
16	100,0 %	12,6	*	0,2	ND	> 150,00	3,66
17	100,0 %	12,6	*	0,6	< 0,9	> 150,00	2,15
18	100,0 %	12,7	*	0,1	ND	> 150,00	2,71

*amostra de aspecto leitoso.

A análise de variância a um fator para a turbidez média do percolado dos leitos permite afirmar que há forte evidência de diferença estatística entre as amostras para os diferentes teores de cal, conforme pode ser verificado na tabela 5.10:

Tabela 5.10: ANOVA – turbidez do percolado da mistura de lodo com resíduo de cal.

RESUMO

Grupo	Contag.	Soma	Média	Variância
0,0% de resíduo cal	3	486	162	31
2,5% de resíduo cal	3	329	109,66	264,333
5,0% de resíduo cal	3	141	47	247
7,5% de resíduo cal	3	92	30,666	56,3333
10,0% de resídu cal	3	48,4	16,133	46,4133

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crít(5%)	F crít (1%)	F crít (0,1%)
Entre grupos	44902	4	11225,5	87,0086	3,47805	5,9943659	11,2831913
Dentro dos grupos	1290,16	10	129,016				
Total	46192,1	14					

Já os valores de alumínio presente no percolado (alumínio solúvel) aumentaram consideravelmente com a adição de resíduo de cal ao lodo, ultrapassando o limite estabelecido pela legislação estadual (Norma Técnica nº 01/89 da SSMA/RS), inviabilizando a disposição do percolado destes leitos diretamente nos corpos de água. Desta forma, procedeu-se a neutralização do percolado para modificar a solubilidade do metal.

Após proceder-se a neutralização do percolado para valores de pH entre 6,5 e 7,5 houve a formação de um precipitado gelatinoso, conforme ilustrado na figura 5.7. Análises de absorção atômica da fração líquida sobrenadante mostram que todo o alumínio inicialmente dissolvido em pH alcalino passa para a forma insolúvel em pH neutro, conforme ilustrado na tabela 5.11. Isso confirma os resultados apresentados pelo COMMITTEE REPORT – PART 2 (AWWA, 1978) e pelo diagrama de diagrama de estabilidade do alumínio, apresentado na figura 3.1 (GONÇALVES, 1997).

Tabela 5.11: Teores de alumínio antes e após a neutralização do percolado.

leitos	composição % de resíduo de cal	pH do percolado	alumínio solúvel (mg/L)	pH do percolado após ajuste c/ HCl	alumínio solúvel (mg/L)	% de redução no teor de alumínio
5	2,5%	9,8	146,9	6,7	24,7	83,2%
9	5,0%	11,1	191,8	7,4	< 1,0	100%
11	7,5%	12,0	158,7	7,2	< 1,0	100%
13	10,0%	11,8	163,7	6,8	< 1,0	100%



Figura 5.7: Aspecto do precipitado formado após a neutralização do percolado.

No percolado do leite cinco haviam se formado flocos gelatinosos no fundo do recipiente, porém, também foi observada a flotação de pequenos flocos. Talvez o tempo de repouso (24 horas) não tenha sido suficiente para a separação da fase insolúvel.

A tabela 5.12 apresenta os valores de F calculado e de F crítico a 0,1 % obtidos pela tabela ANOVA para os valores de alumínio solúvel no percolado dos leitos. Conforme pode ser visualizado, há diferença estatística a 1% de significância;

Tabela 5.12: Tabela ANOVA – alumínio solúvel no percolado da mistura de lodo com resíduo de cal.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contag.</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0% de resíduo cal 3	3	26,3	8,766	1,973333
2,5% de resíduo cal 3	3	354,2	118,0	1866,083
5,0% de resíduo cal 3	3	576,5	192,1	430,6633
7,5% de resíduo cal 3	3	419,9	139,9	2243,453
10,0% de resídu cal 3	3	312,4	104,1	4026,443

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crít (5%)</i>	<i>F crít (1%)</i>	<i>F crít (0,1%)</i>
Entre grupos	53888,1	4	13472	7,861268	3,4780498	5,9943659	11,2831913
Dentro dos grupos	17137,2	10	1713,72				
Total	71025,3	14					

É importante salientar que, no percolado dos leitos que continham cal, os valores de ferro e de manganês diminuíram abruptamente com a adição de resíduo de cal ao lodo, indicando que em pH mais alcalino, estes compostos encontram-se na forma insolúvel. Assim, no percolado destes leitos apenas o metal alumínio excedeu o limite da legislação estadual.

A neutralização do percolado exigiria a construção de unidades destinadas a este fim, com tubulações, bombas, decantadores, etc., além de gastos com produtos químicos; porém, se for considerado apenas os teores de alumínio, ferro, cálcio e manganês, o líquido percolado dos leitos que contém mais de 5,0 % de resíduo de cal pode, após a neutralização, ser lançados diretamente nos corpos receptores, pois não ultrapassa o limite estabelecido pela Norma Técnica estadual nº 01/89 da SSMA/RS.

A aparência do percolado dos leitos está apresentada na figura 5.8:

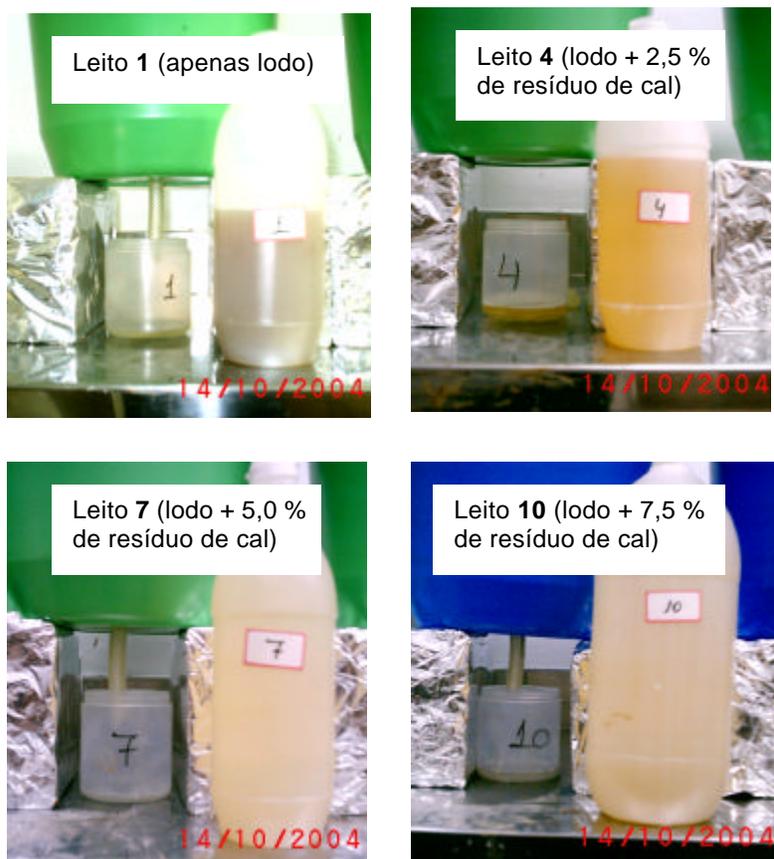


Figura 5.8: Aspecto do percolado do leito 1, leito 4, leito 7 e do leito 10.

