

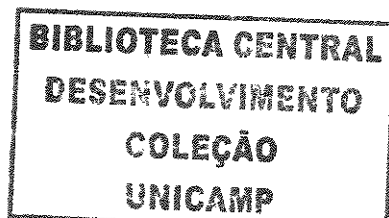
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

200604735

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO  
DE RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
EM INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA:  
ESTUDO DE CASO**

**Patrícia de Souza Andrade**

Campinas, SP  
2005



# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ERRATA:

1) Pág. 87 – Onde lê-se “Foram realizadas sete caracterizações da massa bruta do lodo, segundo a NBR 10004 (BRASIL, 1987a), seis determinações de compostos orgânicos voláteis e seis determinações microbiológicas” substituir por: Foram realizadas seis caracterizações da massa bruta do lodo, segundo a NBR 10004 (BRASIL, 1987a), cinco determinações de compostos orgânicos voláteis e cinco determinações microbiológicas.

2) Págs. 88 e 89

a) Tabela 21 deve ser substituída pela tabela seguinte:

| PARÂMETROS                          | UNIDADE | VARIAÇÃO       | RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA <sup>(1)</sup> |
|-------------------------------------|---------|----------------|--|
| Arsênio                             | mg/kg   | <1,00 - 20,70  | 10 - 20  |
| Bário                               | mg/kg   | 76,3           | -  |
| Berílio                             | mg/kg   | <1,00 - <1,95  | -  |
| Cádmio                              | mg/kg   | <1,10          | 0,06 - 1,20                                    |
| Carbono Orgânico Total              | %(m/m)  | 1,83 - 4,70    | 7,72   |
| Chumbo                              | mg/kg   | 4,42 - 103,00  | 6,4 - 54                                       |
| Cianeto                             | mg/kg   | <0,17 - <1,00  | -  |
| Cloretos                            | mg/kg   | <7,00 - 474,00 | -  |
| Cobre                               | mg/kg   | 16,00          | <10,0 - 110                                    |
| Compostos Organo-Halogenados (TOX)  | %       | <0,05          | -  |
| Cromo Hexavalente                   | mg/kg   | <1,00 - 1,11   | -  |
| Cromo Total                         | mg/kg   | 5,88 - 72,50   | <5,8 - 82,3                                    |
| Fenol                               | mg/kg   | <0,50 - <2,97  | -  |
| Mercúrio                            | mg/kg   | <0,25 - <1,00  | 0,01 - 0,46                                    |
| Níquel                              | mg/kg   | <1,99          | 3,4 - 90,0                                     |
| Óleos e Graxas                      | %       | <0,05 - 0,09   | -  |
| Selênio                             | mg/kg   | <1,00 - <7,75  | -  |
| Surfactantes                        | mg/kg   | <0,50 - 0,96   | -  |
| Vanádio                             | mg/kg   | 7,49 - <328    | -  |
| Zinco                               | mg/kg   | 24,50          | 31,5 - 296                                     |
| Hidrocarbonetos Líquidos/Bombeáveis | %       | <0,05          | -  |
| pH                                  | UpH     | 6,5 - 7,9      | 5,0 - 10,6                                     |
| Umidade                             | %       | 74,80 - 84,60  | 81,50 - 99,94                                  |
| Líquidos Livres                     | mL/100g | Ausente        | -  |
| <b>Compostos Orgânicos Voláteis</b> |         |                |  |
| Clorometano                         | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Cloreto de Vinila                   | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Bromometano                         | mg/kg   | <0,05          | -  |
| 1,1-Dicloroetano                    | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Cloreto de metileno                 | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Disulfeto de Carbono                | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Trans-1,2-Dicloroetano              | mg/kg   | <0,05          | -  |
| 1,1-Dicloroetano                    | mg/kg   | <0,05          | -  |
| 2-Butanona                          | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Cis-1,2-Dicloroetano                | mg/kg   | <0,05          | -  |
| Clorofórmio                         | mg/kg   | <0,05          | -  |

| PARÂMETROS   | UNIDADE | VARIAÇÃO | RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA <sup>(1)</sup> |
|--|---------|----------|--|
| <b>Compostos Orgânicos Voláteis</b>  |         |          |  |
| <b>1,1,1-Tricloroetano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>1,2-Dicloroetano</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Tetracloroeto de carbono</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Benzeno</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Tricloroetano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>1,2-Dicloropropano</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Bromodichlorometano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Cis-1,3-Dicloropropeno</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Tolueno</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>1,1,2-Tricloroetano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Tetracloroetano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Dibromoclorometano</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Clorobenzeno</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Etilbenzeno</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>m,p-Xilenos</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>o-Xileno</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Estireno</b>  | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>Bromofórmio</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| <b>1,1,2,2-Tetracloroetano</b>   | mg/kg   | <0,05    | -  |
| LEGENDA:   |         |          |  |
| <sup>(1)</sup> CORDEIRO; 1993; HORTH <i>et al.</i> ; 1994; BARBOSA; 2000; BARROSO <i>et al.</i> ; 2001; HUANG <i>et al.</i> ; 2001; RICHTER; 2001; PAULSRUD <i>et al.</i> ; 2002; GODBOLD <i>et al.</i> ; 2003 |         |          |  |

b) Tabela 22 deve ser substituída pela tabela seguinte:

| PARÂMETROS                | UNIDADE | VARIAÇÃO |
|---------------------------|---------|----------|
| <b>Coliformes Totais</b>  | NMP/g   | 3 – 372  |
| <b>Coliformes Fecais</b>  | NMP/g   | <1 – 10  |
| <i>Giardia sp</i>         | -       | Negativo |
| <i>Cryptosporidium sp</i> | -       | Negativo |



3) Pág. 124: Tabela 48 deve ser substituída pela tabela seguinte:

| <b>PARÂMETROS</b>                    | <b>V.M.P.</b> | <b>VARIAÇÃO<br/>(mg/L)</b> |
|--------------------------------------|---------------|----------------------------|
| <b>Arsênio</b>                       | 5,0           | <0,05                      |
| <b>Bário</b>                         | 100,0         | <0,10 - 0,60               |
| <b>Cádmio</b>                        | 0,5           | <0,05                      |
| <b>Chumbo</b>                        | 5,0           | <0,05 - 1,45               |
| <b>Cobre</b>                         | -             | <0,01                      |
| <b>Cromo Total</b>                   | 5,0           | <0,05                      |
| <b>Fluoreto</b>                      | 150,0         | 0,52 - 1,71                |
| <b>Mercúrio</b>                      | 0,1           | <0,05                      |
| <b>Níquel</b>                        | -             | <0,01                      |
| <b>Prata</b>                         | 5,0           | <0,05                      |
| <b>Selênio</b>                       | 1,0           | <0,05                      |
| <b>Vanádio</b>                       | -             | <1,70                      |
| <b>Zinco</b>                         | -             | 0,05                       |
| <b>Fenóis</b>                        | -             | <0,001                     |
| <b>Aldrin</b>                        | 0,003         | <0,001                     |
| <b>Clordano</b>                      | 0,03          | <0,01                      |
| <b>DDT</b>                           | 0,1           | <0,01                      |
| <b>Dieldrin</b>                      | 0,003         | <0,001                     |
| <b>Endrin</b>                        | 0,02          | <0,01                      |
| <b>Epóxi – Heptacloro</b>            | 0,01          | <0,005                     |
| <b>Heptacloro</b>                    | 0,01          | <0,005                     |
| <b>Hexaclorobenzeno</b>              | 0,001         | <0,0001                    |
| <b>Lindano</b>                       | 0,3           | <0,01                      |
| <b>Metoxicloro</b>                   | 3,0           | <0,5                       |
| <b>Pentaclorofenol</b>               | 1,0           | <0,5                       |
| <b>Toxafeno</b>                      | 0,5           | <0,01                      |
| <b>2,4 – D</b>                       | 10,0          | <0,5                       |
| <b>2,4,5 – T</b>                     | 0,2           | <0,01                      |
| <b>2,4,5 – TP</b>                    | 3,0           | <0,5                       |
| <b>Organofosforados e Carbamatos</b> | 10,0          | <10,00                     |

LEGENDA: V.M.P.: Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (BRASIL, 1987a)

4) Pág. 125: Tabela 49 deve ser substituída pela tabela seguinte:

| <b>PARÂMETROS</b>                    | <b>V.M.P.</b>        | <b>VARIAÇÃO (mg/L)</b> |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| <b>Alumínio</b>                      | 0,20                 | <0,05 - 1,06           |
| <b>Arsênio</b>                       | 0,05                 | <0,05                  |
| <b>Bário</b>                         | 1,00                 | <0,10                  |
| <b>Berílio</b>                       | -                    | <0,10                  |
| <b>Cádmio</b>                        | 0,005                | <0,005                 |
| <b>Chumbo</b>                        | 0,05                 | <0,05 - 0,42           |
| <b>Cianeto</b>                       | 0,10                 | <0,10                  |
| <b>Cloretos</b>                      | 250                  | <5 - 265               |
| <b>Cobre</b>                         | 1,00                 | <0,005 - 0,08          |
| <b>Cromo Total</b>                   | 0,05                 | <0,05                  |
| <b>Dureza Total</b>                  | 500                  | 45 - 135               |
| <b>Fenol</b>                         | 0,001                | <0,001                 |
| <b>Ferro</b>                         | 0,30                 | <0,03 - 2,59           |
| <b>Fluoreto</b>                      | 1,50                 | 0,37 - 2,60            |
| <b>Manganês</b>                      | 0,10                 | <0,05 - 0,12           |
| <b>Mercúrio</b>                      | 0,001                | <0,001                 |
| <b>Níquel</b>                        | -                    | <0,005                 |
| <b>Nitrogênio Nitrato</b>            | 10,00                | <0,10 - 0,21           |
| <b>Prata</b>                         | 0,05                 | <0,05                  |
| <b>Selênio</b>                       | 0,01                 | <0,01                  |
| <b>Sódio</b>                         | 200                  | 1,13 - 64              |
| <b>Sulfatos</b>                      | 400                  | <5 - 24                |
| <b>Surfactantes</b>                  | 0,20                 | <0,04 - 0,14           |
| <b>Vanádio</b>                       | -                    | <0,85                  |
| <b>Zinco</b>                         | 5,00                 | 0,02 - 0,22            |
| <b>Aldrin</b>                        | -                    | <0,001                 |
| <b>Clordano</b>                      | $3,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001                |
| <b>DDT</b>                           | $1,0 \times 10^{-3}$ | <0,001                 |
| <b>Dieldrin</b>                      | $3,0 \times 10^{-5}$ | <0,00003               |
| <b>Endrin</b>                        | $2,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001                |
| <b>Epóxi Heptacloro</b>              | $1,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001                |
| <b>Heptacloro</b>                    | $1,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001                |
| <b>Hexaclorobenzeno</b>              | $1,0 \times 10^{-5}$ | <0,00001               |
| <b>Lindano</b>                       | $3,0 \times 10^{-3}$ | <0,0001                |
| <b>Metoxicloro</b>                   | 0,03                 | <0,01                  |
| <b>Pentaclorofenol</b>               | 0,01                 | <0,01                  |
| <b>Toxafeno</b>                      | $5,0 \times 10^{-3}$ | <0,001                 |
| <b>2,4 - D</b>                       | 0,1                  | <0,01                  |
| <b>2,4,5 - T</b>                     | $2,0 \times 10^{-3}$ | <0,001                 |
| <b>2,4,5 - TP</b>                    | 0,03                 | <0,01                  |
| <b>Organofosforados e Carbamatos</b> | 0,1                  | <0,1                   |

LEGENDA:  
V.M.P.: Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (BRASIL, 1987a)

5) Pág. 126

a) Onde lê-se “Entre os parâmetros medidos no teste de solubilização, oito superaram o V.M.P., pelo menos uma vez, nos sete testes realizados.” substituir por: Entre os parâmetros medidos no teste de solubilização, seis superaram o V.M.P., pelo menos uma vez, nos seis testes realizados.

b) Tabela 50 deve ser substituída pela tabela seguinte:

|     |           |          |
|-----|-----------|----------|
| Al  | Pb        | Cloretos |
| 2/6 | 2/6       | 1/6      |
| Fe  | Fluoretos | Mn       |
| 5/6 | 2/6       | 1/6      |

6) Pág. 130 – Onde lê-se “Com relação ao chumbo, entre as 7 análises realizadas, duas apresentaram concentrações superiores...” substituir por: Com relação ao chumbo, entre as 6 análises realizadas, duas apresentaram concentrações superiores...

7) Pág. 213 – Tabela AIII-1: desconsiderar amostra 7

8) Pág. 214

a) Tabela AIII-2: desconsiderar amostra 6

b) Tabela AIII-3: desconsiderar amostra 6

9) Pág. 215 – Tabela AIII-4: desconsiderar amostra 7

10) Pág. 216 – Tabela AIII-5: desconsiderar amostra 7

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO  
DE RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
EM INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA:  
ESTUDO DE CASO**

**Patrícia de Souza Andrade**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Dione Mari Morita**

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

Atesto que essa é a versão definitiva da dissertação/tese.

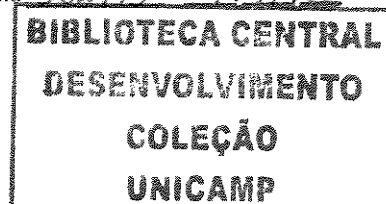
Prof. Dr. Dione Morita

Matricula 302713 - 04111105

Campinas, SP

2005

i



|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| UNIDADE    | PC                                  |
| Nº CHAMADA | (UNICAMP)                           |
|            | An24a                               |
| V          | EX                                  |
| TOMBO BCI  | 67202                               |
| PROC.      | 16-123-06                           |
| C          | <input type="checkbox"/>            |
| D          | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO      | 11,00                               |
| DATA       | 02/03/06                            |

Bib. id. 375423

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

|       |  |
|-------|--|
| An24a | <p>Andrade, Patrícia de Souza</p> <p>Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: estudo de caso / Patrícia de Souza Andrade.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.</p> <p>Orientador: Dione Mari Morita.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Água-Estações de tratamento. 2. Lodo. 3. Cerâmica (Tecnologia). 4. Estudos de viabilidade. 5. Reciclagem - Indústria. I. Morita, Dione Mari. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p> |
|-------|--|

Título em Inglês: Evaluation of the environmental impacts caused by the use of water treatment sludges in the brick industry: case study

Palavras-chave em Inglês: Water purification plants, Sludge, Ceramic bricks, Environmental viability e Reuse.

Área de concentração: Saneamento e Ambiente.

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Ricardo de Lima Isaac e João Vicente de Assunção

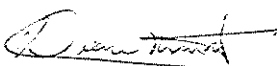
Data da defesa: 16/05/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO  
DE RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
EM INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA:  
ESTUDO DE CASO**

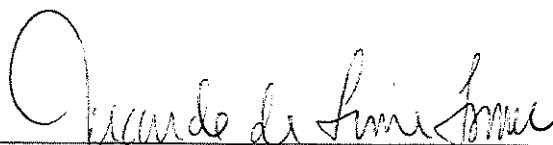
**Autora: Patrícia de Souza Andrade**

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



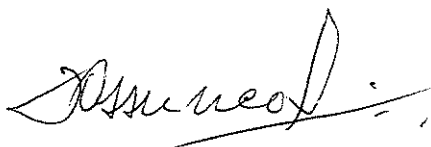
---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Dione Mari Morita  
Presidente e Orientadora / FEC – UNICAMP



---

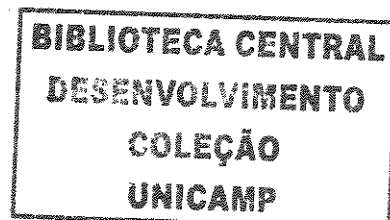
Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac  
FEC – UNICAMP



---

Prof. Dr. João Vicente Assunção  
FSP – USP

Campinas, 16 de maio de 2005



Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e me proporcionaram segurança e conforto. Presentes, interessados e amigos.

## AGRADECIMENTOS

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Dione Mari Morita, pela excelente orientação, pelo incentivo, pelas cobranças e pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac, pelo auxílio e sugestões.

Aos colegas Rafael Menni Novaes, Álvaro Chávez Porras e Archimedes Pereira da Silva Jr., pela amizade e o intercâmbio de informações.

Ao Ronaldo e aos funcionários da Cerâmica Capuava, pelos primeiros ensinamentos em cerâmica. Ao Carlos Henrique Gianfrancesco e aos funcionários da Cerâmica de Tatuí, sempre prestativos e atenciosos no esclarecimento de dúvidas e na coleta de amostras e apoio na realização de ensaios.

Ao Prof. Dr. João Vicente de Assunção, pelo auxílio no entendimento das emissões gasosas. Ao Prof. Dr. Waldir Bizzo, pela prontidão no esclarecimento de dúvidas.

À Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, à FAPESP e à SABESP - em especial ao Eng<sup>º</sup> Américo de Oliveira Sampaio, pela infra-estrutura oferecida, pela bolsa de estudo e por viabilizar o projeto, respectivamente.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP: Ademir de Almeida, Rodolfo Bonamigo, José Reinaldo Marçal, Luciano Passos, Marcelo Ramos e ao Joaquim Costa Junior e ao Antônio Carlos Heitzmann do Laboratório de Solos da Escola Politécnica da USP, pelas informações e ensaios executados.

Aos profissionais, que gentilmente responderam os questionários enviados.

Ao meu pai, pela leitura e sugestões para melhoria deste trabalho. À minha mãe, pela calma, pela companhia e por estar sempre interessada. Aos dois, pelo incentivo e carinho. Ao meu irmão, pelo astral, por ficar feliz com minhas conquistas e estar sempre presente.

Ao Alexandre, companheiro e grande amigo, sempre me apoiando, me escutando e dividindo as frustrações e alegrias.

Aos meus amigos Dirce, Bruno, Janaina, Camila, Isadora, à minha cunhada Flávia e às minhas primas, Aline, Renata e Gisela, pelas conversas, conselhos e pelos momentos de diversão.



## RESUMO

Andrade, P. S. Avaliação do Impacto Ambiental da Utilização de Resíduos de Estações de Tratamento de Água em Indústrias de Cerâmica Vermelha: Estudo de Caso. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, ano 2005. Dissertação de Mestrado.

No Brasil, a maior parte dos resíduos gerados no tratamento de águas não tem destinação apropriada, sendo a mais comum o lançamento direto nos corpos d'água, que causa impacto em sua qualidade e na biota aquática. No presente estudo, o resíduo proveniente da estação de tratamento da água de Cubatão (São Paulo) foi incorporado à argila utilizada na produção de blocos em uma indústria de Tatuí (SP). A mistura foi realizada na proporção mássica lodo:argila de 7%. O resíduo foi caracterizado segundo parâmetros pertinentes, considerando sua procedência e uso final. Foi aplicado, então, o Método "Ad-Hoc" para avaliar os impactos ambientais potenciais decorrentes do uso do lodo no processo industrial. Da análise das entrevistas com especialistas e da revisão da literatura, concluiu-se que estes impactos eram: contaminação do solo e da água subterrânea devido ao armazenamento do lodo no pátio e disposição inadequada dos blocos pós-consumo; contaminação dos funcionários da indústria ocasionada pelo manuseio do lodo; contaminação do ar em decorrência da volatilização dos componentes do lodo no pátio e no processo industrial e devido às emissões nos fornos; contaminação da população que mora ou trabalha nos locais de disposição do bloco pós-consumo e no seu entorno. Os impactos foram quantificados por meio de análises e testes com e sem a incorporação do resíduo. Análises de risco e modelos matemáticos foram aplicados, resultados obtidos nos testes com e sem lodo foram comparados e foi avaliado o atendimento às normas nacionais e internacionais. Concluiu-se que o lodo da estação de tratamento de água de Cubatão podia ser aplicado na indústria cerâmica de Tatuí, sem trazer alterações significativas no processo industrial, na qualidade dos blocos e nos impactos ambientais produzidos no processo cerâmico. Além disto, foi possível desenvolver uma metodologia para avaliar a possibilidade de reúso de resíduos de estações de tratamento de água na indústria cerâmica.

**Palavras Chave:** estação de tratamento de água, lodo, blocos cerâmicos, viabilidade ambiental, reúso

## ABSTRACT

Andrade, P. S. Evaluation of the Environmental Impacts Caused by the Use of Water Treatment Sludges in the Brick Industry: Case Study. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado.

In Brazil, one of the problems which may have a direct effect on the environment is the sludge resulting from sedimentation and filtration at water treatment facilities, as this by-product is often discharged directly into the nearest available rivers and streams. When this happens, impacts on the water quality and detrimental effects to the aquatic biota may result. In this study, residuals from Cubatão Water Treatment Plant (WTP), in the State of São Paulo, were used to produce bricks in an industry localized in Tatuí (SP). For this purpose, 7 % (dry weight basis) of clay may be substituted by sludge. This residual was characterized considering its origin and final use. After that, the “*Ad-Hoc*” Method was applied to evaluate the potential environmental impacts caused by the addition of the sludge into the industrial process. Gathering the interviews with specialists and the literature review, it came to the conclusion that the environmental impacts were: soil and underground water contamination due to the disposal of sludge in the industrial area before its incorporation in the process and because of the inappropriate discharge of the bricks after its use; contamination of the industry employees by handling the residual; air contamination as a result of volatile organic compounds present in the sludge and also because of the emissions that occurs during the firing process; contamination of people who lives nearby or work at the places where the bricks are disposed after its use. The impacts were quantified with analysis and tests with and without the use of the residual. Risk assessment and mathematical models were applied, the results obtained in both tests (with and without sludge) were compared and the compliance to national and international regulations were verified. The conclusions of this study were that the sludge from the Cubatão WTP could be incorporated in the ceramic industry from Tatuí without significant changes in the industrial process, in the brick’s quality or on the environmental impacts caused by the ceramic process. Beyond that, it was possible to develop a methodology to evaluate the potential use of the waterworks sludge in the ceramic industry.

**Keywords:** *water treatment plants, sludge, ceramic bricks, environmental viability, reuse*

## ÍNDICE

|   |              |
|---|--------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | <b>xi</b>    |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....   | <b>xiv</b>   |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....   | <b>xx</b>    |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....  | <b>xxiii</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>1</b>     |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>4</b>     |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>5</b>     |
| <b>3.1. Conceito e Origem do Lodo de Estações de Tratamento de Água</b> .....   | <b>5</b>     |
| <b>3.2. Características dos Lodos de ETAs</b> .....   | <b>6</b>     |
| <b>3.3. Tratamento do Lodo</b> .....  | <b>14</b>    |
| <b>3.4. Formas de Disposição de Lodos de ETAs</b> .....   | <b>21</b>    |
| 3.4.1. Aterro Sanitário .....   | 25           |
| 3.4.2. Estações de tratamento de esgotos (ETEs) .....   | 28           |
| 3.4.3. Indústrias de Cimento .....  | 37           |
| 3.4.4. Concreto .....   | 39           |
| 3.4.5. Agricultura .....  | 41           |
| 3.4.6. Disposição no solo .....   | 43           |
| 3.4.7. Cerâmica .....   | 47           |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>57</b>    |
| <b>4.1. Descrição Geral da Bacia do Rio Cubatão</b> .....   | <b>57</b>    |
| <b>4.2. Descrição do processo de geração do lodo da ETA Cubatão</b> .....   | <b>58</b>    |
| <b>4.3. Descrição do Sistema de Tratamento de Lodo</b> .....  | <b>61</b>    |
| <b>4.4. Descrição do Processo de Fabricação dos Blocos Cerâmicos</b> .....  | <b>62</b>    |
| <b>4.5. Desenvolvimento da Metodologia para Verificação da Viabilidade Ambiental da Incorporação de Lodo de ETA em Blocos Cerâmicos</b> ..... | <b>65</b>    |
| 4.5.1. Histórico do projeto .....   | 65           |
| 4.5.2. Desenvolvimento do presente trabalho.....  | 67           |
| <b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....   | <b>76</b>    |
| <b>5.1. Análise da Qualidade da Água Bruta Captada pela ETA Cubatão</b> .....   | <b>76</b>    |
| 5.1.1. Ponto de amostragem da CETESB.....   | 76           |
| 5.1.2. Captação da SABESP .....   | 77           |
| 5.1.3. Valores limites de qualidade da água bruta e análise dos dados da CETESB.....  | 78           |
| 5.1.4. Frequência de resultados não conformes .....   | 79           |
| 5.1.5. Avaliação do destino dos poluentes desconformes na estação de tratamento de água .....   | 81           |
| <b>5.2. Análise dos Contaminantes Presentes nos Produtos Químicos Utilizados na ETA Cubatão</b> .....   | <b>84</b>    |
| <b>5.3. Caracterização do Lodo Desaguado</b> .....  | <b>87</b>    |
| 5.3.1. Características físico-químicas e microbiológicas do lodo.....   | 87           |
| 5.3.2. Caracterização mineralógica do lodo desaguado da ETA Cubatão e comparação com as características das argilas .....                     | 90           |
| 5.3.3. Análise granulométrica do lodo e comparação com as características das argilas .....   | 94           |

|   |            |
|---|------------|
| 5.3.4. Conclusões sobre a potencialidade do lodo de substituir<br>uma das argilas no processo cerâmico .....                              | 102        |
| <b>5.4. Avaliação da Viabilidade Técnica da Aplicação do Lodo<br/>na Cerâmica .....</b>   | <b>102</b> |
| 5.4.1. Dimensões dos blocos.....  | 104        |
| 5.4.2. Esquadro e planeza das faces .....   | 114        |
| 5.4.3. Absorção de água .....   | 115        |
| 5.4.4. Resistência à compressão.....  | 117        |
| 5.4.5. Análise comparativa dos ensaios mecânicos com os dois<br>tipos de blocos (sem lodo e com 10% de lodo).....                         | 121        |
| 5.4.6. Determinação da relação mássica lodo:argila .....  | 122        |
| <b>5.5. Avaliação do Impacto Ambiental da Incorporação do Lodo<br/>Desaguado da ETA Cubatão em Blocos Cerâmicos .....</b>                 | <b>123</b> |
| <b>5.6. Definição dos Impactos Ambientais Potenciais Decorrentes da<br/>Incorporação do Lodo da ETA Cubatão no Processo Cerâmico.....</b> | <b>123</b> |
| 5.6.1. Contaminação da água subterrânea devido ao armazenamento<br>do lodo no pátio da indústria .....                                    | 124        |
| 5.6.2. Análises de risco à saúde da população exposta, devido ao<br>armazenamento do lodo no pátio da indústria.....                      | 127        |
| 5.6.2.1. Determinação da população de risco.....  | 127        |
| 5.6.2.2. Determinação das vias de exposição .....   | 127        |
| 5.6.3. Contaminação do solo onde o lodo ficou estocado no pátio<br>da indústria .....   | 132        |
| 5.6.4. Teste de queima dos blocos com e sem lodo .....  | 133        |
| 5.6.4.1. Comparação com limites e padrões de emissão.....   | 141        |
| 5.6.4.2. Análise química do material particulado .....  | 151        |
| 5.6.4.3. Balanço de massa de carbono .....  | 154        |
| 5.6.5. Análises químicas dos blocos.....  | 155        |
| 5.6.5.1. Análise química dos blocos pós-extrusão,<br>pós-secagem e pós-queima .....   | 155        |
| 5.6.5.2. Contaminação da água subterrânea devido à<br>disposição inadequada dos blocos pós-consumo .....                                  | 157        |
| 5.6.5.3. Análises de risco à saúde da população que vive na<br>área de disposição dos blocos pós-consumo ou<br>em seu entorno .....       | 161        |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>   | <b>168</b> |
| <b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>   | <b>172</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>173</b> |
| <b>ANEXO I .....</b>  | <b>193</b> |
| ANEXO I-1.....  | 193        |
| ANEXO I-2.....  | 195        |
| ANEXO I-3.....  | 195        |
| <b>ANEXO II .....</b>   | <b>204</b> |
| <b>ANEXO III.....</b>   | <b>213</b> |
| <b>ANEXO IV.....</b>  | <b>217</b> |
| <b>ANEXO V .....</b>  | <b>222</b> |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>ANEXO VI.....</b>   | <b>234</b> |
| <b>ANEXO VII .....</b> | <b>238</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Figura 1  | Opções para tratamento de lodos de estações de tratamento de água (adaptado de CORNWELL <i>et al.</i> , 1990)  | 15  |
| Figura 2  | Variação dos teores de cromo, zinco e alumínio no lodo da ETE com a aplicação de lodo de ETA. (Fonte: HARRI <i>et al.</i> , 2002).   | 32  |
| Figura 3  | Esquema do processo de tratamento de água da ETA Cubatão.  | 60  |
| Figura 4  | Vista aérea da ETA Cubatão.  | 60  |
| Figura 5  | Esquema do sistema de tratamento de lodos da ETA Cubatão.  | 61  |
| Figura 6  | Esquema do processo de fabricação de blocos cerâmicos.   | 64  |
| Figura 7  | (1) Mistura, Laminação, Extrusão e Corte; (2) Secagem; (3) Queima.   | 65  |
| Figura 8  | Resumo das etapas da metodologia proposta para avaliação da viabilidade ambiental da incorporação dos resíduos de ETAs em cerâmica vermelha.                               | 75  |
| Figura 9  | Bloco com lodo (esquerda) mais avermelhado que o bloco sem lodo (direita).   | 94  |
| Figura 10 | Curva granulométrica do lodo.  | 95  |
| Figura 11 | Curva granulométrica do saibro.  | 95  |
| Figura 12 | Curva granulométrica da argila amarela.  | 96  |
| Figura 13 | Curva granulométrica da argila verde escuro.   | 96  |
| Figura 14 | Curva granulométrica do taguá.   | 97  |
| Figura 15 | Curva granulométrica da mistura argilas jazida.  | 97  |
| Figura 16 | Curva granulométrica da mistura argilas teste.   | 98  |
| Figura 17 | Curva granulométrica da mistura argilas pátio.   | 98  |
| Figura 18 | Diagrama de Winkler – adaptado de PRACIDELLI <i>et al.</i> (1997) – e comportamento das massas cerâmicas propostas e daquelas normalmente utilizadas na cerâmica estudada. | 101 |
| Figura 19 | (1) Bloco moldado com paredes curvas; (2) Bloco moldado com paredes retas.   | 103 |
| Figura 20 | Siglas para paredes externas e internas dos blocos.  | 104 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 21     | Aspecto do lodo da ETA Cubatão após 3 meses estocado no pátio da cerâmica.   | 131 |
| Figura 22     | Perfil de temperatura no topo e na base do forno ao longo do tempo de queima dos blocos.   | 133 |
| Figura 23     | Posição da coroa de regulagem de vazão dos alimentadores de cavaco ao longo da queima.   | 134 |
| Figura 24     | Variação dos teores de O <sub>2</sub> ao longo do tempo durante a combustão dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.  | 137 |
| Figura 25     | Variação dos teores de CO <sub>2</sub> , corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.      | 137 |
| Figura 26     | Variação dos teores de CO e NO <sub>x</sub> , corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão. | 138 |
| Figura 27     | Variação dos teores de SO <sub>2</sub> , corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.      | 138 |
| Figura 28     | Resultados do modelo de dispersão aplicado para CO (queima sem e com lodo).  | 148 |
| Figura 29     | Resultados do modelo de dispersão aplicado para NO <sub>x</sub> (queima sem e com lodo).   | 148 |
| Figura 30     | Resultados do modelo de dispersão aplicado para SO <sub>2</sub> (queima sem e com lodo).   | 149 |
| Figura 31     | Distribuição das chaminés e sobreposição de plumas para o CO (teste com lodo).   | 150 |
| Figura AI-1-1 | Suporte, para a prensagem de amostra mineralógica, pronto para ser introduzido no equipamento de difratometria de raios-x.   | 194 |
| Figura AI-1-2 | Equipamento de difratometria da raios-x do LCT EPUSP.  | 194 |
| Figura AI-3-1 | Aspecto externo do Forno 1, instalado na cerâmica de Tatuí.  | 196 |
| Figura AI-3-2 | Desenho esquemático de um forno intermitente utilizado na indústria de cerâmica estrutural (Fonte: Messias, L.S, 1988 apud IPT, 2004).   | 197 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura AI-3-3 | Dispositivo utilizado para alimentar cavaco de madeira para o forno. | 197 |
| Figura AI-3-4 | Dispositivo utilizado para o condicionamento dos gases amostrados.   | 200 |
| Figura AI-3-5 | Sistema de monitoramento contínuo utilizado durante os testes.       | 200 |
| Figura AI-3-6 | Equipamento para coleta de material particulado e SO <sub>x</sub> .  | 202 |
| Figura AIV-1  | Difratograma típico para o lodo da ETA Cubatão.                      | 217 |
| Figura AIV-2  | Difratograma do saibro.  | 218 |
| Figura AIV-3  | Difratograma da argila amarela.                                      | 218 |
| Figura AIV-4  | Difratograma da argila verde escuro.                                 | 219 |
| Figura AIV-5  | Difratograma do taguá.   | 219 |
| Figura AIV-6  | Difratograma da mistura argilas jazida.                              | 220 |
| Figura AIV-7  | Difratograma da mistura argilas teste.                               | 220 |
| Figura AIV-8  | Difratograma da mistura argilas pátio.                               | 221 |