A aparência da mistura depositada nos leitos quatro horas após o início do experimento pode ser visualizada na figura 5.9.

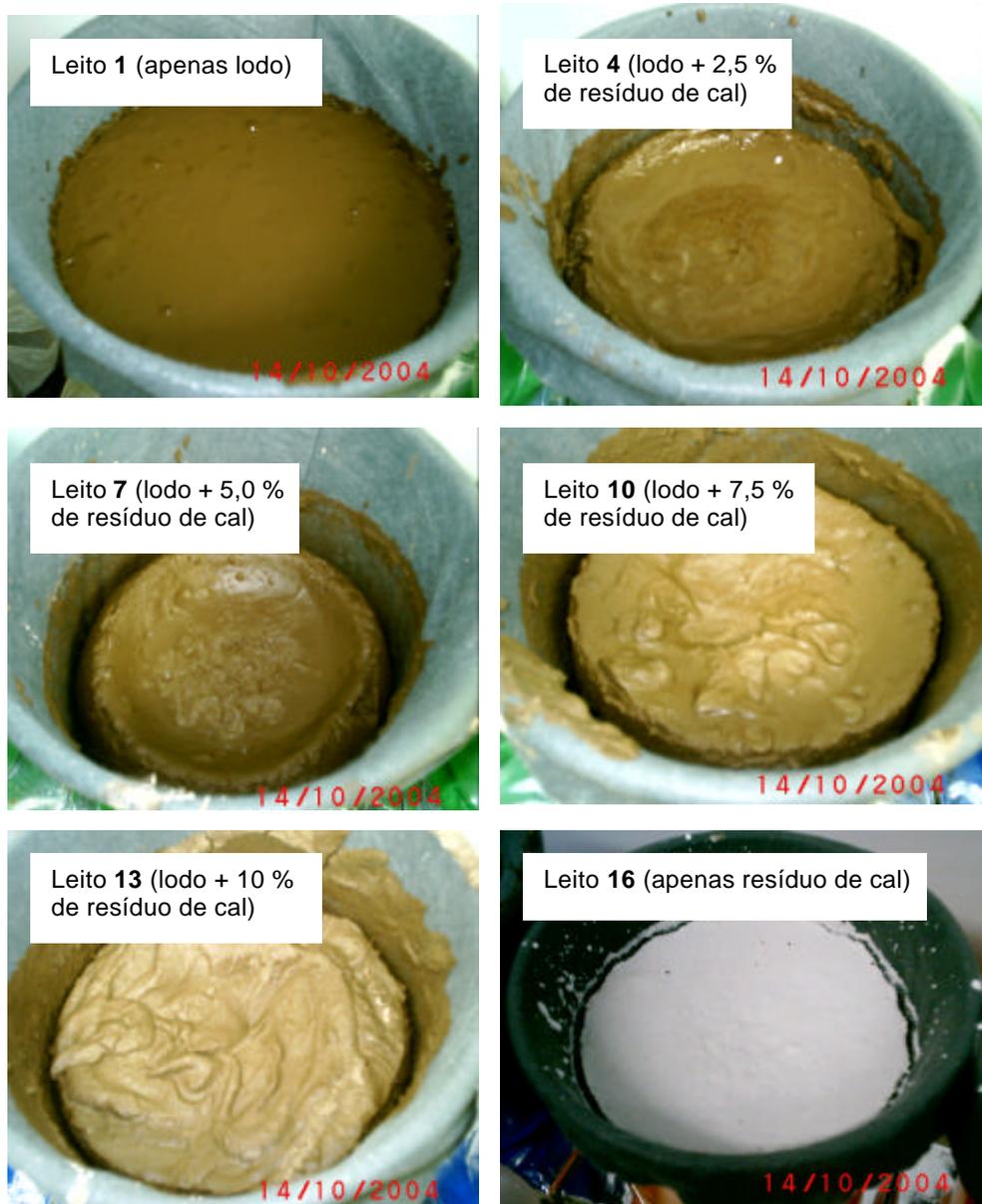


Figura 5.9: Aparência da mistura nos leitos quatro horas após o início do experimento

5.2.5 – Análise do volume de líquido percolado em função do tempo

Durante as 72 horas do experimento, foi monitorado o volume de líquido percolado em função do tempo, para cada leito. Antes de ser armazenado, o volume de líquido e o horário eram registrado em uma planilha. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.13 a 5.18.

Tabela 5.13: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 0,0 % de resíduo de cal.

Leito 1			Leito 2			Leito 3		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	35	35	10	71	71	10	105	105
20	170	205	20	55	126	20	76	181
30	43	248	30	57	183	30	36	217
40	24	272	40	28	211	40	0	217
50	26	298	50	31	242	50	64	281
70	49	347	60	28	270	50	23	304
90	44	391	80	50	320	80	61	365
122	38	429	100	46	366	100	51	416
173	84	513	120	38	404	124	52	468
242	93	606	168	80	484	166	86	554
329	96	702	238	98	582	236	121	675
500	165	867	324	100	682	322	128	803
1044	411	1278	496	180	862	494	225	1028
1461	188	1466	1039	411	1273	1041	517	1545
1910	270	1736	1456	188	1461	1455	287	1832
2667	369	2105	1905	270	1731	1907	290	2122
2778	47	2152	2662	369	2100	2660	415	2537
4415	541	2693	2773	47	2147	2771	36	2573
			4410	541	2688	4406	500	3073

Tabela 5.14: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 2,5 % de resíduo de cal.

Leito 4			Leito 5			Leito 6		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	276	276	10	533	533	10	500	500
20	163	439	20	193	726	20	253	753
30	105	544	30	210	936	30	263	1016
40	106	650	40	154	1090	34	185	1201
50	105	755	50	116	1206	44	150	1351
70	80	835	60	140	1346	54	165	1516
81	160	995	80	195	1541	74	188	1704
91	125	1120	99	132	1673	94	140	1844
112	69	1189	112	91	1764	115	162	2006
132	118	1307	130	110	1874	134	141	2147
159	130	1437	153	129	2003	148	88	2235
196	159	1596	191	174	2177	186	208	2443
229	141	1737	223	122	2299	218	137	2580
315	268	2005	310	253	2552	305	296	2876
502	417	2422	483	312	2864	490	398	3274
1036	582	3004	1032	442	3306	1028	443	3717
1448	230	3234	1443	192	3498	1438	148	3865
1900	174	3408	1894	147	3645	1889	107	3972
2654	204	3612	2648	177	3822	2645	119	4091
4398	238	3850	4391	196	4018	4384	104	4195

Tabela 5.15: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 5,0 % de resíduo de cal.

Leito 7			Leito 8			Leito 9		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1150	1150	10	906	906	10	605	605
20	540	1690	20	497	1403	20	300	905
30	387	2077	30	292	1695	30	258	1163
40	247	2324	40	206	1901	40	184	1347
60	211	2535	63	345	2246	53	180	1527
70	144	2679	68	70	2316	62	126	1653
90	225	2904	87	189	2505	83	215	1868
100	80	2984	99	97	2602	92	93	1961
110	124	3108	139	220	2822	134	277	2238
129	90	3198	170	116	2938	164	138	2376
142	49	3247	258	198	3136	252	243	2619
181	108	3355	431	188	3324	425	233	2852
212	60	3415	980	159	3483	975	229	3081
300	114	3529	1389	58	3541	1383	18	3099
474	118	3647	1841	49	3590	1834	69	3168
1023	117	3764	2597	51	3641	2590	75	3243
1883	30	3794						
2650	17	3811						

Tabela 5.16: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 7,5 % de resíduo de cal.

Leito 10			Leito 11			Leito 12		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	740	740	13	770	770	13	775	775
20	378	1118	23	373	1143	22	757	1532
30	280	1398	31	241	1384	31	227	1759
40	271	1669	41	167	1551	42	144	1903
61	240	1909	50	110	1661	56	123	2026
71	100	2009	60	89	1750	73	94	2120
89	115	2124	77	100	1850	97	87	2207
129	207	2331	101	122	1972	126	65	2272
158	90	2421	130	95	2067	217	104	2376
247	161	2582	220	151	2218	387	79	2455
420	138	2720	391	140	2358	937	82	2537
970	138	2858	942	40	2398	1344	28	2565
1377	38	2896	1349	22	2420	1795	29	2594
			1800	27	2447			

Tabela 5.17: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 10,0 % de resíduo de cal.

Leito 13			Leito 14			Leito 15		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	588	588	11	647	647	9	802	802
23	310	898	20	371	1018	20	327	1129
34	207	1105	28	165	1183	34	215	1344
43	105	1210	41	180	1363	66	200	1544
52	83	1293	71	231	1594	93	91	1635
63	72	1365	99	114	1708	186	100	1735
91	118	1483	191	162	1870	354	70	1805
120	77	1560	360	0	1870			
211	127	1687						
380	103	1790						

Tabela 5.18: Volumes de líquido percolado em função do tempo para os leitos com 100,0 % de resíduo de cal.

Leito 16			Leito 17			Leito 18		
tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)	tempo (min)	volume coletado (mL)	volume acumulado (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	337	35	10	198	244	10	244	244
20	182	217	20	121	365	20	126	370
30	120	337	30	105	470	30	83	453
40	94	431	40	61	531	40	66	519
50	73	504	50	41	572	50	54	573
60	57	561	60	55	627	60	41	614
70	56	617	70	52	679	70	46	660
90	76	693	90	42	721	90	56	716
110	77	770	110	49	770	110	45	761
130	47	817	130	48	818	130	37	798
160	65	882	220	47	865	220	59	857
230	51	933	387	45	910	379	55	912
391	36	969						
553	19	988						

Os dados de volume de percolado de cada leito em função do tempo geraram os gráficos apresentados nas figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

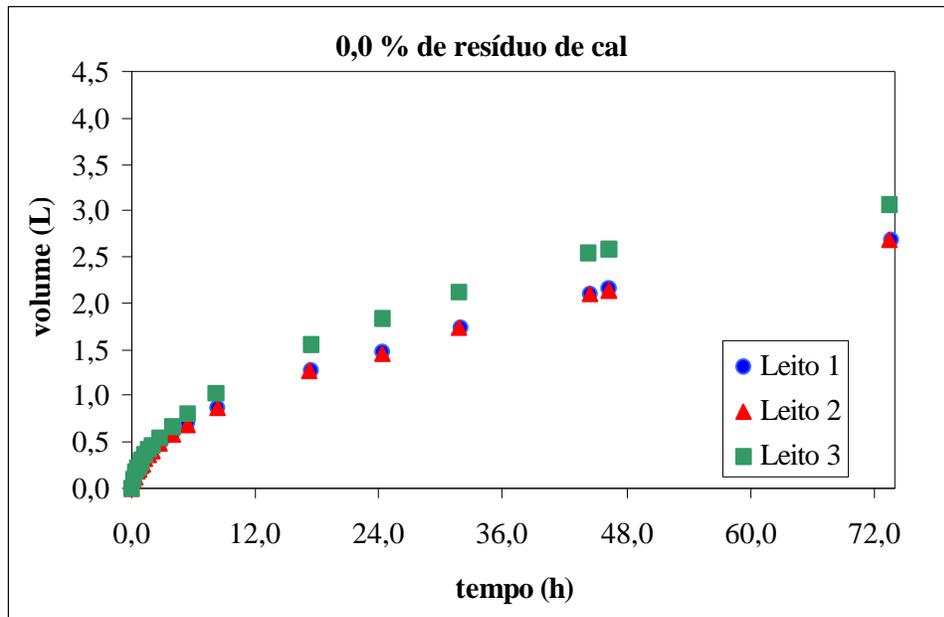


Figura 5.10: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham apenas lodo.