## LISTA DE TABELAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros convencionais).   | 8  |
| Tabela 2  | Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros não convencionais).   | 9  |
| Tabela 3  | Teores de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares no lodo da ETA Rhine (Alemanha).   | 10 |
| Tabela 4  | Teores de pesticidas no lodo da ETA Rhine na Alemanha.  | 10 |
| Tabela 5  | Contaminantes orgânicos em lodos produzidos em ETAs na Holanda.   | 11 |
| Tabela 6  | Resultados do teste EP Toxicity em resíduos de 66 ETAs.   | 12 |
| Tabela 7  | Valores mínimos e máximos de CST de lodos de ETAs.  | 13 |
| Tabela 8  | Teores de umidade dos lodos após tratamento e atendimento aos requisitos de diferentes formas de disposição/usos benéficos.   | 20 |
| Tabela 9  | Formas de disposição dos lodos das ETAs alemãs.   | 25 |
| Tabela 10 | Resultados das análises do sobrenadante da coluna de sedimentação sem e com a adição do lodo de ETA.  | 33 |
| Tabela 11 | Características do afluente de lagoas aeradas e do efluente de lagoas de sedimentação, com e sem dosagem de lodo de ETA.  | 34 |
| Tabela 12 | Composição química do Lodo da ETA de uma indústria e do Taguá Samarone.   | 51 |
| Tabela 13 | Usos de solo predominantes na sub-bacia do rio Cubatão (áreas de uso do solo – km <sup>2</sup> ).   | 57 |
| Tabela 14 | Características da água do Rio Cubatão e limites para as variáveis constantes na Resolução CONAMA n° 20 (classe 2), sua Revisão, dados da UNESCO e outras fontes, tabelas com dados CETESB. | 78 |
| Tabela 15 | Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos limites estipulados pela Resolução CONAMA n° 20.  | 79 |
| Tabela 16 | Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos novos limites estipulados na Resolução CONAMA n° 357.   | 80 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabela 17 | Freqüência em que os parâmetros apresentaram valores superiores ao limite estabelecido por outras fontes (águas protegidas ou isentas de contaminação antrópica), além das Resoluções CONAMA n° 20 e n° 357. | 80  |
| Tabela 18 | Freqüência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos apresentados pela UNESCO, comumente encontrados em águas naturais (isentas de contaminação antrópica).                                   | 80  |
| Tabela 19 | Eficiência de alguns processos físico-químicos de tratamento de água na remoção de <i>Cryptosporidium sp.</i>  | 81  |
| Tabela 20 | Teores dos contaminantes dos produtos químicos monitorados pela SABESP na ETA Cubatão.   | 86  |
| Tabela 21 | Características físico-químicas do lodo desaguado da ETA Cubatão e comparação com os valores encontrados na revisão bibliográfica.   | 88  |
| Tabela 22 | Caracterização microbiológica do lodo desaguado da ETA Cubatão.  | 89  |
| Tabela 23 | Resumo das fases cristalinas mais freqüentes do lodo e das diversas argilas e misturas.  | 90  |
| Tabela 24 | Elementos mais abundantes no lodo e nas diversas argilas e misturas.   | 91  |
| Tabela 25 | Resumo dos resultados das determinações dos óxidos por fluorescência de raios-X no lodo, nas argilas e nas misturas.   | 92  |
| Tabela 26 | Índices de plasticidade do lodo, das argilas e das diferentes misturas.  | 93  |
| Tabela 27 | Composição granulométrica do lodo da ETA Cubatão, das argilas e misturas estudadas.  | 99  |
| Tabela 28 | Frações granulométricas das misturas de argilas utilizadas normalmente na cerâmica e mistura ótima.  | 99  |
| Tabela 29 | Frações granulométricas do lodo, das argilas e misturas propostas (%).   | 101 |
| Tabela 30 | Resultados dos ensaios para verificação da dimensão real dos blocos com e sem lodo de ETA – 24 blocos colocados lado a lado.   | 105 |
| Tabela 31 | Largura, altura e comprimento dos blocos sem lodo de ETA.  | 106 |
| Tabela 32 | Segunda medição de comprimento para o 1o Lote de blocos sem lodo de ETA.   | 107 |
| Tabela 33 | Espessura das paredes externas e internas dos blocos sem lodo de ETA.  | 108 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabela 34 | Largura, altura e comprimento dos blocos com 10% de lodo de ETA.   | 109 |
| Tabela 35 | Segunda medição de comprimento e largura dos blocos com 10% de lodo de ETA (1º Lote).                                  | 111 |
| Tabela 36 | Segunda medição de comprimento dos blocos com 10% de lodo de ETA (2º Lote).  | 111 |
| Tabela 37 | Espessuras das paredes externas e internas dos blocos com 10% de lodo de ETA.  | 112 |
| Tabela 38 | Segunda medição de espessuras externas dos blocos com 10% de lodo de ETA (2º Lote).                                    | 113 |
| Tabela 39 | Esquadro e planeza das faces (Bloco Sem Lodo).   | 114 |
| Tabela 40 | Resumo dos resultados de esquadro e planeza das faces (Bloco Sem Lodo).  | 114 |
| Tabela 41 | Esquadro e planeza das faces (Bloco Com 10% de Lodo).  | 114 |
| Tabela 42 | Resumo dos resultados de esquadro e planeza das faces (Bloco Com 10% de Lodo).   | 115 |
| Tabela 43 | Absorção (Bloco Sem Lodo).   | 115 |
| Tabela 44 | Absorção (Bloco Com 10% de Lodo).  | 116 |
| Tabela 45 | Resistência à compressão (Bloco Sem Lodo).   | 118 |
| Tabela 46 | Resistência à compressão (Bloco Com 10% de Lodo).  | 119 |
| Tabela 47 | Valores e equações utilizados nos cálculos para determinação da relação mássica lodo:argila.                           | 122 |
| Tabela 48 | Resumo dos resultados dos testes de lixiviação do lodo da ETA Cubatão.   | 124 |
| Tabela 49 | Resumo dos resultados dos testes de solubilização do lodo da ETA Cubatão.  | 125 |
| Tabela 50 | Frequência em que os parâmetros de solubilização medidos superaram o limite estipulado pela NBR 10004 (BRASIL, 1987a). | 126 |
| Tabela 51 | Concentrações dos elementos alumínio, chumbo, ferro e fluoreto na água subterrânea da região de Tatuí (2004b b).       | 126 |
| Tabela 52 | Análise química do solo sem e em contato com o lodo e valores de intervenção definidos pela CETESB.                    | 132 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabela 53     | Principais reações físicas e químicas tipicamente envolvidas no tratamento térmico de produtos cerâmicos.  | 135 |
| Tabela 54     | Valores de velocidade, umidade e vazões de gases em base seca obtidos durante a queima dos blocos com e sem lodo.  | 135 |
| Tabela 55     | Consumo total de cavaco por teste realizado (sem incorporação e com incorporação de lodo).   | 136 |
| Tabela 56     | Limites máximos de HCl e COT permitidos pela Diretiva Européia 2000/76/EC para co-processamento em fornos de cimento e concentrações calculadas destes parâmetros para os testes realizados. | 144 |
| Tabela 57     | Emissões máximas encontradas nos ensaios com lodo e sem lodo e máximos e médios fatores de emissão indicados pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997) para indústrias cerâmicas.                      | 147 |
| Tabela 58     | Padrões de qualidade do ar.  | 149 |
| Tabela 59     | Concentrações encontradas para os parâmetros CO, NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub> , considerando sobreposição de plumas.  | 151 |
| Tabela 60     | Análise do material particulado emitido no forno, devido à produção de blocos com e sem a incorporação de lodo.  | 152 |
| Tabela 61     | Emissão dos poluentes no material particulado e fatores de emissão da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997).  | 153 |
| Tabela 62     | Balanco de massa de carbono no forno.  | 154 |
| Tabela 63     | Composição química dos blocos nas diversas fases.  | 156 |
| Tabela 64     | Resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação com os blocos pós-consumo sem e com lodo.   | 158 |
| Tabela 65     | Teores de poluentes no bloco pós-consumo com e sem adição de lodo.   | 160 |
| Tabela AI-3-1 | Especificação do analisador contínuo utilizado no monitoramento da composição dos gases efluentes do processo.   | 199 |
| Tabela AI-3-2 | Gases padrão utilizados para calibrar os analisadores contínuos utilizados no monitoramento da composição dos gases efluentes do processo.   | 199 |
| Tabela AII-1  | Densidade de Coliformes Fecais (NMP/100ml) no Rio Cubatão ao longo do tempo.   | 204 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Tabela AII-2  | Densidade de <i>Estreptococos Fecais</i> (NMP/100mL) no Rio Cubatão ao longo do tempo.    | 204 |
| Tabela AII-3  | Densidade de <i>Clostridium Perfringens</i> (NMP/100mL) no Rio Cubatão ao longo do tempo. | 205 |
| Tabela AII-4  | Densidade de <i>Cryptosporidium sp</i> (oocistos/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.     | 205 |
| Tabela AII-5  | Densidade de <i>Giardia sp</i> (cistos/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.               | 205 |
| Tabela AII-6  | Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                 | 206 |
| Tabela AII-7  | Concentração de Ferro (mgFe/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                          | 206 |
| Tabela AII-8  | Concentração de Cloreto (mg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                          | 207 |
| Tabela AII-9  | Concentração de Alumínio (mgAl/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                       | 207 |
| Tabela AII-10 | Concentração de Bário (mgBa/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                          | 207 |
| Tabela AII-11 | Concentração de Cádmiio (mgCd/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                        | 208 |
| Tabela AII-12 | Concentração de Chumbo (mgPb/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                         | 208 |
| Tabela AII-13 | Concentração de Cobre (mgCu/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                          | 209 |
| Tabela AII-14 | Concentração de Níquel (mgNi/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                         | 209 |
| Tabela AII-15 | Concentração de Mercúrio (mgHg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                       | 210 |
| Tabela AII-16 | Concentração de Zinco (mgZn/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                          | 210 |
| Tabela AII-17 | Concentração de Manganês (mgMn/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                       | 211 |
| Tabela AII-18 | Concentração de Cromo Total (mgCr/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.                    | 211 |
| Tabela AII-19 | Potencial de Formação de THM ( $\mu\text{g/L}$ ).   | 211 |
| Tabela AII-20 | Resultados dos testes de toxicidade realizados no rio Cubatão, de 1998 a 2003.            | 212 |
| Tabela AII-21 | Concentrações de Carbono Orgânico Dissolvido – COD (mg/L) medidas no rio Cubatão.         | 212 |
| Tabela AIII-1 | Caracterizações da massa bruta do lodo.   | 213 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabela AIII-2 | Caracterizações de compostos orgânicos voláteis do lodo.   | 214 |
| Tabela AIII-3 | Caracterizações microbiológicas do lodo.   | 214 |
| Tabela AIII-4 | Testes de lixiviação do lodo – todas as análises.  | 215 |
| Tabela AIII-5 | Testes de solubilização do lodo – todas as análises.   | 216 |
| Tabela AIV-1  | Fases cristalinas mais freqüentes no lodo – diversas caracterizações.                                      | 217 |
| Tabela AV-1   | Especialistas Consultados.   | 222 |
| Tabela AVI-1  | Dados emissões para comparação com os fatores da EPA.  | 234 |
| Tabela AVI-2  | Dados de entrada – Programa SCREEN3.   | 234 |
| Tabela AVI-3  | Resultado das análises químicas dos filtros impregnados com o material coletado.                           | 235 |
| Tabela AVI-4  | Massas dos elementos presentes na água de lavagem da sonda durante os testes com e sem lodo.               | 236 |
| Tabela AVI-5  | Resultado das análises químicas realizadas nos filtros de coleta de material particulado sem uso (branco). | 237 |
| Tabela AVII-1 | Testes de solubilização dos blocos queimados – todas as análises.  | 238 |
| Tabela AVII-2 | Testes de lixiviação dos blocos queimados – todas as análises.   | 239 |
| Tabela AVII-3 | Poluentes na massa bruta dos blocos queimados – todas as análises.   | 240 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AA – Absorção de Água
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AGV – Ácidos Graxos Voláteis
- ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica
- APHA – American Public Health Association
- ASCE – American Society of Civil Engineers
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- ASTSWMO – Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials
- ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry
- AWWA – American Water Works Association
- BCWA – Bradford City Water Authority
- CAG – Carvão Ativado Granular
- CAP – Carvão Ativado em Pó
- CBH – BS – Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista
- CDPHE – Colorado Department of Public Health and Environment
- CEAGESP – Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CL – com lodo
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- COT – Carbono Orgânico Total
- COV – Compostos Orgânicos Voláteis
- CST – Capillary Suction Time ou tempo de sucção capilar
- C/N – Carbono/Nitrogênio
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- EEAB – Estação Elevatória de Água Bruta
- EGVM – Expert Group on Vitamins and Minerals
- EIDN – Environment Industry Development Network
- EOCl – Compostos Organoclorados Extratíveis

EP Toxicity Test – Extraction Procedure Toxicity Test  
EPA – Environmental Protection Agency  
ETA – Estação de Tratamento de Água  
ETA Cubatão – Estação de Tratamento de Água de Cubatão  
ETA SAAE/BM – Estação de Tratamento de Água do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Barra Mansa  
ETAs – Estações de Tratamento de Águas  
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto  
ETEs – Estações de Tratamento de Esgotos  
ETL – Estação de Tratamento de Lodo  
ETLs – Estações de Tratamento de Lodo  
GIAG – Geodur International AG  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
ISO – International Organization for Standardization  
MEA – Massa Específica Aparente  
MP – Material Particulado  
MRL – Minimal Risk Level  
NBR – Norma Brasileira  
NJWSA – New Jersey Water Supply Authority  
NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl  
OD – Oxigênio Dissolvido  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
OSHA – Occupational Safety and Health Administration  
PA – Porosidade Aparente  
PACl – Cloreto Polialumínico  
PAHs – Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares  
PCBs – Bifenilas Policloradas  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
RAFA – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo  
RE – Resistência Específica  
RfC – Inhalation Reference Concentration



RfD – Reference Dose (Dose de Referência)  
RSO – Resíduo Sólido Orgânico  
RWSA – Rivanna Water and Sewer Authority  
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo  
SL – sem lodo  
SMA – Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo  
SST – Sólidos em Suspensão Totais  
SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis  
ST – Sólidos Totais  
TF – Tempo de Filtração  
THMs – Trihalometanos  
tMS – Tonelada Material Seco  
TOX – Compostos Organo-Halogenados  
UGRHI – Unidade Gerenciadora de Recursos Hídricos  
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas  
U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services  
USP – Universidade de São Paulo  
WEF – Water Environmental Federation  
WHO – World Health Organization  
WTP – Water Treatment Plant  
WSAA – Water Services Association of Australia

## LISTA DE SÍMBOLOS

a – comprimento da chaminé (m)

b – largura da chaminé (m)

De – diâmetro equivalente (m)

C(1h) – concentração para 1 hora ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

C(24h) – concentração para 24 horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

emissão( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )<sub>real(i)</sub> – emissão real de poluente, sem correção do teor de oxigênio ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )

massapoluente – massa de poluente emitida (kg)

massapoluente/h(i) – massa de poluente emitida por hora com diferentes vazões (kg/h)

Massaprodutofinal – massa de todos os blocos queimados no forno (kg)

massatotal(i) – massa emitida de cada elemento (mg/h)

Material Particulado – calculado pelo método utilizado pela CETESB

$\text{mg}/\text{Nm}^3$ (i) – vazão de poluente com correção para teor de 7% de oxigênio ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )

MMP – massa molar do poluente (g)

p – expoente para correção da concentração, varia entre 0,17 e 0,20

P – pressão (atm)

ppmv(j) – teores em ppmv (partes por milhão volumétrico) em diferentes períodos

R – constante universal dos gases  $\left( \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K} \right)$

SO<sub>2</sub>' – calculado a partir da emissão em ppmv

SO<sub>2</sub>'' – calculado pelo método utilizado pela CETESB

SO<sub>3</sub> – calculado pelo método utilizado pela CETESB

T – temperatura (°C ou K)

tqp – tempo de queima por período (h)

t(i) – tempo de queima com diferentes vazões (h)

volumegásemitido – volume de gás emitido (L)

Vazão(i) – vazão de gás seco ( $\text{Nm}^3/\text{s}$  ou  $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

% (m/m) – relação em % entre massapoluente e Massaprodutofinal

%v/v(j) – teores em % v/v (porcentagem volume/volume) em diferentes períodos

$\pi$  - constante pi igual a 3,1415

## 1. INTRODUÇÃO

A disposição dos resíduos do tratamento de água é um problema que tem merecido destaque nos últimos anos, principalmente, devido à grande quantidade de lodo gerada e ao crescente empenho para a minimização de impactos ambientais, amparado no surgimento de leis que restringem e regulamentam as opções de descarte deste resíduo.

Os métodos tradicionais de disposição de lodos de estações de tratamento de águas (ETAs) praticados nos diversos países são:

- lançamento em cursos d'água, não recomendado por causar o assoreamento dos mesmos, o comprometimento da qualidade da água, maiores dispêndios no tratamento, a possível inviabilização de uso como manancial de abastecimento, além de danos ao ecossistema aquático;
- disposição em aterros, método oneroso, que requer grandes áreas e pode contribuir para a contaminação do solo e da água subterrânea;
- tratamento conjunto com os esgotos domésticos, que apresenta como desvantagens a possibilidade de sobrecarregar as estações de tratamento de esgoto e de apenas transferir o problema de disposição da estação de tratamento de água para a de esgotos.

Em substituição a estes métodos de disposição, têm surgido idéias interessantes e viáveis. Países da Europa, os Estados Unidos e a Austrália são os mais engajados na pesquisa destas novas alternativas. Nestes países, foram testadas aplicações do lodo em áreas degradadas, em solos agrícolas e em processos industriais como produção de cimento, alumínio e peças cerâmicas. Com algumas ressalvas, quase todas as experiências mostraram-se viáveis e eficientes, muitas vezes trazendo economia significativa, principalmente quando usadas com o escopo de substituir a disposição em aterros sanitários. Os maiores problemas encontrados estão associados à provável presença de materiais tóxicos no resíduo; à falta de sinergia entre os diversos atores envolvidos no processo; a uma complicada logística de transporte (distâncias, volumes de lodo, custos) e às dificuldades para adequar o lodo às necessidades do uso a que se pretende.

No Brasil, são ainda restritas e incipientes as experiências realizadas no equacionamento dos problemas concernentes ao lodo de estações de tratamento de água. Grande parte deste material

ainda é disposta em rios e poucas estações têm se preocupado com o seu tratamento e disposição. São conhecidas algumas experiências na área, realizadas principalmente através de parcerias entre concessionárias, indústrias e universidades.

Frente a esta realidade, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), concessionária que atua na cidade de Cubatão, aliou-se à Universidade de São Paulo (USP) e à uma cerâmica de Tatuí (SP), a fim de estudar alternativas para dispor seu lodo da melhor forma.

A Estação de Tratamento de Água de Cubatão (ETA Cubatão), que trata em média 4 m<sup>3</sup>/s, é responsável pelo abastecimento de 2.000.000 de habitantes dos municípios de Santos, São Vicente, Cubatão e grande parte da Praia Grande.

Processar o lodo conjuntamente com o esgoto sanitário não é viável para o caso da ETA Cubatão, tendo em vista que a capacidade de tratamento de esgotos em Cubatão é limitada. O quadro atual revela que apenas cerca de 31% dos esgotos são coletados e tratados (SÃO PAULO, 2004a). Além disto, o tratamento de esgoto utilizado na região é realizado em lagoas, e não seria sensato dispor o lodo de ETA nas mesmas.

A disposição atualmente utilizada pela ETA Cubatão é o descarte em aterros. Cerca de 50 toneladas de lodo seco (20% massa seca) são produzidas por dia. Este resíduo é retirado da estação de tratamento de lodo (ETL) por caminhões, e levado ao aterro “Boa Hora”, localizado em Mauá. Este transporte é realizado por uma empresa terceirizada, que cobra R\$ 69,00 por tonelada retirada. Este valor inclui a taxa de recebimento cobrada pelo aterro (FERREIRA, 2004).