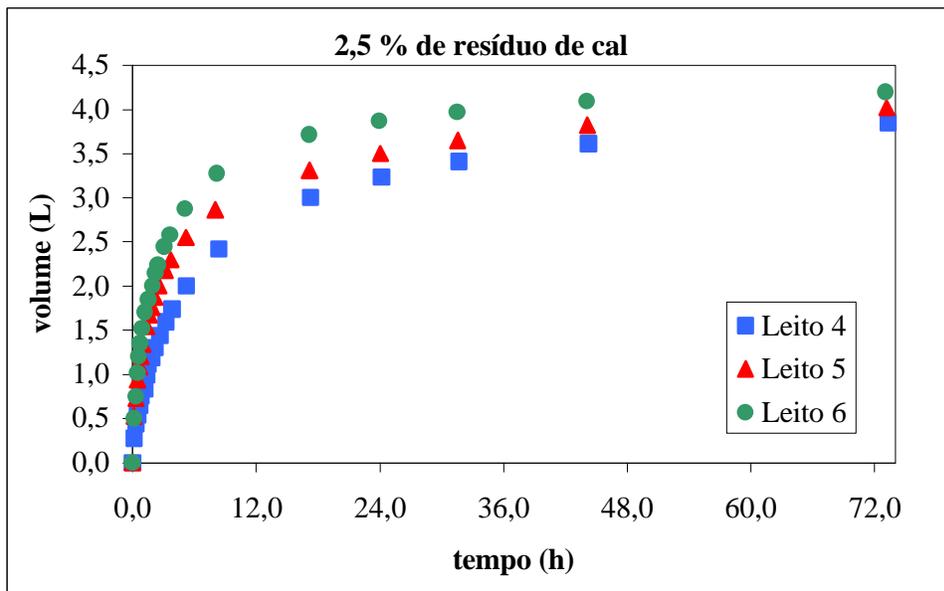


Figura 5.11: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 2,5 % de resíduo de cal.

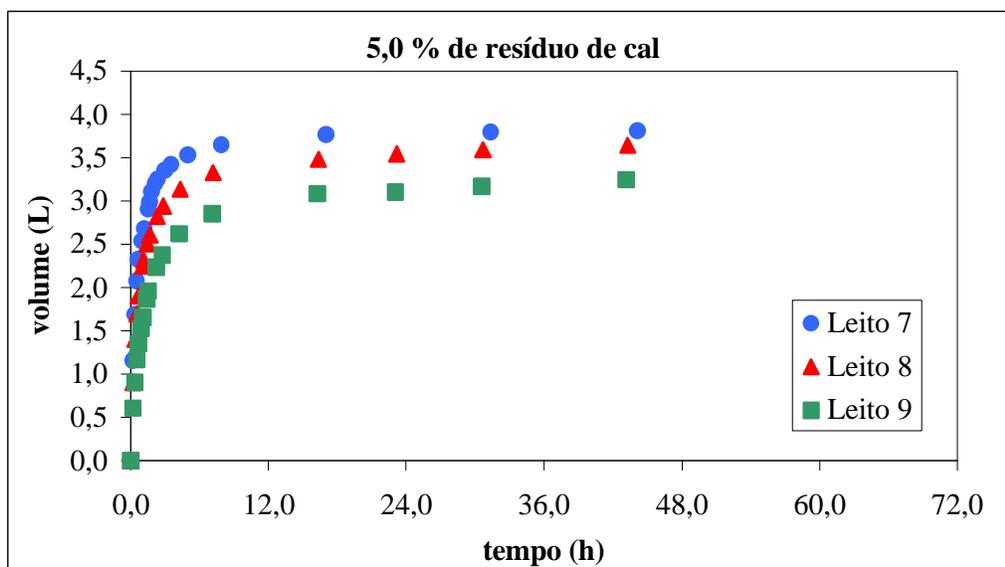


Figura 5.12: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 5,0 % de resíduo de cal.

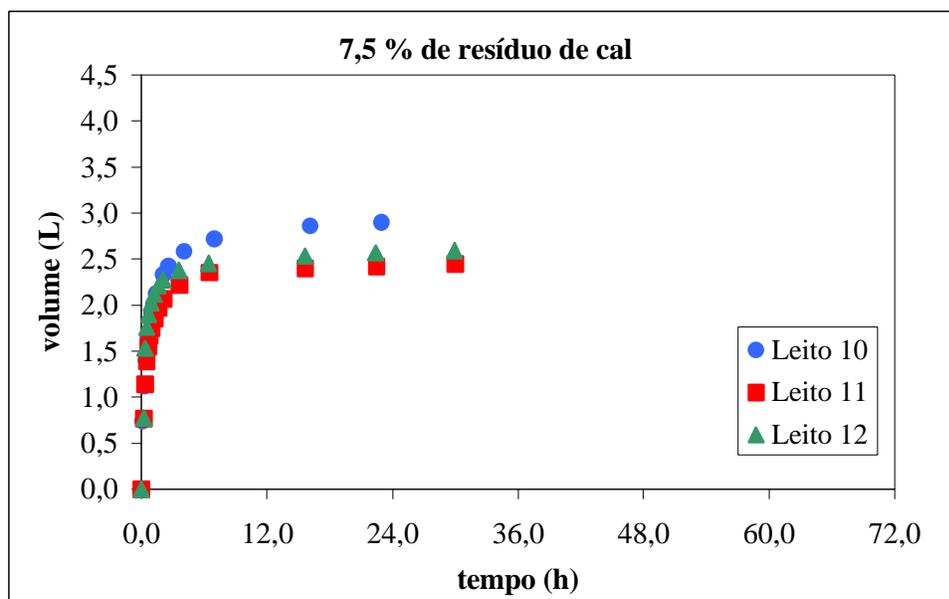


Figura 5.13: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 7,5 % de resíduo de cal.