A indústria cerâmica tem grande capacidade de absorver lodos de ETA. Estudos da composição química deste resíduo constataram a similaridade deste com a argila normalmente utilizada no processo cerâmico (CORNWELL *et al.*, 2000; COSIN *et al.*, 2002; GODBOLD *et al.*, 2003; HUANG *et al.*, 2001; ISSAC *et al.*, 2002b).

O setor cerâmico no Brasil é abrangente, dinâmico e movimenta cerca de 2,8 bilhões de dólares por ano. De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica, existem 11.000 indústrias produzindo cerâmica vermelha no Brasil, sendo que 62% produzem blocos, 37% telhas e 0,2% tubos. Na região sudeste, existem 1.600 indústrias, que produzem em média 500.000 telhas por mês e 2.000 fábricas, responsáveis por uma produção mensal de 7.500.000 tijolos. Em todo o país, estes empreendimentos demandam 10.500.000 toneladas de argila todo mês na produção de

blocos e 4.000.000 toneladas por mês na de telhas. Este setor é responsável pela geração de 650.000 empregos diretos, contribuindo ainda para o estabelecimento de outros 2 milhões empregos indiretos (ANICER, 2004).

Conclui-se do exposto que o uso dos lodos da ETA Cubatão na fabricação de materiais cerâmicos, utilizados na construção civil, pode ser uma solução para o problema e que, portanto, deve ser avaliada a sua viabilidade.

## **2. OBJETIVOS**

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar, em escala real, a viabilidade ambiental da incorporação do lodo gerado nos decantadores e da água de lavagem dos filtros da ETA Cubatão, após sofrerem adensamento, condicionamento e desaguamento, em blocos cerâmicos.

Neste estudo, o lodo foi considerado não mais como resíduo sólido, e sim como matéria prima de um processo industrial. Desta forma, outro objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia para avaliar a possibilidade de reúso de resíduos de estações de tratamento de água na indústria cerâmica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Conceito e Origem do Lodo de Estações de Tratamento de Água

Conforme o Colorado Department of Public Health and Environment (COLORADO, 2004), “lodo de estação de tratamento de água ou lodo de tratamento de água é o sólido acumulado resultante do processamento da água bruta em uma estação de tratamento”.

Godbold *et al.* (2003), por sua vez, definem esse lodo como todo resíduo proveniente do tratamento para produzir água potável a partir da água bruta. Segundo os autores, o termo resíduo sólido é mais adequado do que lodo, porque a última designação tende a possuir uma conotação negativa, quando considerado para aplicações de reúso/reciclagem. Este resíduo é composto basicamente de impurezas removidas e precipitadas da água em conjunto com os produtos químicos de tratamento utilizados. Tipicamente, ele compreende mais de 5% da produção anual da ETA.

Richter (2001) considera que lodo de estação de tratamento de água é o resíduo constituído de água e sólidos em suspensão originalmente contidos na fonte de abastecimento, acrescidos de produtos resultantes dos reagentes aplicados à água nos processos de tratamento, bem como suas impurezas.

Sarabia (2001) define lodos de ETA como materiais que são removidos da água bruta, tais como: argila, substâncias húmicas, microrganismos e produtos usados na coagulação química. Ele contém entre 93,0 e 99,5% de umidade, além de sólidos inicialmente presentes na água ou gerados durante o tratamento.

Como foi visto, diversos autores estabelecem conceitos similares para o lodo, porém as definições apresentadas são, em geral, mais adequadas para os lodos provenientes das etapas de coagulação, floculação e decantação.

Para Cornwell *et al.* (2000), as estações de tratamento de água geram uma grande variedade de diferentes resíduos sólidos, que podem ser, geralmente, classificados em: resíduos de alumínio, de cloreto polialumínico (PACl), de ferro, de abrandamento com cal, de polímero, de coagulante-cal e de ferro/manganês.

Segundo Richter (2001), a origem do lodo varia com o tipo de tratamento de água empregado, tendo, portanto, características diferentes quando provenientes de ETAs convencionais ou de ETAs de abrandamento. Estas diferentes estações recebem classificações específicas de acordo com a sua função:

- convencionais (coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção): tem finalidade básica de remoção de cor e turbidez. Utiliza, geralmente, sulfato de alumínio ou cloreto férrico como coagulante primário. Produz lodo resultante da coagulação, floculação e sedimentação, além da água de lavagem dos filtros.
- de abrandamento: tem finalidade básica de remoção de dureza, através da precipitação do carbonato de cálcio e/ou de magnésio, pelo acréscimo de cal. Produz lodo de abrandamento.

Nas ETAs convencionais, 60 a 95% (em massa de sólidos) do lodo é removido nas unidades de decantação e a parcela restante nos filtros. A porcentagem de lodo removida depende dos processos utilizados no tratamento, e geralmente encontra-se entre 0,2 a 5% do volume tratado (RICHTER, 2001).

### **3.2. Características dos Lodos de ETAs**

As características dos lodos de ETAs variam com a natureza da água bruta, dos processos e operações unitários e produtos químicos aplicados (RICHTER, 2001).

O lodo de sulfato de alumínio é um fluido não-newtoniano, gelatinoso, cuja fração de sólidos é constituída de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, colóides e resíduos orgânicos, inclusive bactérias e outros organismos removidos no processo de coagulação/floculação/sedimentação. Estes lodos sedimentam com relativa facilidade, porém sua baixa compressibilidade resulta em grande volume e baixo teor de sólidos (RICHTER, 2001).

O lodo proveniente do uso de coagulantes férricos tem características e constituição semelhantes àqueles da utilização de sulfato de alumínio, porém ao invés de hidróxido de alumínio, tem-se hidróxido de ferro (RICHTER, 2001).



O lodo formado no processo de abrandamento por cal é constituído principalmente de carbonato de cálcio e é, praticamente, isento de matéria orgânica. Sua composição inclui 75% de  $\text{CaCO}_3$ , 6% de sílica como  $\text{SiO}_2$ , 7% de carbono total, 3% de alumínio como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 2 % de magnésio como  $\text{MgO}$  (RICHTER, 2001). A composição, a massa e o volume variam com a dureza removida e outras características físico-químicas da água bruta.

Com relação à água de lavagem dos filtros, Barbosa (2000) afirmou que a quantidade e a composição deste resíduo decorrem da eficiência da operação de filtração e dos processos das unidades de tratamento que a precedem. A autora citou ainda que os principais constituintes deste tipo de efluente são: partículas finas, hidróxidos complexos de alumínio e ferro, plâncton, matéria orgânica, água e subprodutos gerados no processo de coagulação, além de impurezas contidas nos reagentes químicos aplicados.

Barbosa (2000) afirmou, de modo geral, que o lodo retido nos decantadores e nos flotores e a água de lavagem dos filtros apresentam: baixa biodegradabilidade, alta concentração de sólidos totais (esta concentração é menor na água de lavagem dos filtros quando comparada ao lodo do decantador), patógenos e, eventualmente, metais pesados.

Porém, para que se tenha conhecimento das características do lodo é necessária a determinação de parâmetros tais como: sólidos, pH, metais, nitrogênio, fósforo total, carbono orgânico total (COT), etc. As características dos lodos, segundo diversos autores, estão indicadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros convencionais).

| PARÂMETROS                                     | CORDEIRO (1993) <sup>(1)</sup> | YUZHU (1996)                       | BARBOSA (2000)  | HUANG <i>et al.</i> (2001)                | RICHTER (2001)   | ISAAC <i>et al.</i> (2002a)  | PAULSRUD <i>et al.</i> (2002) | GODBOLD <i>et al.</i> (2003)                                  |
|--|--------------------------------|------------------------------------|---|---|--|------------------------------|-------------------------------|---|
| pH   | 5,0 - 7,6                      | -                                  | 6,2 - 9,8 <sup>(2)</sup><br>6,8 - 10,6 <sup>(3)</sup>                                 | 6,59                                      | 6 - 8 <sup>(2)</sup><br>7,4 - 9,5 <sup>(3)</sup>                                   | 7,8 <sup>(5)</sup>           | 6,9 - 8,4                     | 5,5 - 7,5   |
| Sólidos totais                                 | 1100 - 81575 (mg/L)            | 2,5 (%)                            | 29595 - 52345 <sup>(2)</sup><br>2132 - 5074 <sup>(3)</sup> (mg/L)                     | -   | 0,1% - 4% <sup>(2)</sup><br>0,25% - 3,5% <sup>(3)</sup><br>2% - 25% <sup>(4)</sup> | 480 <sup>(5)</sup> (mg/L)    | 0,06 - 18,5 (%)               | 0,1 - 27 <sup>(2)</sup><br>1,85 - 17,6 <sup>(3)</sup> (% m/m) |
| Sólidos voláteis (% dos sólidos totais - % st) | 20 - 73                        | 20                                 | 24,96 - 25,35 <sup>(2)</sup><br>23,57 - 29,17 <sup>(3)</sup>                          | 9,56                                      | 20 - 35 <sup>(2)</sup><br>5,1 - 14,1 <sup>(3)</sup>                                | 33 <sup>(5)</sup>            | 37,5 - 67,5                   | 10 - 35   |
| Alcalinidade                                   | -                              | 0,0 - 115 (mgCaCO <sub>3</sub> /L) | 68,48 - 93,60 <sup>(2)</sup><br>54,08 - 81,32 <sup>(3)</sup> (mgCaCO <sub>3</sub> /L) | 0,055 (% CaO)                             | -  | 3,70 <sup>(5)</sup>          | 0,25 - 1,76 (% Ca em st)      | -   |
| Ferro  | -                              | 17,5 - 1800 (mgFe/L)               | 130500 - 392500 <sup>(2)</sup><br>124000 - 299500 <sup>(3)</sup> (mgFe/kg)            | 5,514 (% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | -  | >113,1 <sup>(5)</sup> (mg/L) | -                             | 6,5 <sup>(2)</sup><br>19 - 38 <sup>(3)</sup> (% st)           |

LEGENDA:

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

Tabela 2: Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros não convencionais).

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

LEGENDA:

<sup>(1)</sup> – síntese da caracterização de lodo de decantadores realizados por diversos autores;

<sup>(2)</sup> – resíduo de tratamento com sulfato de alumínio; <sup>(3)</sup> – resíduo de tratamento com cloreto férrico;

<sup>(4)</sup> – resíduo do processo de abrandamento por cal; <sup>(5)</sup> – água de lavagem dos filtros

Outros parâmetros não convencionais foram reportados por Ohmichen *et al.* (1988) apud Horth *et al.* (1994). Estes pesquisadores desenvolveram técnicas para determinar os teores de pesticidas, de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAHs) e compostos fenólicos no lodo. Foi relatada a detecção de alguns cresóis na água capilar do lodo. Os PAHs foram pesquisados no lodo da estação de tratamento de água Rhine, que utilizava cloreto férrico como coagulante, e os resultados encontrados estão listados na Tabela 3.

Tabela 3: Teores de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares no lodo da ETA Rhine (Alemanha).

| COMPOSTOS              | $\mu\text{g kg}^{-1}$<br>(massa seca) |
|------------------------|---------------------------------------|
| Fluoranteno            | 107,0                                 |
| Benzo(k)fluoranteno    | 24,2                                  |
| Benzo(b)fluoranteno    | 41,5                                  |
| Benzo(a)pireno         | 18,1                                  |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 26,7                                  |
| Benzo(g,h,i)perileno   | 17,0                                  |

Fonte: HORTH *et al.* (1994)

Para os pesticidas, os mesmos autores encontraram, para o lodo da ETA, os valores relacionados na Tabela 4.

Tabela 4: Teores de pesticidas no lodo da ETA Rhine na Alemanha.

| PESTICIDA     | ÁGUA CAPILAR<br>( $\mu\text{g Kg}^{-1}$ ) | ÁGUA BRUTA<br>( $\mu\text{g Kg}^{-1}$ ) | LIMITES DE DETECÇÃO<br>( $\mu\text{g Kg}^{-1}$ ) |
|---------------|---|---|--|
| Atrazina      | 0,014                                     | 0,11                                    | 0,01   |
| Terbutilazina | 0,011                                     | 0,06                                    | 0,01   |
| Metolachlor   | Não detectado                             | não detectado                           | 0,04   |
| Metazachlor   | Não detectado                             | 0,07                                    | 0,01   |

Fonte: HORTH *et al.* (1994)

Esses pesquisadores concluíram que estes teores relativamente baixos de contaminantes orgânicos eram insuficientes para acarretar riscos conseqüentes da disposição deste lodo em aterros.

KIWA (1986) apud Horth *et al.* (1994) pesquisou ETAs a fim de determinar, também, a ocorrência de contaminantes orgânicos no lodo e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5. Os teores de sólidos apresentados pelo lodo de cloreto férrico e carvão ativado em pó (C) e pela água de lavagem dos filtros (D) não são os comumente encontrados na bibliografia.

Tabela 5: Contaminantes orgânicos em lodos produzidos em ETAs na Holanda.

| PARÂMETROS                                     | TIPOS DE LODO    |                    |        |        |
|--|------------------|--------------------|--------|--------|
|  | Água Subterrânea | Água de Superfície |        |        |
|  | A                | B                  | C      | D      |
| Teor de Sólidos (% m/m)                        | 18,6             | 17,7               | 2,1    | 27,7   |
| Aromáticos (mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos) | 0,03             | 9,90               | 102,00 | -      |
| PAHs (mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos)       | 0,09             | 23,00              | nd     | 1,20   |
| PCBs(mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos)        | nd               | nd                 | nd     | nd     |
| Pesticidas (mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos) | nd               | 0,40               | 0,32   | 0,14   |
| EOCl (mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos)       | < 0,70           | 11,00              | 85,00  | < 0,70 |
| THMs (mg kg <sup>-1</sup> sólidos secos)       | nd               | nd                 | 700,00 | -      |

LEGENDA:  
A e B – Tratamento com cloreto férrico  
C – Tratamento com cloreto férrico e carvão ativado em pó (CAP)  
D – Água de lavagem de filtros  
PAHs – Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares  
PCBs – Bifenilas Policloradas  
EOCl – Compostos Organoclorados Extraíveis  
THMs – Trihalometanos  
nd – não detectado

Fonte: HORTH *et al.* (1994).

Nos anos 80, a EPA estabeleceu um processo para determinar se um resíduo em particular era perigoso. Este teste ficou conhecido como "Extraction Procedure Toxicity Test" (EP Toxicity

Test), e segundo a EPA (ESTADOS UNIDOS, 2004), trata-se da determinação da toxicidade através da simulação da lixiviação. Caso certa substância tóxica esteja presente no lixiviado do resíduo em concentrações acima do limite estipulado, o resíduo é considerado perigoso. Cornwell *et al.* (1990) apresentaram os resultados obtidos nos testes EP Toxicity, realizados em resíduos de sessenta e seis estações de tratamento de água (Tabela 6).

Tabela 6: Resultados do teste EP Toxicity em resíduos de 66 ETAs.

| PARÂMETRO   | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA (mg/L) | VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO (mg/L) |
|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Arsênio     | 5,00                                 | <0,2 - 0,4                      |
| Bário       | 100,00                               | <0,1 - 34,0                     |
| Cádmio      | 1,00                                 | <0,005 - 0,060                  |
| Cromo       | 5,00                                 | <0,1 - 3,8                      |
| Cobre       | -                                    | <0,02 - 29,60                   |
| Chumbo      | 5,00                                 | <0,03 - 4,10                    |
| Mercúrio    | 0,20                                 | <0,0004 - 0,0030                |
| Níquel      | -                                    | <0,03 - 3,80                    |
| Selênio     | 1,00                                 | <0,001 - 0,080                  |
| Prata       | 5,00                                 | <0,01                           |
| Endrin      | 0,02                                 | <0,0001                         |
| Lindano     | 0,40                                 | <0,00005                        |
| Metoxicloro | 10,00                                | <0,0005                         |
| Toxafeno    | 0,50                                 | <0,001                          |
| 2,4-DD      | 10,00                                | <0,005                          |
| 2,4,5-TP    | 1,00                                 | <0,0005                         |

Fonte: CORNWELL *et al.* (1990)

Conforme Cornwell *et al.* (1990), apenas dois resíduos avaliados segundo o EP Toxicity Test apresentaram concentrações de metais excedendo a metade da máxima concentração permitida. Nos dois casos, suspeitou-se que os metais fossem provenientes do coagulante, já que não eram rotineiramente encontrados nas águas do manancial.

Além dos parâmetros discutidos anteriormente, outros não convencionais, tais como: filtrabilidade, resistência específica, sedimentabilidade, compressibilidade, tamanho e distribuição de partículas, são fundamentais na definição do método de remoção de água para redução de volume e na fixação do tipo de equipamento e condições de funcionamento para tratamento.

A filtrabilidade e a sedimentabilidade são características físicas do lodo que dependem do teor de sólidos, dosagem de coagulante e outros compostos presentes no lodo (YUZHU, 1996). A primeira pode ser medida pelo parâmetro resistência específica, definida como sendo o diferencial de pressão necessário para produzir uma vazão unitária de filtrado, de viscosidade unitária, através de uma torta (lodo) de massa unitária (base seca). Já, a sedimentabilidade depende do volume e do peso dos flocos formados. A compressibilidade é função do tamanho das partículas e de sua deformação pela pressão aplicada.

Segundo diversos autores (CHRISTENSEN *et al.*, 1985; GRANDIN, 1992; YUZHU, 1996), a resistência específica de lodos de decantadores de ETAs pode variar entre 0,33 e  $7,35 \cdot 10^{12}$  m/Kg. Para Grandin (1992), a resistência específica do lodo proveniente dos filtros, por sua vez, pode variar entre 0,83 e  $9,58 \cdot 10^{12}$  m/Kg.

Outro parâmetro importante, que pode ser utilizado em substituição à determinação da resistência específica, é o CST (capillary suction time) ou tempo de sucção capilar. O CST é aplicado para selecionar condicionadores químicos e indica o tempo que a fração de lodo leva para percorrer uma determinada distância num meio poroso ou mais comumente num pedaço de papel de filtro (MIKI, 1998). A Tabela 7 mostra valores de CST mínimos e máximos encontrados ou relatados por diferentes pesquisadores.

Tabela 7: Valores mínimos e máximos de CST de lodos de ETAs.

|                | KAYODE &<br>GREGORY<br>(1988) | CORNWELL<br><i>et al.</i> (1990) | PAPAVASILOPOULOS<br>(1997) | ISAAC &<br>GREGORY<br>(1998) |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| CST Mínimo (s) | 10,0                          | 7,0                              | 9,0                        | 4,8                          |
| CST Máximo (s) | 100,0                         | 70,0                             | 50,0                       | 28,4                         |

O tempo de filtração (TF) também é utilizado para substituir a resistência específica. Ele é na verdade uma simplificação do teste de resistência, onde são tomados somente o tempo final de filtração e uma análise qualitativa do filtrado (MIKI, 1998).

Zhao *et al.* (1998) relataram valores de tempos de filtração entre 165 e 1115 segundos, para diferentes volumes de filtrado e dosagens de polieletrólito. Di Bernardo *et al.* (1999), por sua vez, encontraram, para um mesmo volume final de filtração, valores de TF iguais a 51 e 406 segundos, para um lodo condicionado com polímero e outro sem condicionamento, respectivamente.

### **3.3. Tratamento do Lodo**

O escopo deste trabalho não é dissertar sobre os diversos tipos de tratamento que o lodo pode sofrer. Uma revisão mais aprofundada sobre o tema pode ser encontrada nas referências Cornwell *et al.* (1990), Richter (2001), Yuzhu (1996), Souza Filho (1998), Cordeiro (1993), Reali *et al.* (1999).

Cornwell *et al.* (1990) afirmaram que o lodo produzido em ETAs geralmente contém grande teor de água (97,0% - 99,9%). Por isto, são poucas as circunstâncias nas quais estes resíduos podem ser dispostos sem tratamento adicional. Este tratamento consiste em aumentar o teor de sólidos do lodo através de adensamento e desaguamento. Segundo Richter (2001), além de ser importante para concentrar os sólidos, este tratamento também reduz o volume do lodo.

Para Cornwell *et al.* (1990), as opções e possíveis seqüências para tratamento de lodos estão descritas na Figura 1.



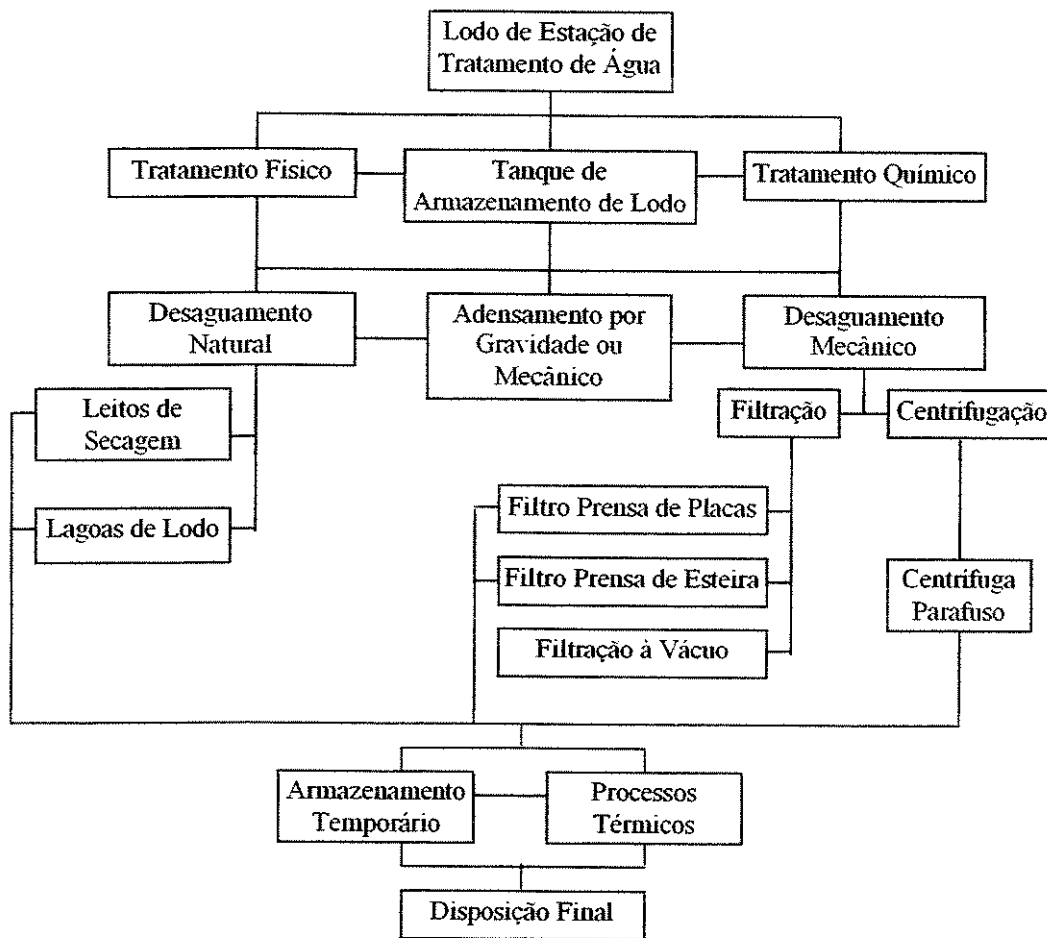


Figura 1 – Opções para tratamento de lodos de estações de tratamento de água (adaptado de CORNWELL *et al.*, 1990)

Segundo a publicação da Environment Industry Development Network (EIDN, 2000), o teor de sólidos pode ser aumentado em no mínimo 4% com o uso de um adensador mecânico, muito utilizado atualmente em substituição aos adensadores por gravidade. Este incremento é alcançado em algumas horas e traz o benefício de maiores teores de sólidos associados à redução nos custos com transporte.

A remoção de água tem por finalidade reduzir o percentual de umidade do lodo, a fim de diminuir o volume a ser disposto. O teor de sólidos pode ser aumentado para valores entre 5 e 30%, dependendo do método utilizado (SOUZA FILHO, 1998). O desaguamento pode ocorrer de forma natural ou mecânica.

O desaguamento natural é aquele que não utiliza acessórios mecânicos, tais como prensas ou centrífugas, mas apenas agentes naturais, como a ação da gravidade e a evaporação. Os dispositivos mais comuns são: leitos de secagem e lagoas de lodo.

Para o desaguamento mecânico, atualmente, os equipamentos mais usados são: centrífuga, filtro prensa de placas e filtro prensa de esteira.

Richter (2001) cita que a fração de água no lodo pode ser classificada em três categorias: (1) água livre, que não está intimamente ligada aos sólidos do lodo; (2) água capilar e a aderida na superfície dos sólidos; (3) quimicamente ligada - hidratação.

Conforme o mesmo autor, cada tipo de água é retirado do lodo preferencialmente por algum processo, ou em alguma etapa específica do tratamento. A água livre, por exemplo, pode ser separada dos sólidos por gravidade ou por filtração, através de adensadores por gravidade ou por flotação e dos “decanters” centrífugos. São eficientes na remoção de água livre, os leitos de secagem. Estes dispositivos são constituídos de um meio poroso (areia) que permite escoamento e evaporação complementar, devido ao longo tempo de exposição ao ambiente. São atingidos teores de sólidos da ordem de 15-25%, comparáveis com os resultados obtidos nos dispositivos mecânicos.

Por outro lado, a água capilar e a aderida por tensão superficial só podem ser removidas nos filtros, onde atuam os gradientes de pressão capazes de vencer as resistências à separação. Os aparelhos mecânicos mais usados para esta finalidade têm sido o filtro prensa tradicional, o de correia ou prensa desaguadora. Esta ordem de apresentação corresponde também à frequência de utilização destes equipamentos. O filtro à vácuo foi um dos primeiros dispositivos a ser testado para o desaguamento dos lodos, porém mostrou-se ineficiente, de difícil operação e alto custo. A prensa desaguadora, por sua vez, apresenta menor custo de investimento e operacional e é preferida em alguns casos.

Como auxiliares no processo de desaguamento são utilizados os chamados condicionadores. Os principais métodos de condicionamento são: congelamento, tratamento térmico, aplicação de auxiliares físicos e de produtos químicos. Entre eles, o último é o mais utilizado (YUZHU, 1996). Independente do método aplicado, a função do condicionador é basicamente melhorar a propriedade estrutural do lodo, para permitir a drenagem da água, aumentar a recuperação de sólidos e diminuir o tempo de ciclo do processo de desaguamento.

Segundo Thompson e Paulson (1998), o desaguamento ou remoção de água é um processo essencial para qualquer estação que produz, trata e dispõe lodo. Esta fonte cita um estudo piloto realizado na estação de tratamento de água da Universidade de Iowa, que comparou o desaguamento de dois lodos produzidos com diferentes coagulantes – sulfato de alumínio e sulfato férrico. O objetivo era analisar, comparativamente, se o tratamento com um destes coagulantes resultaria em um lodo mais fácil de desaguar. A cal foi utilizada no processo por ser um condicionador de lodo que facilita o processo de desaguamento. Esta propriedade lhe é conferida, por ser constituída de cristais densos e porosos que se incorporam ao lodo, resultando em uma matriz que permite rápida remoção de água. Nos ensaios realizados, o uso de cal como condicionador melhorou o desaguamento do resíduo sólido produzido com os dois coagulantes. No entanto, em última análise, o lodo resultante do tratamento com ferro provou ser mais fácil de desaguar que aquele proveniente do tratamento com sulfato de alumínio.

O tratamento dos lodos funciona também para possibilitar a recirculação da água de lavagem dos filtros e da água removida dos lodos. Torna-se possível, com o seu emprego, fazer uma estação de tratamento com o mínimo de perdas nos processos, isto é, com uma eficiência de quase 100% em termos de volume produzido.

Isaac *et al.* (2002a) afirmaram que embora esta recirculação e a conseqüente minimização das perdas físicas de água sejam desejáveis, ressalva-se a preocupação crescente quanto a esta prática, principalmente, devido ao risco potencial à saúde do consumidor representado pela presença de cistos e oocistos de protozoários oportunistas. Uma pesquisa feita recentemente na região de Campinas, por exemplo, detectou a presença de oocistos de *Cryptosporidium sp.* em parte das amostras de água coletadas no rio Atibaia. Uma vez que a remoção física destes microrganismos na ETA deve ser obtida, com maior ou menor eficiência, nos decantadores e filtros, grandes densidades podem ocorrer tanto no lodo quanto na água de lavagem.

Segundo publicação da EIDN (2000), se a água de lavagem dos filtros possuir ou apresentar um risco de conter oocistos de *Cryptosporidium sp.*, antes de sua recirculação, deve-se proceder a micro-filtração. Os sólidos acumulados devem ser pasteurizados para desativar qualquer organismo danoso.

Outro fator que pode também comprometer o reúso da água de lavagem, e tem gerado discussões na comunidade técnica e científica, é o uso de polímeros como condicionadores. Conforme Horth

*et al.* (1994), a OMS (Organização Mundial de Saúde) estabeleceu, em sua revisão de 1993, uma diretriz a qual recomenda que a acrilamida, introduzida na água tratada pelo uso de poliacrilamida como auxiliar de coagulação, deve apresentar valores residuais inferiores a 0,5 µg/L. Ainda segundo os autores, é improvável que a poliacrilamida afete a qualidade da água tratada quando são adotados os limites operacionais do Reino Unido relacionados à aprovação destes polímeros (teor máximo de acrilamida igual a 0,025%, e dose máxima de poliacrilamida igual a 0,5 mg/L).

Segundo a Foundation for Water Research (1990), o Committee on Chemicals and Materials of Construction for Use in Public Water Supply and Swimming Pools estabeleceu a redução na concentração máxima permitida para monômeros livres de acrilamida em poliacrilamidas e copolímeros, além de uso de menores quantidades na dosagem média de polímeros. Esta regra aplica-se ao uso destes polímeros diretamente na água tratada para abastecimento. Sabe-se que polímeros deste tipo são usados também no tratamento do lodo e que em alguns casos o líquido recuperado é retornado ao processo de tratamento de água. Nestes casos, a concentração de acrilamidas na água potável pode aumentar.

No Brasil, os padrões de potabilidade são estabelecidos pela Portaria 518 (BRASIL, 2004a), e este documento define o valor máximo permitido para acrilamida na água igual a 0,5 µg/L.

Deve-se destacar ainda que, no processo de tratamento do lodo, a presença de metais pesados no resíduo ou na água de lavagem pode ser danosa. Barroso *et al.* (2001) afirmaram, genericamente, sem aprofundar seus pontos de vista, que os metais (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, Cr, Mn) e em especial o alumínio, exercem papel de destaque face às suas potenciais ações tóxicas, além de seus possíveis efeitos positivos e negativos nas técnicas de tratamento, disposição e reutilização desses resíduos.

A escolha do tipo de tratamento a ser empregado ao lodo depende de sua destinação final. Sabendo o uso que o lodo terá, poder-se-á determinar a umidade que ele deverá atingir após o tratamento, além de possibilitar a análise dos efeitos do uso de polímeros e de outros condicionadores. Estes aspectos irão orientar na escolha de um ou outro tratamento.

A Tabela 8 apresenta os teores de umidade atingidos em ensaios efetuados por diferentes autores utilizando diversos sistemas de tratamento de lodos. Além disto, na tabela, discute-se à luz de cada uma das formas de disposição final, a viabilidade ou não do tratamento. É importante

observar que a tabela só avalia teor de sólidos, sendo necessário, para os diferentes usos, verificar outros parâmetros de qualidade do lodo.

Tabela 8: Teores de umidade dos lodos após tratamento e atendimento aos requisitos de diferentes formas de disposição/ usos benéficos.

| AUTORES                       | TIPO DE TRATAMENTO EMPREGADO            | Umidade no Fim do Processo (%) | Aterro Sanitário   | ETEs <sup>(6)</sup> | Indústria <sup>(7)</sup> | Agricultura <sup>(8)</sup> | Solo <sup>(8)</sup> | Construção Civil <sup>(7)</sup> |
|-------------------------------|---|--------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|
| PORTELLA <i>et al.</i> (2003) | Adensador + Centrifuga Tipo Decanter    | 86,4 – 87,5                    | Não                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
| PAULSRUD <i>et al.</i> (2002) | Adensador por Gravidade                 | 97,5 – 98,5                    | Não                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
| BACHE <i>et al.</i> (2002)    | Adensador por Gravidade + Centrifuga    | 80,0 – 85,0                    | Não                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
| RASOOL <i>et al.</i> (2002)   | Adensador + Filtro Prensa de Esteira    | 85                             | Não                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
|                               | Adensador + Filtro Prensa de Membrana   | 82                             | Não                | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
|                               | Prensa Desaguadora <sup>(1)</sup>       | 50,0 – 60,0                    | Sim                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
|                               | Prensa Desaguadora <sup>(2)</sup>       | 80,0 – 85,0                    | Não                | Não                 | Sim                      | Sim                        | Sim                 | Sim                             |
| RICHTER (2001)                | Centrifuga Tipo Decanter <sup>(1)</sup> | 65,0 – 85,0                    | Sim <sup>(5)</sup> | Não                 | Sim                      | Sim <sup>(10)</sup>        | Sim <sup>(12)</sup> | Sim                             |
|                               | Centrifuga Tipo Decanter <sup>(2)</sup> | 82,0 – 84,0                    | Não                | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
|                               | Filtro Prensa <sup>(3)</sup>            | 50,0 – 60,0                    | Sim                | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
|                               | Filtro Rotativo à Vácuo                 | 60,0 – 65,0                    | Sim                | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
|                               | Filtro Prensa                           | 65,0 – 70,0                    | Sim <sup>(5)</sup> | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
| CORNWELL <i>et al.</i> (1990) | Centrifuga <sup>(4)</sup>               | 78,0 – 81,0                    | Sim <sup>(5)</sup> | Não                 | Sim                      | Não <sup>(9)</sup>         | Não <sup>(11)</sup> | Sim                             |
|                               | Sem tratamento                          | -                              | Não                | Sim                 | Não                      | Sim                        | Sim                 | Não                             |

LEGENDA: <sup>(1)</sup> exceto lodo de sulfato; <sup>(2)</sup> lodo de cal; <sup>(3)</sup> lodo de sulfato; <sup>(4)</sup> lodo de sulfato; <sup>(5)</sup> > 30% sólidos; <sup>(6)</sup> quanto mais líquido melhor (Decreto nº 8.468/76 (SÃO PAULO, 1976); materiais sedimentáveis até 20 mL/L em teste de 1 (uma) hora em "cone Imhoff"); ASCE; AWWA; USEPA, 1996 (<1% a 8% sólidos); <sup>(7)</sup> depende da aplicação, quanto menor a umidade, melhor; <sup>(8)</sup> depende do produtor ou do órgão que fará uso do lodo; <sup>(9)</sup> ASCE; AWWA; USEPA, 1996 (<1% a 2,5% sólidos); <sup>(10)</sup> < 25% sólidos (ASCE; AWWA; USEPA, 1996); <sup>(11)</sup> ASCE; AWWA; USEPA, 1996 (<1% a 15% sólidos); <sup>(12)</sup> 15% sólidos (ASCE; AWWA; USEPA, 1996)

### 3.4. Formas de Disposição de Lodos de ETAs

Com o crescente problema da falta de disponibilidade de água doce para os seus diversos fins, faz-se necessário não poluí-la e atentar para os impactos que possam prejudicar a sua qualidade.

Segundo Cordeiro (2003), a maioria das estações de tratamento de água brasileiras lança os seus resíduos sólidos nos corpos d'água mais próximos ou na rede de águas pluviais, sem nenhum tratamento. Tal procedimento favorece o aumento do grau de poluição e contribui para uma maior degradação do meio ambiente. Além disto, ocasiona aumento na quantidade de sólidos nos corpos d'água, provocando assoreamento indesejável, mudanças de cor, turbidez e alterações em termos de composição química e DQO (YUZHU, 1996).