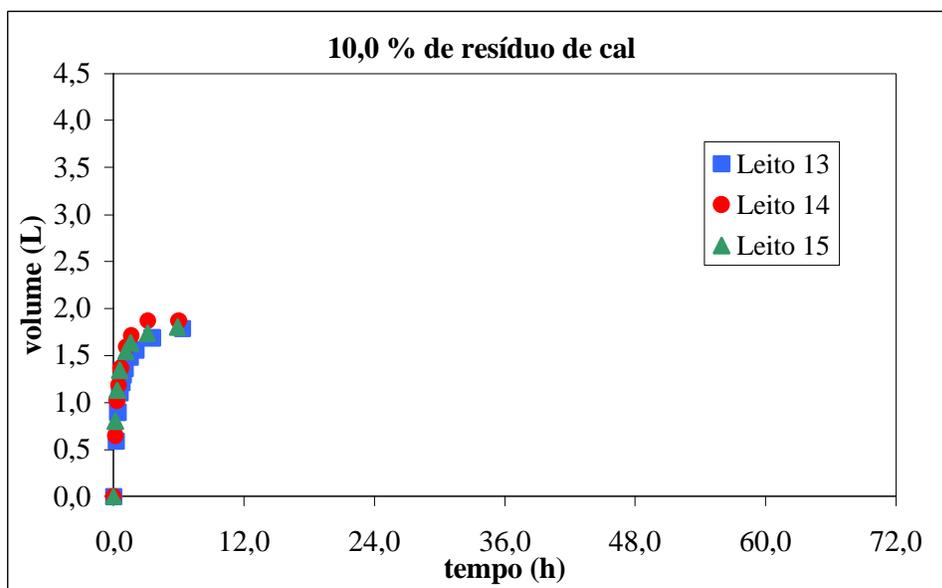


Figura 5.14: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham 10,0 % de resíduo de cal.

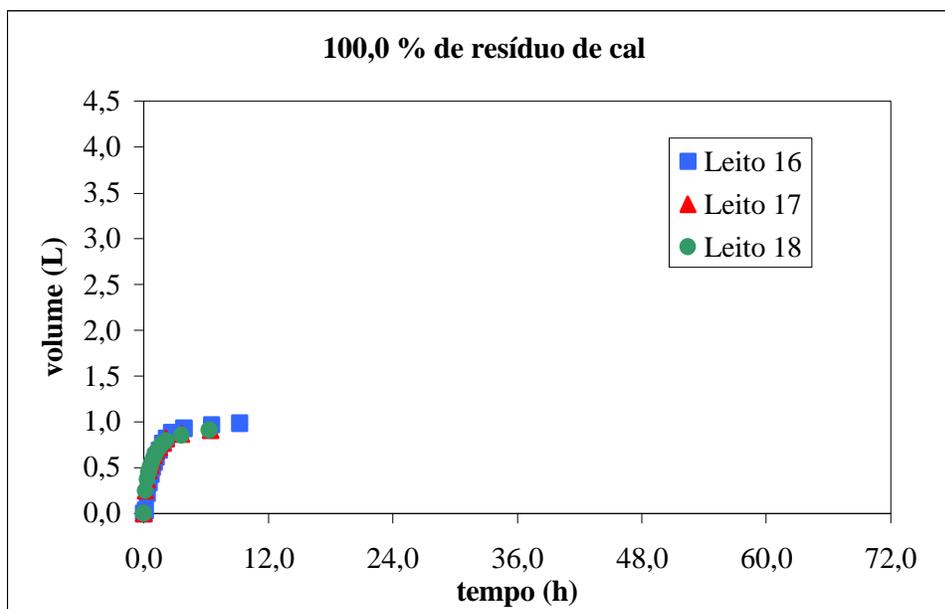


Figura 5.15: Volume de líquido percolado em função do tempo, para os leitos que continham apenas resíduo de cal.

A análise das figuras 5.10 a 5.15, que relacionam o volume de percolado em cada leito em função do tempo, permite as seguintes observações:

- 1) A curva do volume acumulado em função do tempo, para os leitos com mistura de cal, apresentou um platô, ou seja, um ponto a partir do qual a quantidade de líquido percolado cessava ou apresenta variação muito pequena;
- 2) O platô ocorreu quando aproximadamente 90 % do total de líquido percolado já havia sido coletado;
- 3) Os leitos que continham apenas lodo (figura 5.10) continuavam drenando líquido continuamente, mesmo depois de decorridas 72 horas do início do experimento (momento no qual o experimento foi dado por encerrado), chegando ao volume total de *quase três litros* de líquido percolado;
- 4) Os leitos que continham lodo com 2,5% de resíduo de cal (figura 5.11) drenaram um total de aproximadamente 4 L de líquido;
- 5) Os leitos que continham lodo com 5,0% de resíduo de cal (figura 5.12) drenaram um total de 3,6 L de líquido;
- 6) O platô apresentado na curva dos leitos que continham lodo com 7,5 % de resíduo de cal (figura 5.13) iniciou depois de decorridos aproximadamente quatro horas do início do experimento. O volume total drenado nestes leitos foi de aproximadamente 2,7 L;
- 7) Os leitos que continham lodo com 10,0% de resíduo de cal (figura 5.14) também apresentaram platô, o qual se deu aproximadamente duas horas após o início do experimento. O volume total de percolado foi da ordem de 1,8 L após seis horas do início do experimento;
- 8) Os leitos que continham apenas resíduo de cal (figura 5.15) drenaram um total de 0,9 L de líquido percolado e apresentaram platô aproximadamente duas horas após o início do experimento;

O platô nos apresentado nos leitos com mistura de cal (figuras 5.11 a 5.15) aconteceu em tempos distintos para os diferentes leitos.

- Leitos que continham apenas lodo não apresentaram platô. Considerando o volume total de líquido coletado (*quase três litros*), os leitos levaram aproximadamente **60 horas** para drenar 90 % deste total;
- Leitos que continham lodo com 2,5% de resíduo de cal levaram aproximadamente **32 horas** para atingirem o platô, ou seja, quase a metade do tempo gasto, se comparado aos leitos que não continham resíduo de cal;
- Leitos que continham lodo com 5,0% de resíduo de cal levaram aproximadamente **seis horas** para atingirem o platô, ou seja, quase 10% do tempo gasto pelos leitos que não continham resíduo de cal;
- Leitos que continham lodo com 7,5% de resíduo de cal levaram aproximadamente **quatro horas** para atingirem o platô, ou seja, quase 7% do tempo gasto pelos leitos que não continham resíduo de cal;
- Leitos que continham lodo com 10,0% de resíduo de cal levaram aproximadamente **1,5 hora** para atingirem o platô, ou seja, quase 3% do tempo gasto pelos leitos que não continham resíduo de cal;
- Leitos que continham apenas resíduo de cal levaram aproximadamente de **2,5 horas** para atingirem o platô, ou seja, drenar 90 % do total de líquido coletado;