Cornwell *et al.* (1987) afirmaram que quando o resíduo sólido de uma ETA é lançado num corpo receptor que apresenta baixa turbulência, há uma tendência de se formar bancos de lodo nas proximidades do ponto de descarga. Embora os autores tenham afirmado que, até então, não existiam muitas publicações sobre os impactos deste depósito de lodo sobre a comunidade bentônica, eles apontaram ser provável que os ecossistemas próximos a estas formações fossem afetados. Esta situação poderia criar condições anaeróbias, causar redução de pH, resultar na solubilização de metais contidos no lodo, liberar odores e reduzir o oxigênio dissolvido imprescindível para a vida aquática.

A AWWA (1991) apud Barbosa (2000), através de avaliação do lançamento de lodos de ETAs no ambiente aquático, concluiu que: (1) lodos de ETAs não devem ser lançados em riachos com águas ácidas ( $\text{pH} < 6$ ); (2) descargas de lodo de ETAs em águas superficiais brandas (dureza menor que  $50 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ ) devem ser evitadas; (3) avaliações ambientais relativas à disposição de lodos de ETAs em águas superficiais seriam necessárias, considerando-se fatores como o uso da água do corpo receptor, estrutura do sedimento, aspectos hidrológicos e biologia aquática, para que se determinasse os efeitos deletérios destas descargas ao ecossistema.

Barbosa (2000) realizou testes de toxicidade para caracterizar o impacto do lodo à biota aquática. A autora avaliou, comparativamente, lodos provenientes de duas estações de tratamento de água: ETA Paiol – ETA 1 (tratamento com cloreto férrico) e ETA SAAE – ETA 2 (tratamento com sulfato de alumínio). Após realizar os testes de toxicidade aguda e crônica utilizando

microcrustáceos, quironomídeos e peixes como organismos testes, e de posse dos resultados dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, a autora concluiu que: (1) os lodos das duas ETAs, em geral, não causavam toxicidade aguda, mas sim indícios de toxicidade a microcrustáceos, quironomídeos e peixes; (2) o lodo da ETA 1 provocou toxicidade crônica aos microcrustáceos, sendo que os efeitos foram evidenciados na reprodução (menor número de neonatas em relação ao controle) e alta taxa de mortalidade ao final do teste; (3) o lodo da ETA 2 implicou em toxicidade crônica aos microcrustáceos e os efeitos refletiram apenas na reprodução (menor número de neonatas em relação ao controle); (4) Não se constatou variação temporal das toxicidades aguda e crônica dos lodos das duas ETAs nos períodos amostrados (chuvoso e seco).

Segundo Cordeiro *et al.* (2003), no Brasil, pouca experiência existe em relação aos resíduos gerados em decantadores de ETAs completas. Isto indica que o impacto provocado pelo lançamento desse rejeito em cursos d'água é relativamente desconhecido. Mesmo sem o conhecimento necessário dos efeitos adversos causados por este procedimento, estima-se que cerca de 2.000 toneladas diárias de sólidos são lançados em coleções de água brasileiras, sem nenhum tratamento (proveniente de 7500 ETAs).

Cordeiro *et al.* (2003), através dos resultados obtidos em estudo de caso, perceberam que as características do córrego Monjolinho (São Carlos) sofreram mudanças bruscas com o lançamento de lodo. Muitas vezes, os valores dos parâmetros de qualidade da água foram 100% superiores ao inicial (sólidos totais, sólidos sedimentáveis, cor). Devido a estas alterações, os autores julgaram ser necessário realizar uma avaliação mais profunda das vazões do lodo e do rio para que pudesse ser verificada a possibilidade ou não de se efetuar a descarga.

Ainda segundo os mesmos autores, os casos mais problemáticos são aqueles em que as ETAs dispõem seus resíduos sólidos nos rios, em intervalos de tempo acima de 20 dias. Esses rejeitos normalmente possuem teores de sólidos acima de 2,5%, podendo provocar alterações consideráveis no corpo receptor. Cordeiro *et al.* (2003) observaram, ainda, que a ETA – São Carlos despejava nos rios quantidades de lodo em desacordo com os padrões ambientais (sólidos totais, sólidos sedimentáveis, cor), ferindo a legislação brasileira vigente, provocando degradação da qualidade ambiental e afetando condições estéticas.

Esta realidade justifica a importância de se discutir e encontrar alternativas para a disposição e o uso benéfico do lodo proveniente das ETAs brasileiras.



Pesquisadores de alguns países, como os Estados Unidos e a Inglaterra, já realizaram estudos neste sentido há alguns anos. Mesmo no Brasil, algumas alternativas já foram avaliadas e aplicadas visando a redução do resíduo ou o melhor uso do mesmo. Na Alemanha, a produção de lodo está sendo analisada em cada estação, com o objetivo de evitá-la onde for possível. Quando isto não for possível, encorajar a utilização benéfica deste resíduo e assegurar uma disposição segura (HORTH *et al.*, 1994). Godbold *et al.* (2003) informaram que o uso de resíduos sólidos de tratamento de água em vários processos industriais e comerciais tem sido praticado na Grã-Bretanha e outras partes da Europa, nos Estados Unidos e na Austrália. Experiências piloto e em escala real têm sido realizadas nestes países nas áreas de produção de tijolos e cimento, na recuperação de coagulantes e na aplicação no solo.

Cornwell *et al.* (2000), a partir de consultas a WATERSTATS, base de dados da indústria da água, mantida pela American Water Works Association (AWWA), obtiveram informações sobre as práticas de disposição de resíduos das ETAs americanas. Estes autores concluíram que 20% das ETAs dispunham seu lodo em aterros sanitários, 25% no solo, 13% em aterros exclusivos, 24% lançavam em sistema público de esgotos, 11% em corpos d'água e 7% empregavam outras destinações, tais como aplicação em áreas degradadas, em solos agrícolas, em processos industriais (produção de cimento e concreto) e em compostagem.

Adler (2002) apresentou um levantamento realizado na França que demonstrou que a maioria das ETAs francesas era de pequeno porte (vazão inferior a 500 m<sup>3</sup>/h) e que a produção total de lodo em 384 ETAs era de 175 toneladas de material seco por dia (tMS/dia). Quanto à disposição final deste lodo, 30% das ETAs lançavam em sistemas públicos de esgotos, 13% dispunham em aterros sanitários, 6% aplicavam os lodos no solo e 53% possuíam outras formas de disposição, entre elas, compostagem, construção de diques e incorporação em materiais de construção civil.

Segundo Paulsrud *et al.* (2002), na Noruega, as formas de disposição usuais de lodos de ETAs são: descarga nos corpos d'água; nos sistemas públicos de esgotos; aterros sanitários; recuperação de produtos químicos; co-disposição com lodos de estações de tratamento de esgotos; aplicação no solo. Até recentemente, os lodos das ETAs norueguesas ou eram descarregados nos corpos d'água diretamente ou em sistemas públicos de esgotos. Esta última solução era adotada no caso de ETAs localizadas próximas às estações de tratamento de esgotos, que tivessem condições de receber os lodos. No entanto, este quadro tem sido alterado devido à

crescente deterioração da qualidade da água bruta (problemas de gosto e odor) e ao impacto das descargas de lodos de ETAs nos corpos d'água receptores (baixo pH, altas concentrações de alumínio). A disposição em aterros tem sido abandonada na Noruega, pois esta prática é proibida na maioria dos condados deste país. A quantidade de lodo produzido nas ETAs norueguesas é pequena e não torna a recuperação de coagulantes uma alternativa economicamente viável. Portanto, as hipóteses de destinação têm sido aplicação no solo e outros usos benéficos.

No Reino Unido, as formas e os custos de disposição de lodos de ETAs foram levantados por Simpson *et al.* (2002), através de consultas às concessionárias de serviços de água. Uma inferência de dados indicou que em 1997 produziram-se cerca de 131.000 toneladas de sólidos secos de lodos de ETAs naquele país. Deste total, 45% era lodo de alumínio, 33% de ferro, 17% de abrandamento, 4,5% natural e 1% de outros tipos. As formas de disposição desses resíduos no Reino Unido, à época do levantamento, eram: 6% em aterro exclusivo, 2% em corpos d'água, 29% em sistemas públicos de esgotos, 2% em lagoas, 52% em aterro sanitário e 9% em novos métodos. Entre os novos métodos, foram citados: disposição no solo (incluindo a produção de gramíneas); recuperação de áreas degradadas; incorporação em materiais de construção, tais como tijolos e agregados sintéticos.

Na Alemanha, as formas mais usuais de disposição de lodos de ETAs são sistemas públicos de esgotos (principal destinação) e aterro sanitário, seguidos de descargas em corpos d'água – Tabela 9 (HORTH *et al.*, 1994).

Tabela 9: Formas de disposição dos lodos das ETAs alemãs.

| FORMA DE DISPOSIÇÃO                | QUANT. DE TORTA<br>(t por ano) |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Aterro de resíduo doméstico        | 2630                           |
| Aterro de resíduo industrial       | 333                            |
| Aterro de resíduo especial         | 246                            |
| Aterro próprio                     | 62                             |
| Aterro privado                     | 438                            |
| Outros tipos de aterro             | 230                            |
| Descarga em m corpos d'água        | 2670                           |
| Descarga em sistemas de esgotos    | 7762                           |
| Utilização agrícola                | 1200                           |
| Utilização na indústria de cimento | 615                            |
| Utilização na indústria cerâmica   | 100                            |
| Outros usos industriais            | 107                            |
| Outras formas de disposição        | 3574                           |

Fonte: HORTH *et al.* (1994)

Já na Holanda, segundo Sombekke e Koppers (1992) apud Horth *et al.* (1994), em 1989, 2% dos lodos gerados em ETAs eram descarregados diretamente nos corpos d'água, 51% encontravam-se estocados, 37% eram dispostos em aterros sanitários, 7% eram usados para controle de gás sulfídrico e 12% na agricultura.

Resumindo, dentre as principais destinações que o lodo pode ter atualmente estão: aterro sanitário, estações de tratamento de esgotos (ETEs), indústrias, agricultura, disposição no solo e construção civil.

#### 3.4.1. Aterro Sanitário

Para que o lodo seja disposto em aterros sanitários, é necessário que ele siga padrões e não ultrapasse alguns valores máximos especificados para certos parâmetros. É de extrema importância que ele não seja classificado como resíduo perigoso, assim, não pode ser tóxico,

corrosivo, inflamável, irritante, sensibilizador forte ou material que produz calor ou pressão através da decomposição. Deve-se evitar que existam líquidos livres em sua composição. Assim, não haverá percolação e nem a possibilidade de elementos carreados contaminarem águas subterrâneas ou comprometerem a qualidade do solo.

Para a disposição do resíduo em aterros é necessário, portanto, que ele seja desaguado até que apresente um teor de sólidos superior a 25% (CORDEIRO, 1993) e que análises sejam realizadas a fim de garantir que ele não se constitua em material perigoso. Somente com estas análises será possível garantir que o lodo pode ser disposto junto com os outros resíduos sólidos sem causar impactos negativos.

Horth *et al.* (1994) afirmaram que, na aplicação de lodo de estação de tratamento de água em aterros, os fatores mais importantes eram teor de sólidos secos e consistência. Na Holanda, foi adotado o padrão de 10 kN/m<sup>2</sup> para tensão de cisalhamento e teor de sólidos secos igual a 35% (HORTH *et al.*, 1994). Além disto, os aterros só podem receber resíduos químicos se atenderem aos requisitos de isolamento, controle e inspeção. Pela classificação holandesa, o lodo é considerado resíduo químico por ser originário de processo químico (coagulação).

Na França (ADLER, 2002), foi elaborada uma lista de resíduos aceitos em aterros em que a disposição do lodo de ETA foi considerada possível em uma categoria D, definida pela legislação local, quando o teor de sólidos estiver acima de 30%.

Nos EUA, segundo Cornwell *et al.* (1990), para que os lodos sejam dispostos em um aterro tipo 1 (aterros para resíduos perigosos), eles devem possuir teor de sólidos superior a 20%.

Para a disposição de lodos em aterros na Alemanha (HORTH *et al.*, 1994), o teor de carbono orgânico total (COT) deve ser inferior a 1% para aterros considerados Classe I e inferior a 3% para aterros Classe II. As classes de aterro são definidas de acordo com a impermeabilização que eles recebem, sendo que aterros Classe II são semi-impermeáveis e normalmente utilizados para disposição de resíduos sólidos domiciliares. Os aterros Classe I equivalem aos aterros perigosos brasileiros.

A diretiva europeia sobre resíduos perigosos (THE COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1991) classifica o lodo de estações de tratamento de água como perigoso. Com esta classificação, a diretiva europeia sobre aterros (THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1999) obriga que este tipo de resíduo seja disposto em aterros para resíduos perigosos.

Para tanto, deve sofrer tratamento prévio caso apresente teores ou lixiviação de componentes potencialmente danosos suficientemente altos, capazes de constituir riscos ambientais ou atrapalhar a estabilização do aterro.

A aplicação dos lodos em aterros é considerada, por muitos, a mais segura no sentido de conter a contaminação ao ambiente e é bastante utilizada. No entanto, deve-se considerar que, no Brasil, a maioria dos aterros já não é capaz de receber os resíduos sólidos domiciliares. Além disto, as altas taxas cobradas pelos aterros, para recebimento do lodo, torna recomendável o estudo de alternativas de disposição do lodo de ETAs. Segundo Richter (2001), estas taxas variam entre US\$ 75,00 a 100,00 por tonelada de lodo recebido. Deve-se considerar, ainda, o custo de transporte que varia entre US\$ 0,09 a 0,16/t km.

Alguns estudiosos norte-americanos (CORNWELL *et al.*, 2000) encontraram alternativas para o uso benéfico do lodo no próprio aterro. O resíduo, ao invés de ser disposto como os demais, pode ser utilizado na cobertura, substituindo o aterramento convencional com argila. O principal problema é o custo para desaguamento e o transporte do lodo até o aterro, que depende da distância entre o mesmo e a ETA. Foram apresentados por Cornwell *et al.* (2000), alguns estudos de caso relevantes sobre as vantagens e desvantagens desta aplicação. A instituição americana Rivanna Water and Sewer Authority (RWSA), por exemplo, demonstrou a viabilidade de se realizar compostagem conjunta de lodo de ETA com o lodo de ETE. No entanto, mais tarde, concluiu que a aplicação na cobertura de aterros era uma opção mais econômica. Atualmente, a RWSA entrega todo o resíduo produzido para um aterro, recebendo US\$ 9,00 por tonelada úmida de lodo.

Silva *et al.* (2000) realizaram estudo simulando em reatores anaeróbios, em escala de laboratório, a disposição final de lodos de ETAs em aterros sanitários. Foi verificada a relação entre a lixiviação de alumínio, a produção de ácidos graxos voláteis (AGV) e a quantidade de resíduo sólido orgânico (RSO) co-disposto.

No experimento de Silva *et al.* (2000), foi utilizado o lodo resultante dos processos de coagulação com sulfato de alumínio, floculação e sedimentação de uma ETA da cidade de Porto Alegre. Antes do carregamento dos reatores, o lodo foi desaguado em leitos de secagem e armazenado. Com a finalidade de obter um resíduo predominantemente orgânico para representar a fração do resíduo doméstico disposta em aterro, foi utilizado o RSO coletado em um restaurante

universitário. Com o intuito de propiciar a partida dos reatores, fornecendo microrganismos e nutrientes suficientes para a utilização dos substratos, foi empregado lodo anaeróbio (inóculo) proveniente de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (RAFA).

Como conclusões, os autores relataram que: (1) a produção de metano mais efetiva demonstrou estar associada com as menores taxas de liberação de alumínio em relação à quantidade de RSO; (2) a co-disposição de lodos de ETAs em células de aterro sanitário com baixo conteúdo de resíduo sólido orgânico (em relação ao lodo de ETA), apresentou-se como uma efetiva possibilidade de disposição final do resíduo. (3) embora os autores não tivessem avaliado a influência do lodo anaeróbio no processo, eles recomendaram uma proporção mássica de lodo de ETA/RSO maior que 4; (4) a co-disposição de lodos de ETAs, com grandes quantidades de resíduos sólidos estritamente orgânicos ocasionou intensa produção de ácidos graxos voláteis, abaixando o pH do meio e favorecendo a lixiviação do alumínio. Na opinião da pesquisadora, o trabalho falhou ao não indicar, em suas conclusões, as quantidades exatas, preferindo usar termos como “baixo conteúdo” ou “grandes quantidades”. A pesquisadora buscou obter estes valores, mas os autores não responderam o seu questionamento.

Segundo Paulsrud *et al.* (2002), a Noruega vem abandonando a disposição de lodo desaguado em aterros sanitários, desde que a legislação vigente passou a incentivar usos benéficos.

Seguindo esta mesma tendência, a ASTSWMO (Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials, 2000) afirmou que, atualmente, nos Estados Unidos, tem-se preferido o uso benéfico de resíduos industriais não perigosos (como cinzas de madeira, escória de fundição e lodos de tratamento de esgoto) em substituição à disposição em aterros. Por esta razão, o sub-comitê de resíduos sólidos desta instituição estabeleceu um grupo de trabalho (Beneficial Use Task Force) para realizar um levantamento dos resíduos passíveis de algum tipo de reciclagem, entre os quais se encontrava o lodo de tratamento de água.

#### 3.4.2. Estações de tratamento de esgotos (ETEs)

O tratamento de lodos de ETAs em estações de tratamento de esgotos é possível, considerando que grande parte do mesmo é água. Porém, suas características diferem muito das que possuem

os esgotos domésticos. Caso as análises químicas apontem toxicidade do lodo de ETA, este tipo de disposição pode comprometer o bom funcionamento da ETE e afetar a qualidade do corpo d'água que recebe o efluente do tratamento.