Analisando-se a quantidade total de água presente no lodo (teor de umidade) e considerando-se a densidade do líquido percolado igual à densidade da água, percebe-se que nem toda a água presente nos leitos apresentava-se na forma possível de ser drenada. Por exemplo, os leitos que continham lodo com 10,0 % de cal, apresentaram teor de umidade inicial na ordem de 86 %, ou seja, dos 10 kg de mistura depositadas nos leitos, 8,6 kg eram de água; porém, deste total apenas 1,8 kg foram drenados, o que sugere que apenas 21% da água presente no lodo era passível de drenagem. Raciocínio análogo conduz aos resultados ilustrados na tabela 5.19:

Tabela 5.19: quantidade de água passível de ser drenada presente nos leitos

teor de resíduo de cal	massa total de água presente	massa de água drenada*	teor de água passível de drenagem
0,0 %	9,05 kg	2,7** kg	30 %
2,5 %	9,03 kg	4,0 kg	45 %
5,0 %	8,9 kg	3,6 kg	40 %
7,5 %	8,7 kg	2,9 kg	33 %
10,0 %	8,6 kg	1,8 kg	21 %
100,0 %	5,3 kg	0,9 kg	17 %

* considerando-se a densidade do líquido drenado igual a 1,00.

** massa drenada até o término do experimento

Salienta-se que nos leitos que continham apenas lodo o experimento foi encerrado sem que a curva de volume acumulado em função do tempo tenha atingido um platô. Isso significa que, mesmo depois de decorridas 72 horas do início do experimento, não chegou a ser coletado todo o volume de água passível de ser drenada contida nestes leitos.

A análise dos dados da tabela 5.19 sugere que a adição do resíduo de cal ao lodo possibilitou a formação de compostos que “aprisionaram” a água entre suas moléculas.

5.2.6 - Resultados da análise de fluorescência de raio X

A composição química da mistura sólida, remanescente nos leitos após o término do experimento, foi realizada por espectrometria de fluorescência de raio X. Os resultados encontram-se ilustrados na tabela 5.20:

Tabela 5.20: Resultados de fluorescência de RX

Amostra	Lodo sem cal	Lodo c/ 2,5% cal	Lodo c/ 5,0 % cal	Lodo c/ 7,5% cal	Lodo c/ 10 % cal	Matéria-prima do cimento*
SiO ₂ (%)	37,28	33,24	26,67	24,30	21,13	17 – 25
Al ₂ O ₃ (%)	25,63	22,62	18,31	16,00	13,97	3 - 8
TiO ₂ (%)	0,84	0,72	0,51	0,47	0,39	-
Fe ₂ O ₃ (%)	9,97	8,14	6,47	5,10	4,13	0,5 – 6,0
MnO (%)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	-
MgO (%)	0,74	1,05	1,49	1,65	1,91	0,1 - 6
CaO (%)	0,29	8,62	18,44	22,82	29,51	60 - 67
Na ₂ O (%)	0,09	0,07	0,00	0,02	0,02	0,5 – 1,3
K ₂ O (%)	0,70	0,64	0,52	0,51	0,46	0,5 – 1,3
P ₂ O ₅ (%)	0,75	0,71	0,65	0,61	0,58	-
P. F. (%)	25,14	25,14	27,39	27,98	28,78	-

*Segundo TORRES, 1941.

Conforme pode ser observado, os valores de óxido de silício (SiO₂) decrescem à medida que aumenta o percentual de resíduo de cal adicionado ao lodo. O contrário ocorre com os valores de óxido de cálcio (CaO). É importante salientar que o cálcio aparece na forma de óxido e não de hidróxido ou de carbonato, devido à calcinação à qual é submetida a amostra durante a realização da análise de fluorescência de RX (1.000 °C).

Os elementos encontrados na mistura sólida remanescente nos leitos são os mesmos presentes na matéria-prima do cimento, variando apenas em composição percentual. Isso sugere que esta massa sólida pode ser empregada na indústria, substituindo, em parte, a matéria-prima empregada na fabricação de cimentos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 – Conclusões

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa, permitem emitir as seguintes conclusões:

1. É necessário um prévio adensamento no lodo da ETA São João para que o mesmo seja depositado em leitos de secagem. Um tanque de sedimentação bastaria para adensar o lodo. O líquido sobrenadante poderia ser encaminhado para o início do processo de tratamento de água, enquanto que os sólidos presentes no fundo poderiam ser encaminhados para os leitos de secagem. Pelo observado durante o experimento, o lodo da ETA São João pode ser considerado condicionado, pois a ETA utiliza polieletrólito não iônico como agente secundário de coagulação e tal material parece atuar também no lodo, favorecendo sua desidratação;
2. Não foi observada diferença entre os resultados apresentados pelos leitos de secagem convencionais e modificados, em todas as etapas dos experimentos realizados, tanto para o lodo da ETA José Loureiro da Silva quanto para o lodo da ETA São João;
3. A adição de resíduo de cal ao lodo favoreceu a rápida desidratação do mesmo. Para leitos com 10,0 % de resíduo de cal o tempo gasto para drenar 90 % do total de água coletada (1,5 horas) foi 40 vezes menor se comparado ao tempo gasto pelos leitos que não continham cal (60 horas);
4. Os leitos com 5,0 % de resíduo de cal apresentam uma melhor relação entre a quantidade de líquido drenada e a velocidade de drenagem de líquido;
5. Verificou-se que, quanto maior o percentual de resíduo de cal adicionado ao lodo, maior a velocidade com que a água presente na mistura era drenada. Leitos com 2,5 % de resíduo de cal levaram 32 horas para atingirem o platô (ponto no qual 90 % do total de líquido percolado já havia sido coletado) ao passo que os leitos com 10,0 % de resíduo de cal atingiram o platô em apenas uma 1,5 hora;
6. Por outro lado, observou-se que quanto maior a percentagem de resíduo de cal adicionado ao lodo, menor era o volume de líquido percolado. Os leitos que continham lodo com 2,5 % de resíduo de cal drenaram quatro litros de líquido (45 % do total de água presente na mistura) ao passo que os leitos com 10,0 % de resíduo de cal

drenaram menos de dois litros de líquido (21 % do total de água presente na mistura), ou seja, apesar dos leitos com maior teor de resíduo de cal drenarem a água mais rapidamente, o volume de água drenado é menor, de modo que a umidade final da fração sólida é maior;

7. Nem toda água presente nos leitos encontrava-se na forma passível de ser drenada. Quanto maior a adição de resíduo de cal ao lodo, menor era o volume de líquido coletado, o que indica a formação de compostos que “aprisionam” água. Essa observação também foi confirmada pela diferença de umidade inicial e final nos leitos. Leitos com 5,0 % de resíduo de cal apresentaram uma diferença de umidade em torno de 8 % ao passo nos leitos com 10,0 % de resíduo de cal a diferença de umidade observada foi de aproximadamente 6 %;
8. A turbidez do percolado dos leitos que continham cal diminuía com o aumento da percentagem de cal adicionada. A diferença foi maior para o percolado dos leitos com 5,0 % de resíduo de cal (71 % de redução de turbidez);
9. Os valores de alumínio presente no líquido percolado (alumínio solúvel) aumentaram consideravelmente com a adição de resíduo de cal ao lodo;
10. Os valores de ferro e de manganês presente no líquido percolado diminuíram abruptamente com a adição de resíduo de cal ao lodo, indicando que em pH mais alcalino estes compostos encontram-se na forma insolúvel;
11. A neutralização do percolado dos leitos que solubilizaram alumínio para a faixa de pH entre 6,5 e 7,5 tornou o metal insolúvel, formando um precipitado gelatinoso;
12. Se considerados apenas os teores de alumínio, ferro, cálcio e manganês, o líquido percolado dos leitos que contém mais de 5,0 % de resíduo de cal podem, após a neutralização, ser lançados diretamente nos corpos receptores, pois não ultrapassam o limite estabelecida pela Norma Técnica estadual nº 01/89 da SSMA/RS.
13. A fração sólida desidratada resultante do condicionamento do lodo com resíduo de cal apresenta composição química qualitativa semelhante à matéria-prima empregada na fabricação do cimento, variando apenas em composição percentual. Isso permite que esta fração sólida seja co-processada na indústria cimenteira, substituindo, em parte, a matéria-prima empregada na fabricação de cimentos.

14. O lodo dos decantadores, ainda que não venha a ser acondicionado com lodo de cal, apresenta composição química qualitativa semelhante à matéria prima empregada na indústria cimenteira. Para que o transporte do lodo às indústrias de cimento seja viável, caracterizando o uso de resíduo como matéria prima, o teor de umidade do resíduo deve ser adequado.
15. Através do condicionamento químico com resíduo de cal consegue-se transformar dois tipos de resíduos sólidos produzidos em ETAs (e até então cada um deles tem disposição final problemática) em matéria prima para um processo industrial.

6.2 - Recomendações

As conclusões finais deste estudo sugerem as seguintes recomendações:

1. Avaliar se o alto pH da mistura não solubiliza outros compostos que possam estar presentes no lodo, como, por exemplo, metais pesados;
2. Avaliar a viabilidade econômica do condicionamento de lodos de ETAs com resíduo de cal, bem como desidratar a mistura utilizando-se centrífugas ao invés de leitos de secagem. O possível emprego de centrífugas resultou de estudos que vem sendo desenvolvidos nos últimos anos pelo DMAE e que culminaram com a breve instalação de uma centrífuga a ser usada em caráter experimental na desidratação de lodos.
3. Como foi observado, o lodo da ETA São João adensa com facilidade (o que favorece sua desidratação), talvez porque a operação desta ETA utiliza polieletrólito não iônico como auxiliar de floculação. Assim, recomenda-se avaliar o efeito da mistura de lodos das ETAs São João com os da ETA José Loureiro da Silva, a fim de avaliar o comportamento da mistura destes lodos frente à desidratação.
4. Realizar testes piloto nas indústrias cimenteiras para confirmar, em escala real, a viabilidade de incorporação da mistura de lodo com resíduo de cal ao cimento, bem como de lodo sem resíduo de cal já que a composição química de ambos (principalmente pelos teores de alumínio e cálcio) apresenta excelente potencial de aplicação na composição dos módulos químicos da farinha crua para forno de clinquerização.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOY, N. (1999). **Secagem Natural e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Porto Alegre, 97 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APHA, AWWA and WPCF (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19ª edição. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington.

ANDREOLI, C. V., (2001) **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. ABES, Rio de Janeiro, Projeto PROSAB 2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995) **Cal Virgem e Cal Hidratada para Tratamento de Água para Abastecimento Público – NBR 10790**. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004) **Resíduos Sólidos: Classificação – NBR 10.004**. Rio de Janeiro: ABNT.

AWWA Sludge Disposal Committee, (1978) **Water Treatmentplant Sludges – an update of the state of the art ; COMMITTEE REPORT: PART 2**, Journal American Water Works Association, v. 70, n. 10, p. 548-554.

BACHE, D. H., PAPAVALOPOULOS, E. N. (2003) **Dewatering of Alumino-humic Sludge: Impacts of Hydroxide**. Water Research, vol 37, pp 3289-3298.

BASILIO, F. A. (1983) **Cimento Portland. Estudo Técnico**. 5ª ed. São Paulo, ABCP.

BERKTAY, A. (1998) **Properties of Sludge Produced From the Pressurized Wastewater Treatment Process**. Journal of Engineering and Environmental Science, n. 22, pp 377-385.

BRAGA, W. M., GONÇALVES, R. F., (2003) **Relação entre a Reologia dos Filtrados e a Resistência Específica à Filtração de Lodos de ETE's Condicionados com Polímeros**. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Joinville – SC.

BRASIL, Leis (2005). **Resolução CONAMA n°357/2005**. Classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional.

BIDONE, F. R. A., CASTRO, C. M. B., ABOY, N. (1997) **Monitoramento de Parâmetros Físico/químicos de Lodos de ETAs Durante a sua Desidratação em Leitos de Secagem com Diferentes Espessuras de Leito Drenante**. In: IXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Foz do Iguaçu – PR.

CASTRO, A. A., DIAS, A.M.V. (1997) **Soluções para o Tratamento de Resíduos de Estação de Tratamento de Água - Proposta para a Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) do Rio das Velhas na RMBH**. In: IXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Foz do Iguaçu - PR

CARVALHO, E. H., BERNARDO, L., (1999) **Interferência dos Despejos de Estações de Tratamento de Água nas Estações de Tratamento de Esgoto**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Rio de Janeiro-RJ.

CORDEIRO, J. S., (1999) **Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs**. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água. Rio de Janeiro/ABES/PROSAB. p 001-019.