As principais limitações para esta prática se devem: à aplicação de padrões mais rígidos no pré-tratamento de esgotos, à baixa capacidade das estações de tratamento de esgoto para receber este resíduo sólido, a possíveis impactos no desempenho dos digestores e a necessidade de atender padrões de emissão mais restritivos para o efluente final. Outra limitação, que pode tornar inviável esta disposição, é a tarifa aplicada pelas concessionárias para recebimento deste tipo de resíduo.

Exceto nos casos de remoção de fósforo, minimização de odor e aproveitamento do sistema de tratamento de lodo de ETE para o lodo de ETA, pode-se considerar que lançando o lodo nas redes coletoras de esgoto, há apenas uma transferência de problema da estação de tratamento de água para a de esgotos.

Segundo Horth *et al.* (1994), nos países da Europa, o lançamento de lodo de tratamento de água no sistema de esgoto é normalmente permitido se a concessionária dos serviços de saneamento o aceita, mas é condicionado a um pré-tratamento para atender os limites estabelecidos pela legislação.

A ASCE; AWWA; USEPA (1996) afirmaram que os requisitos mais comuns, indicados pelas concessionárias, para a aplicação do lodo de ETA na ETE são: equalização do volume a ser disposto; ajuste do pH quando necessário; atendimento aos limites para recebimento de efluentes não domésticos em sistema público de esgotos, tais como sólidos totais, metais pesados, sulfatos, sulfetos, etc.

Carvalho (2000) avaliou as interferências do lançamento de resíduos de ETA nas estações de tratamento de esgoto com decantação primária. Para simular os efeitos nos decantadores primários e nos digestores de lodo da ETE, foram realizados, respectivamente, testes de sedimentação e testes de tratabilidade anaeróbia. Análises complementares também foram realizadas para verificar eventuais interferências no tratamento biológico da fase líquida e no tratamento físico da fase sólida do esgoto.

O autor chegou às seguintes conclusões: "(1) o lançamento de resíduos de cloreto férrico, via rede coletora de esgoto ou transporte por caminhões, em dosagens inferiores a 225 mg ST/L,

possivelmente não causará efeitos prejudiciais no desempenho das ETEs com decantação primária; (2) o sucesso desse tipo de disposição irá depender das características do resíduo de ETA e da tecnologia de tratamento utilizada na ETE; (3) embora o volume de lodo primário possa aumentar significativamente com a adição do resíduo de ETA, as sobrecargas de volume e de sólidos nas unidades envolvidas no tratamento do lodo poderão ser atenuadas, visto que a concentração de sólidos diminui e a sedimentabilidade do lodo aumenta. Testes de resistência específica e viscosidade indicaram que o grau de desaguamento aumentaria com o aumento da dosagem de lodo de ETA; (4) possivelmente não ocorrerá sobrecarga hidráulica nas unidades de tratamento da fase líquida do esgoto, já que o percentual volumétrico entre o resíduo de ETA e o esgoto apresenta valores relativamente pequenos. Para a ETA estudada, o incremento de vazão seria de, no máximo, 6%; (5) ainda com relação à decantação primária, o método de disposição proposto também pode resultar no aumento de remoção de DQO, nitrogênio, fósforo e coliformes fecais; (6) com a disposição do resíduo de ETA avaliado, não ocorrerá inibição no processo de digestão de lodos. Os resultados dos testes de tratabilidade anaeróbia não indicaram efeito negativo na taxa de produção de metano com o aumento da dosagem de resíduo de ETA; (7) de acordo com a caracterização do sobrenadante das colunas no final do teste de sedimentação, provavelmente não ocorrerão interferências negativas no processo biológico utilizado no tratamento de esgoto; (8) visto que não foram constatadas interferências significativas, pode-se afirmar que não haverá alteração com relação à disposição do efluente final da ETE; (9) os resíduos de ETA provavelmente só poderão ser lançados em uma rede coletora de esgoto, com efluentes que sofrerão tratamento, após sua equalização prévia. Isto é recomendável porque a maior parte dos sólidos contidos nos decantadores e águas de lavagem de filtros é eliminada na forma intermitente”.

Ainda segundo o autor, deve-se avaliar, em complemento ao estudo por ele apresentado:

- os efeitos no adensamento do lodo;
- a eficiência de centrífugas e filtros-prensa, quando submetidos a lodos contendo resíduo de ETAs;
- os efeitos na digestão aeróbia;
- a atuação dos precipitados de ferro na remoção de sulfetos;



- as interferências na disposição final da fase sólida do esgoto, bem como o efeito de abrasão nos equipamentos de desaguamento;
- os riscos de entupimento no sistema de coleta de esgoto.

Na opinião da pesquisadora, o trabalho de Carvalho (2000) apresentou conclusões vagas, sendo que algumas afirmações não foram comprovadas no estudo, ficando apenas no campo das possibilidades. O autor foi contraditório ao afirmar que “o sucesso desse tipo de disposição irá depender das características do resíduo da ETA e da tecnologia de tratamento utilizada na ETE”, uma vez que em alguns momentos, tentou extrapolar suas conclusões para qualquer lodo e qualquer ETE (conclusões 1, 5 e 6).

Oberacker *et al.* (2002) afirmaram que o lodo de ETA era capaz de eliminar fósforo do esgoto por adsorção em óxidos de ferro, e reduzir a formação de H<sub>2</sub>S por precipitação de sulfetos férricos. A principal vantagem, segundo os autores, é que não seria necessária a construção de ETLs (Estações de Tratamento de Lodo) nas estações de água, uma vez que poder-se-iam utilizar as instalações de tratamento de lodo da ETE. Este tipo de disposição é recomendado pela nova norma alemã, DIN EM 13 714, que embora aprove esta prática, determina que ela só seja utilizada se não trouxer efeitos negativos no tratamento do lodo da ETE e na sua disposição final.

Harri *et al.* (2002) apresentaram o estudo de caso de disposição do resíduo rico em alumínio da estação de tratamento de água Norsborg na ETE Himmerfjärden, Noruega. Tal procedimento apresentava-se como uma alternativa para resolver o problema de assoreamento do lago Mälaren, reservatório de água bruta. Este assoreamento tinha sido provocado pelo lançamento do lodo da ETA no reservatório durante anos. O estudo mostrou que o processamento deste resíduo na ETE afetou de forma negativa o adensamento e o desaguamento do lodo digerido. O aumento do volume de resíduos acarretou maior carga de sólidos nos digestores e nas centrifugas. O sistema de tratamento de lodo ficou menos flexível e para o desaguamento, foi necessária uma maior dosagem de polímeros. Tudo isto gerou maiores gastos com produtos químicos e com a disposição do lodo da ETE. Um efeito positivo notado foi que esta prática propiciava redução de fósforo no clarificado. A remoção de fósforo aumentou de 47 para 57% com a adição do lodo de ETA. Notou-se, no lodo desaguado, diminuição dos teores de alguns metais (alumínio, cromo e zinco). Estes teores, antes da adição do lodo da ETA, eram: 147000 mg Al.kg<sup>-1</sup> SS, 27 mg Cr.kg<sup>-1</sup> SS e 31 mg Zn.kg<sup>-1</sup> SS. A Figura 2 indica as variações dos teores de cromo, zinco e alumínio sem

o uso do resíduo, após a adição de 50% dos resíduos produzidos na ETA e após a aplicação de todo o lodo da ETA Norsborg. Em longo prazo, a aplicação do resíduo de ETA na ETE seria viável apenas se a capacidade do sistema de tratamento de lodo fosse aumentada.

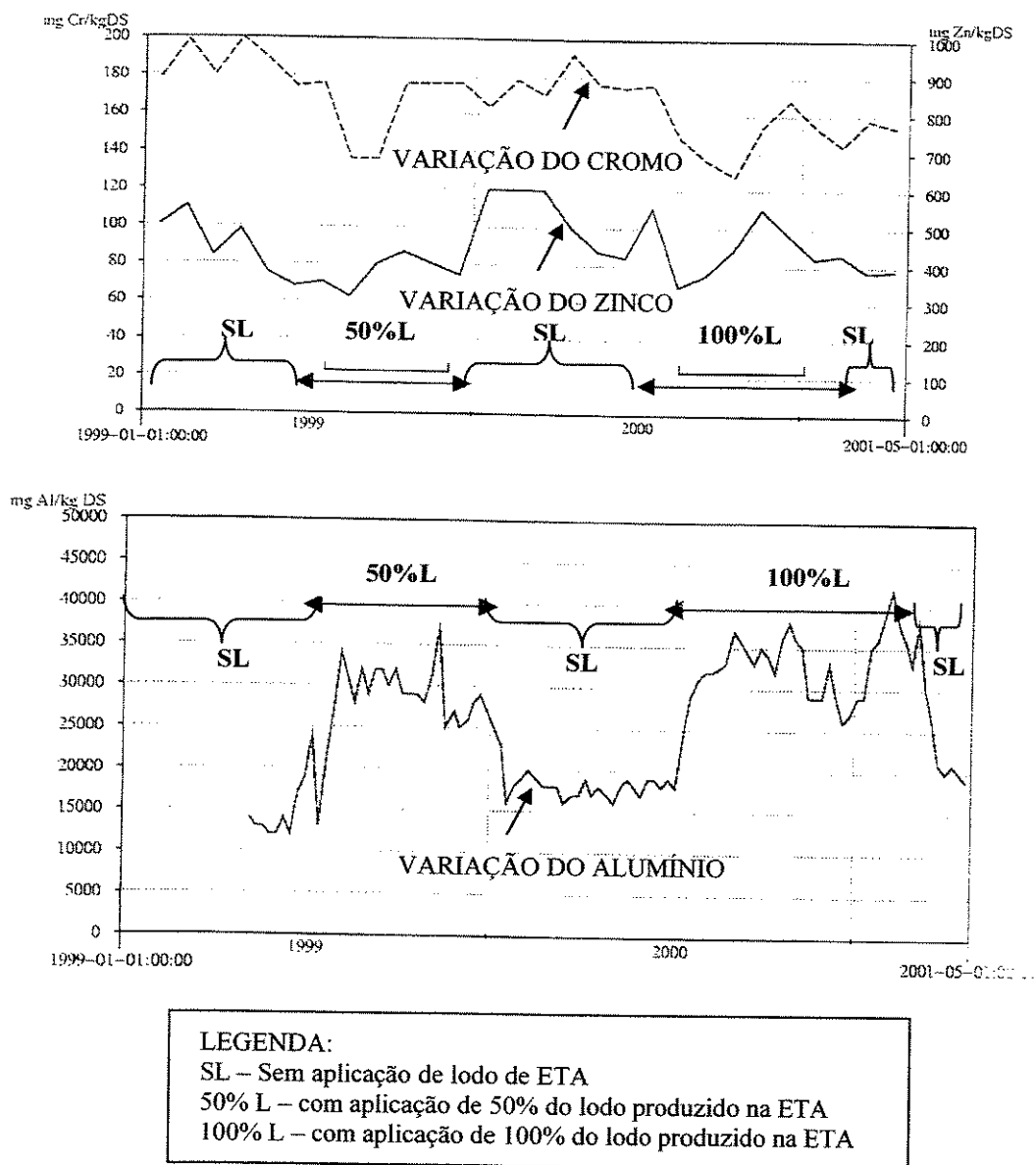


Figura 2 – Variação dos teores de cromo, zinco e alumínio no lodo da ETE com a aplicação de lodo de ETA. (Fonte: HARRI *et al.*, 2002).

Scalize (2003) realizou ensaios para avaliar os efeitos da aplicação do lodo da ETA São Carlos em uma ETE. Ele realizou o trabalho em duas fases. Na primeira, foram estimados os efeitos

produzidos nos decantadores primários da ETE, após receber o resíduo da ETA, resultante da coagulação com sulfato de alumínio. Para tanto, foram realizados ensaios em colunas de sedimentação. Foram analisadas 4 colunas: uma sem adição de lodo de ETA; as outras três com a mesma combinação de lodo de decantador (19,89%) e água de lavagem dos filtros (80,11%), mas com diferentes concentrações de sólidos em suspensão totais (SST) no lodo de decantador (1, 3 e 5 g/L). Analisando o sobrenadante, o autor obteve os resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados das análises do sobrenadante da coluna de sedimentação sem e com a adição do lodo de ETA.

| Parâmetros   | Controle<br>(sem lodo)       | SST do lodo do<br>decantador = 1 g/L | SST do lodo do<br>decantador = 3 g/L | SST do lodo do<br>decantador = 5 g/L |
|--|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|  | Após 120 min de sedimentação |                                      |                                      |                                      |
| SST (mg/L)   | 112                          | 106                                  | 98                                   | 94                                   |
| SSV (mg/L)   | 96                           | 88                                   | 78                                   | 76                                   |
| Cor (UC)   | 1419                         | 1275                                 | 1236                                 | 1024                                 |
| Turbidez (UT)  | 79,1                         | 65,6                                 | 64,6                                 | 63,2                                 |
| DQO (mgO <sub>2</sub> /L)                              | 357                          | 313                                  | 301                                  | 292                                  |
| Coliformes Totais<br>(NMP/100mL)x10 <sup>5</sup>       | 2,76                         | 2,76                                 | 2,55                                 | 2,31                                 |
| <i>Escherichia Coli</i><br>(NMP/100mL)x10 <sup>5</sup> | 1,19                         | 1,05                                 | 0,73                                 | 0,62                                 |
| <i>Ancylostomidae</i> (Ovos/L)                         | 6                            | 3                                    | Não Detectado                        | Não Detectado                        |
| <i>Strongyloides</i> (Larvas/L)                        | 2                            | Não Detectado                        | Não Detectado                        | Não Detectado                        |

Fonte: SCALIZE (2003)

O pesquisador constatou maiores quantidades de sólidos totais (ST) e menores valores de resistência específica nos lodos adensados, obtidos nas colunas nas quais foi adicionado o resíduo da ETA. Os resultados encontrados foram: ST igual a 14 g/L e resistência específica (RE) =  $8,47 \times 10^3$  m/kg na coluna controle e ST = 25 g/L e RE =  $2,11 \times 10^3$  m/kg na coluna onde foi adicionado 5 g/L de lodo de ETA. O autor realizou, ainda, o teste de atividade metanogênica e verificou que a adição do lodo reduziu a concentração molar de metano (de 0,055 mol/L no frasco controle para 0,040 mol/L no reator com maior quantidade de ST de lodo do decantador), influenciando negativamente no desenvolvimento das bactérias metanogênicas. Scalize (2003) concluiu, desta primeira etapa, que o resíduo da ETA São Carlos podia apresentar interferências negativas na digestão anaeróbia do lodo produzido em decantadores primários de uma ETE.

Na segunda etapa, o pesquisador analisou a aplicação do lodo de cloreto férrico da ETA-Fonte de Araraquara em uma estação piloto, composta de lagoa aerada seguida de lagoa de sedimentação. Foi verificado que tal resíduo melhorou a qualidade do efluente com relação aos parâmetros: DQO, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), SST, Turbidez, Cor, Amônia, Nitrato, NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl) e Fósforo Total (Tabela 11). Ao realizar exame microscópico, o autor não constatou influência negativa do lodo da ETA no conteúdo das lagoas aeradas. Houve, no entanto, maior produção de lodo, sendo que a quantidade de sólidos sedimentáveis presentes na lagoa que recebeu resíduo de ETA foi, em média, 5,3% maior que na lagoa que não recebeu tal resíduo. A resistência específica apresentada pelo lodo gerado no sistema que recebeu lodo ( $1,42 \times 10^{13}$  m/kg) foi menor que aquela do sistema onde isto não ocorreu ( $4,44 \times 10^{13}$  m/kg). Foi constatado que, para uma mesma concentração de sólidos em suspensão totais (128 g/L) no líquido após centrifugação por 30 minutos, foram necessários para a clarificação 2,0 g de polieletrólito/kg de SST para o lodo da lagoa que recebeu o resíduo de ETA e 3,5 g de polieletrólito/kg de SST para o lodo da lagoa sem adição de resíduo. O pesquisador afirmou que os teores de Fe e Mn na torta do lodo da ETE-Piloto que recebeu o resíduo da ETA foram praticamente o dobro das apresentadas na lagoa controle. Na lagoa com lodo de ETA e na lagoa sem lodo foram encontrados, respectivamente, os seguintes valores: Ferro – 81,8 e 37,1 g Fe /kg ST e Manganês – 0,7 e 0,3 g Mn/kg ST. Como conclusão, o autor ressaltou que não houve interferências significativas que pudessem impedir o lançamento do resíduo da ETA-Fonte na ETE-Araraquara.