CORDEIRO, J. S. (2001) **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/ ABES / PROSAB 2. p. 121 – 142.

DI BERNARDO, L., CARVALHO, E.H. SCALIZE, P. S., (1999) **Disposição de Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs**. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água*. Rio de Janeiro/ABES/PROSAB. p 169-201.

EPAL – Empresa Portuguesa de Águas Livres (2004) pesquisa eletrônica através do site www.epal.pt/Publicacoes/Outras/EPAL.pdf acesso em 03/03/2005.

FOUST, A. S. (1982) **Princípios das Operações Unitárias**. 2^o edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 670 p.

GONÇALVES, F. R. (1997) **Influência dos Mecanismos de Coagulação da Água Bruta na Reciclagem de Coagulantes em Lodos de Estações de Tratamento de Água**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Foz do Iguaçu - PR

GONÇALVES, F. R., BRANDÃO, J. T., BARRETO, E. M. S., (1999) **Viabilidade Econômica da Regeneração do Sulfato de Alumínio de Lodos de Estações de Tratamento de Águas**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Rio de Janeiro – RJ.

HOPPEN, C., PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. (2003) **Estudo de Incorporação do Lodo Centrifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna em Matrizes de Concreto, com Dosagem de 3%**. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Joinville – SC.

IDE, C. N. (1994) **Eficiência da Estabilização de Lodos de ETEs com Cal e Ferrato (IV) de Potássio**. Porto Alegre-RS. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KAGGWA, R.C., MULALELO, C. I., DENNY, P., OKURUT, T. O. (2001). **The Impact of Alum Discharges on a Natural Tropical Wetland in Uganda**, *Water Research*, vol 35, n. 3, pp 795-807.

KAZMIERCZAK, C. S. (1989) **Desempenho de Alvenarias de Materiais Cerâmicos à Penetração da Água da Chuva – uma Análises de Fatores Condicionantes**. Porto Alegre, 127 p. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEE, J.D., (1996) **Química Inorgânica não tão Concisa**. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 4º edição.

LERSCH, E. C., ROSSI, R., BARRADAS J. L. D., TOMATIS P. P. (1992) **Estudo do Tratamento e Disposição dos Lodos de Sulfato de Alumínio – Relatório Final da Comissão de Lodos - DMAE**.

MELO, A. A., LOVO, E., BUENO, R. C. R., NAPOLITANO, V. P. O., (2003) **Impactos do Recebimento de Lodo de ETA em uma ETE**, In: XXII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Joinville, SC.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (1998). Lei da Vida – A Lei dos Crimes Ambientais: lei 9.605, Brasília, DF.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (2004), **Portaria 518 – Padrões de Potabilidade da Água**.

OHLWEILER, O.A., (1982) **Química Analítica Quantitativa**, Livros Técnicos e Científicos Editora, vol 1, 30 edição, Rio de Janeiro.

PAN, J. R., HUANG, C., CHUANG, Y.C., WU, C. C., (1999) **Dewatering Characteristics of Algae-containing Alum Sludge**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, pp 185-190.

PAN, J. R., HUANG, C., CHERNG, M., LI, K., LIN, C., (2003) **Correlation Between Dewatering Index and Dewatering Performance of three Mechanical Dewatering Devices**. Advances in Environmental Research, v. 7 issue 3, pp 599-602.

PERRY, R. H., CHILTON, C.H., (1980) **Manual de Engenharia Química**, 5º edição, Rio de Janeiro, Guanabara Dois Editora.

PORTO ALEGRE, (1998) **Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE): Plano Diretor de Qualidade de Água (PDQA)**. Porto Alegre.

REALI, M.A.P., (1999) **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**, ABES, Rio de Janeiro, Projeto PROSAB.

REVISTA ELETRÔNICA ÁGUA E CIDADANIA – edição especial (dezembro 2004), pág. 27 e 28. www.sanasa.com.br acessado em 03/03/2005.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Saúde e do Meio Ambiente. Portaria n° 05/89-SSMA - Norma Técnica estadual n° 01/89.

SANTOS, I.S.S., RAMIRES, M. V. V., KAZMIERCZAK, C. S., SILVA, H. C., KERN, A. P., CAMARGO, S. A. (1993) **Caracterização e Identificação do Resíduo: Lodo da Estação de Tratamento do Município de São Leopoldo**, In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Natal-RN.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. (2001) **Imobilização da Fase Sólida de Lodo 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 / PROSAB 2 p. 245 – 257.

SHREVE, R. N., BRINK Jr., J. A. (1977) **Indústrias de Processos Químicos**, 4ª ed., Rio de Janeiro, editora Guanabara, 717 p.

SILVA, A.P. (1999) **Simulação da Codisposição de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Aterros Sanitários**. Porto Alegre, 101 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STAUBER, J. L., FLORENCE, T. M., DAVIES, C. M., ADAMS, M. S., BUCHANAN, S. J. (1999) **Bioavailability of Al in Alum-treated Drinking Water**, Journal American Water Works Association, v 91, n. 11, p 84-93.

THOMPSON, P. L., PAULSON, W. L., (1998) **Dewaterability of Alum and Ferric Coagulation Sludges**, Journal American Water Works Association, v 90, n.4, p 164-170.

TORRES, A. F., (1941) **Constituição Química do Cimento Portland**, São Paulo.

TURCHIULI, C., FARGUES, C. (2004) **Influence of Structural Properties of Alum and Ferric Floccs on Sludge Dewaterability**, Chemical Engineering Journal, v 103, issue 1-3, p123-131.

VERÇOZA, E. J., (1987) **Impermeabilização na Construção**. Editora Sagra, 2ª edição, Porto Alegre, 151p.

WEBER, W. J., (1972) **Physicochemical Processes for Water Quality Control**, Wiley-Interscience, New York.

WESTPHAL, P. A., CHRISTENSEN, G. L., (1983) **Lime Stabilization: Effectiveness of two Process Modification**. Journal WPCF (Water Pollution Control Federation), v. 55, n.11.

WU, C. C., WU, J. J., HUANG, R. Y., (2003) **Floc Strength and Dewatering Efficiency of Alum Sludge**, Advances in Environmental Research, vol. 7, issue 3, p 617-621.

ZHAO, Y. Q., (2002) **Enhancement of Alum Sludge Dewatering Capacity by using Gypsum as Skeleton Builder**, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 211, p 205-212.