Tabela 11: Características do afluente de lagoas aeradas e do efluente de lagoas de sedimentação, com e sem dosagem de lodo de ETA.

| Parâmetros                               | Afluente      | Efluente                    |                      |
|--|---------------|-----------------------------|----------------------|
|  |               | Lagoa com aplicação de lodo | lagoa controle       |
| DQO (mgO <sub>2</sub> /L)                | 615 – 859     | 36 - 90                     | 39 - 123             |
| DBO <sup>(1)</sup> (mgO <sub>2</sub> /L) | 241 – 349     | 12 - 33                     | 16 - 32              |
| SST (mg/L)                               | 76 – 306      | 6 - 18                      | 9 - 31               |
| Turbidez <sup>(2)</sup> (UT)             | não realizado | 15 - 57                     | 15 - 52              |
| Cor (UC)                                 | não realizado | 30 - 61                     | 32 - 77              |
| Amônia (mgN/L)                           | 0,48 - 23,52  | não detectado - 0,41        | não detectado - 0,49 |

| Parâmetros            | Afluente      | Efluente                    |                |
|-----------------------|---------------|-----------------------------|----------------|
|                       |               | Lagoa com aplicação de lodo | lagoa controle |
| Nitrato (mgN/L)       | 0,16 - 0,70   | 4,72 - 17,36                | 7,80 - 20,38   |
| NTK (mgN/L)           | 23,52 - 32,70 | 2,52 - 5,88                 | 4,20 - 12,60   |
| Fósforo Total (mgP/L) | 6,10 - 12,64  | 3,81 - 5,50                 | 4,60 - 6,74    |

LEGENDA:

<sup>(1)</sup> DBO com lodo superou a apresentada na lagoa sem lodo apenas duas vezes em treze determinações

<sup>(2)</sup> Turbidez com lodo superou a apresentada na lagoa sem lodo apenas uma vez em treze determinações

Fonte: SCALIZE (2003)

Melo *et al.* (2003), por sua vez, estudaram o impacto do lançamento do lodo da ETA na ETE da cidade de Franca, que trata uma vazão média de 350 L/s. Os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões: (1) o recebimento de lodo de ETA não reduziu a eficiência dos decantadores primários na remoção de DQO (antes do recebimento do lodo de ETA: 29 a 54%; depois: 22 a 49%), DBO (antes: 23 a 46%; depois 25 a 37%) e SST (antes: 41 a 70%; depois: 37 a 72%), salvo no mês de dezembro de 2002, quando o volume recebido foi consideravelmente superior ao usual; (2) não se observaram alterações significativas na turbidez (antes: 4 a 10 NTU; depois: 4 a 12 NTU) e na cor do efluente final (antes: 63 a 154 U.C.; depois: 58 a 148 U.C.); nem na eficiência de remoção de DQO (antes: 90 a 95%; depois: 90 a 97%) e DBO (antes: 96 a 98%; depois: 95 a 99%); (3) na fase sólida, a principal ocorrência foi o aumento do teor de sólidos, considerado pelos autores, benéfico em termos de operação; (4) o sistema de desaguamento do lodo mostrou um aumento progressivo na produção de biossólidos após o recebimento de lodo de ETA com maior teor de sólidos (antes: 2 a 4%ST; depois: 4 a 14%ST). Também foi verificado um aumento no consumo de polímero, uma vez que houve aumento na quantidade de lodo gerado pela ETE (após o envio do lodo de ETA, a produção cresceu em 30%); (5) a dosagem de polímero para o desaguamento do lodo diminuiu nos meses em que o teor de sólidos do lodo afluente ao filtro-prensa aumentou (menor quantidade de polieletrólito por tonelada seca); (6) a umidade no biossólido reduziu – o lodo de ETE apresentava umidade em torno de 80% e com a inclusão do lodo de ETA, esta foi diminuída para 70 a 75%. Outro ponto importante foi a redução do custo do transporte – com a redução do teor de umidade mencionada, houve aumento na

capacidade de transporte do lodo até a área agrícola (destino final do biossólido); (7) com o recebimento do lodo da ETA, verificou-se uma maior incidência de manutenção nas bombas de alimentação, homogeneização dos biodigestores e nos filtros prensa de esteira (Belt-press), principalmente em relação às telas de prensagem e filtração. Esta ocorrência parece estar relacionada a uma maior abrasão provocada pelo lodo da ETA; (8) nas análises do biossólido produzido após o recebimento do lodo de ETA, apenas alguns parâmetros sofreram alterações, entre eles: molibdênio (antes: 2,69 a 6,03 mg/kg; depois: 1,65 a 9,85 mg/kg), ferro (antes: 874,22 a 34890,00mg/kg; depois: 7360,00 a 89145,54 mg/kg), helmintos (antes: 9 a 58 ovos/g.b.s; depois: 18 a 47 ovos/g.b.s). No entanto, foi destacado pelos autores que o sulfato férrico prejudicava as análises parasitológicas. Não foi constatada nenhuma ocorrência que inviabilizasse a sua utilização na agricultura - segundo a norma da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB), que foi baseada na parte 503 da legislação americana e que está sendo revista – Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices (ESTADOS UNIDOS, 2002).

Um dos autores do estudo, ao ser consultado pela pesquisadora (BUENO, 2004), descartou a hipótese de que a ociosidade da ETE Franca tivesse sido decisiva para possibilitar o lançamento do lodo de ETA sem maiores problemas. Ele apontou como fator mais importante, a possibilidade de manobra interna para estocagem e transporte do lodo de ETA. Algumas obras pequenas foram feitas para facilitar o transporte interno, propiciando uma gestão adequada e de baixo custo. Ele afirmou que a relação mássica lodo de ETA/lodo de ETE mais freqüente é da ordem de 20 a 30%. Esta proporção varia de acordo com a época do ano, atingindo ou superando os 30% na época de chuvas e ficando próximo de 20% na época seca.

Segundo publicação da EIDN (2000), o sistema de tratamento e disposição conjunta de lodos de ETAs e ETEs apresenta os seguintes benefícios: centralização do tratamento de lodo; redução dos custos para disposição (inferior àquela praticada pelos aterros) e com unidades de tratamento; minimização de problemas associados aos monômeros de polieletrólitos em ETAs. A mesma fonte recomenda que caso sejam misturados lodos de diferentes ETAs, tenha-se um controle cuidadoso para evitar impactos no esgoto e nos processos de tratamento de lodo. A mistura de lodo de ETA com o lodo de ETE não deve conter mais que 10% do primeiro. O mesmo autor apresentou como desvantagens deste método as seguintes: redução do valor de condicionador do solo do produto final; gastos adicionais com contêineres para transporte do lodo da ETA para a

ETE; mais tanques de armazenamento podem ser necessários; potencial impacto na disposição planejada para o lodo da ETE.

### 3.4.3. Indústrias de cimento

Vários elementos químicos existentes na composição do lodo podem ser úteis para aplicação em indústrias. O lodo pode ser usado como fonte de menor custo de óxidos dos seguintes elementos: cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg), enxofre (S), sódio (Na), potássio (K) e manganês (Mn). Além disso, ele possui grande quantidade de areia e argila em sua composição, o que pode ampliar seu uso.

Os materiais naturais usados na produção do cimento são calcário, xisto e argila. Os elementos cruciais para a produção do cimento são: cálcio, sílica, alumínio e ferro. O calcário, que corresponde a 70 a 80% do total de matéria prima utilizada, contém baixos teores de Al, Si e Fe. Para atingir as quantidades ideais de cada elemento, as indústrias de cimento adicionam outros materiais como argilas, xistos, minério de ferro e bauxita. O resíduo, gerado pelo abrandamento da água por cal ou pelo sistema convencional de tratamento, comumente contém quase todos os elementos-chave que as indústrias de cimento precisam em seu processo de produção. O lodo pode aumentar potencialmente os teores destes elementos essenciais, o que reduziria o volume total de materiais suplementares que a indústria teria que comprar e adicionar. A diminuição de matéria prima requerida pode reduzir os custos da indústria. Além disso, o lodo apresenta menor quantidade de álcalis que o xisto e a argila e com menor teor deste elemento, as chances de ocorrência de expansão e fissuras nas estruturas de concreto é bem menor.

Por outro lado, existem algumas propriedades químicas associadas ao lodo que são danosas à produção de cimento, como a de matéria orgânica, de antracito e/ou carvão ativado granular (CAG), enxofre, permanganato de potássio e altas concentrações de metais pesados.

A Taiheiyo Cement Corporation (2003) afirmou que nas 10 indústrias de cimento da corporação, localizadas no Japão, são utilizados, 6,64 milhões de toneladas de resíduos e subprodutos como matéria prima e combustível. Isto representa 280kg de resíduo para cada tonelada de cimento produzida. A meta desta companhia para 2010 é atingir a quantia de 400kg de resíduo por

tonelada de cimento, promovendo a transformação de cinza de incinerador de resíduo sólido domiciliar, lodos de ETAs e de ETEs em matérias primas para o cimento. Para este fim, eles têm desenvolvido novas tecnologias e investido em equipamentos que facilitam, por exemplo, o uso de matérias primas ricas em cloro. Em 2002, os consumos de lodo de ETA, de ETE e de cinza somaram 192.076 toneladas. A preocupação da Taiheiyo Cement em efetuar a reciclagem de resíduos deve-se, principalmente, aos problemas que o Japão enfrenta com a falta de espaço para aterros sanitários.

Godbold *et al.* (2003) estudaram a aplicação de cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto misturado com resíduo de tratamento de água com alumínio como aditivo do cimento. Os pesquisadores consultaram três indústrias de cimento, a fim de avaliar o interesse das mesmas pelo uso do lodo. Duas informaram que já estavam pesquisando este uso. Uma destas indústrias, a Lafarge Cement UK, fez uma parceria com a Geodur International AG (GIAG) para desenvolver matéria prima alternativa e abastecer a cimenteira por três anos. A GIAG considerou o lodo de ETA um material muito útil por ser rico em ferro e alumínio e não conter altos teores de metais pesados. Esta empresa mostrou que:

- podia-se usar cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto para substituir 25% dos componentes da sílica ou lodo de ETA em lugar de 30% desta matéria prima;
- podia-se substituir 20% do alumínio por lodo de ETA ou cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto;
- podia-se usar cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto para substituir 25% do ferro ou lodo de ETA para substituir 30%.

A outra empresa que vem testando este uso é a Castle Cement, que está participando de uma pesquisa junto a Millennium Science and Engineering para encontrar materiais alternativos, a fim de reduzir o volume de argila retirado na jazida. O projeto teve início em julho de 2002 com perspectivas de se encerrar em abril de 2003 (a pesquisadora tentou entrar em contato com os autores do trabalho para saber se o estudo havia encerrado e se haviam conclusões adicionais, mas não obteve retorno). A Castle Cement tinha interesse em qualquer material residual proveniente do tratamento de água ou esgoto que contivesse teores adequados de sílica e dos óxidos de alumínio, cálcio e ferro.



As duas empresas consideraram aceitáveis as composições químicas de ambos os resíduos (de ETA e ETE), desde que contaminantes como fósforo e sulfato pudessem ser diluídos quando misturados às demais matérias primas.

A fim de determinar a viabilidade comercial da inclusão destes resíduos no cimento, a garantia de abastecimento regular de matéria prima e a economia com transporte foram consideradas detentoras da mesma importância que a composição qualitativa dos resíduos. Este estudo de viabilidade foi recomendado para trabalhos futuros.

#### 3.4.4. Concreto

Hoppen *et al.* (2003) estudaram a aplicação de lodo de ETA no concreto. Conforme os autores, a incorporação do lodo centrifugado de ETA em matriz de concreto pode ser uma alternativa para minimizar os impactos oriundos da disposição inadequada em corpos d'água. Inicialmente, foi realizada a caracterização do lodo da ETA Passaúna (Paraná). Foram coletadas amostras diárias por dois meses, com a finalidade de avaliar a variabilidade físico-química do lodo ao longo do tempo. Para a caracterização das amostras de lodo de ETA, foram determinados: umidade; pH; perda ao fogo, concentração de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Foi também realizada a caracterização mineralógica dos aglomerantes e agregados. Produziram-se corpos de prova com adição de 3% de lodo em relação à massa seca de areia. Confeccionou-se um corpo de prova sem a introdução do lodo, para servir de referência. Foram avaliadas as propriedades do concreto fresco, como abatimento do tronco de cone e do concreto endurecido, como resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias.

Hoppen *et al.* (2003) concluíram que a mistura de 3% de lodo no concreto podia ser utilizada para fabricação de artefatos, estruturas pré-moldadas, pavimentos em concreto, pois: (1) alguns dos componentes do concreto (teores de material pulverulento e impurezas orgânicas na areia) não atenderam as normas, mas não comprometeram as propriedades do concreto endurecido; (2) o lodo da ETA Passaúna apresentou grande presença de sílica e alumínio (em torno de 13,42% e 22,21%, respectivamente) e teor de umidade em torno de 87%; (3) nos ensaios de resistência à compressão, tanto o concreto referência como o com traço de 3% de lodo, apresentaram valores acima de 25 MPa para os 7 e 28 dias. Os autores também recomendaram a realização de ensaios

específicos durante a confecção das peças. Não foi avaliada a viabilidade ambiental da incorporação.

Em complemento ao trabalho anteriormente citado, Hoppen (2004) sugeriu ensaios adicionais para avaliar a viabilidade técnica da incorporação do lodo no concreto: resistência à tração, absorção, módulo de deformação e permeabilidade. Ressaltou, porém, que mesmo que o concreto no qual foi adicionado lodo de ETA atingisse os padrões necessários para utilização em concreto estrutural, este uso deveria ser evitado pelo desconhecimento das interações químicas existentes entre o mesmo e o concreto e, principalmente, pela provável ocorrência de atividade corrosiva.

Buttler et al. (2003) estudaram a incorporação dos lodos das ETAs Rio Claro e São Carlos e das frações graúda e miúda do agregado reciclado (recolhido de diversas obras localizadas em São Carlos) em matrizes de concreto. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos concretos preparados com diferentes tipos de agregado (naturais e reciclados) e dosagens de lodo. O traço (em massa) para o concreto de referência (com agregados naturais) foi de 1:2:3 e a relação água/cimento (a/c) igual a 0,53. Os lodos foram adicionados aos concretos em teores que se situaram entre 1 a 5%, em substituição à fração miúda. Foram estudados:

- 1) concreto de referência;
- 2) concreto referência com 0,5% lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,53);
- 3) concreto referência com 1% de lodo da ETA São Carlos (a/c= 0,53);
- 4) concreto referência com 2% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,54);
- 5) concreto referência com 3% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,54);
- 6) concreto referência com 4% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,55);
- 7) concreto referência com 5% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,55);
- 8) concreto reciclado (a/c = 0,78);
- 9) concreto reciclado com 1% de lodo da ETA São Carlos (a/c=0,77);
- 10) concreto reciclado com 2% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,78);
- 11) concreto reciclado com 3% de lodo da ETA São Carlos (a/c= 0,78);
- 12) concreto reciclado com 4% de lodo da ETA São Carlos (a/c = 0,79);

13) concreto reciclado com 5% de lodo da ETA São Carlos ( $a/c = 0,79$ );

14) concreto referência com 1% de lodo da ETA Rio Claro ( $a/c = 0,53$ );

15) concreto referência com 3% de lodo da ETA Rio Claro ( $a/c=0,54$ );

16) concreto referência com 5% de lodo da ETA Rio Claro ( $a/c = 0,55$ ).

Os resultados obtidos nos testes mecânicos com o agregado natural e reciclado foram comparados, concluindo-se que:

a) para concretos preparados com agregados naturais:

➤ a adição de lodo de ETA, em porcentagem inferior ou igual a 3% (massa/massa em relação ao agregado miúdo), possibilitou acréscimo na resistência à compressão, sendo que a maior resistência foi obtida com 0,5% de lodo;

➤ todos os traços estudados apresentaram valores de absorção inferiores aos obtidos com o traço de referência (sem acréscimo de lodo).

b) Para concretos preparados com agregados reciclados:

➤ a adição de lodo provocou um decréscimo na resistência comparativamente à referência (agregados naturais).

➤ O acréscimo de lodo no concreto com agregados reciclados elevou a absorção em relação ao concreto de referência. No entanto, a adição de lodo reduziu a absorção quando comparada à do concreto com agregados reciclados sem lodo.

Os autores concluíram ainda que, para o caso estudado, a origem do lodo não era um fator que influenciava significativamente a resistência à compressão e a absorção. Enfatizaram, ainda, a potencialidade do uso de tais materiais na construção civil, especialmente para confecção de elementos não estruturais de concreto.

#### 3.4.5. Agricultura

A aplicação na agricultura é uma das formas de disposição de lodo de ETAs comumente utilizada. Vários estudos (CORNWELL *et al.*, 2000; WHORTON *et al.* 2002; GODBOLD *et al.*,

2003) demonstraram que a aplicação de lodos de ETAs na agricultura não provoca impactos significativos ao crescimento das espécies vegetais. Alguns benefícios associados à adição de resíduos de ETAs em solos agricultáveis são: melhoria da estrutura, ajuste do pH, adição de traços de minerais, aumento da capacidade de retenção de umidade e aeração do solo.

Este tipo de disposição também apresentou aspectos negativos tais como: a tendência do ferro do resíduo de capturar o fósforo disponível para a planta e do alumínio causar problema de toxicidade para a mesma, caso o pH do solo não fosse mantido em valores iguais ou inferiores a 6,5.

A aplicação de lodo no solo pode ser feita na forma líquida ou desaguada. Neste último caso, é importante considerar: a distância entre a estação de tratamento e o local de aplicação, a disponibilidade de áreas para estocagem, a quantidade de água contida no resíduo e as preferências do agricultor que fará uso do lodo. A utilização na forma líquida, embora traga vantagens, tais como maior dispersão e menor formação de torrões no solo, é de difícil transporte e armazenagem, tornando este método muitas vezes inviável.

Outro cuidado que se deve ter com a aplicação do resíduo, principalmente na forma líquida, é realizar análises para garantir que não haja elementos tóxicos, que possam ser carreados, contaminando o solo e o lençol freático.

Dillon *et al.* (1996) apud Godbold *et al.* (2003) registraram que a adição de resíduos de estação de tratamento de água, condicionados com cal, a um solo ácido, trouxe benefícios ao crescimento de plantas. O aumento de pH resultante compensou qualquer decréscimo na disponibilidade de fósforo, geralmente constatado quando há aplicação de coagulantes de alumínio no solo.

Alguns estudos de caso do uso de lodo de ETA na agricultura foram citados em Cornwell *et al.* (2000). A Cobb County-Marietta Water Authority investigou possíveis alternativas de disposição. Considerou as aplicações na agricultura e em aterros as mais interessantes. Por fim, concluiu que o uso na agricultura era a melhor alternativa, devido à quantidade de fazendas que existiam nas proximidades da ETA, à economia que esta disposição proporcionava, aos custos operacionais e ao curto tempo de planejamento necessário para que o programa pudesse ser iniciado. O resíduo foi aplicado superficialmente no solo em uma taxa de 5 a 15 toneladas secas/acre.

A New Jersey Water Supply Authority (NJWSA), por sua vez, desagua o lodo em lagoas e depois o aplica em plantações de feno em sua propriedade rural (20 toneladas secas/acre). Um agricultor

utiliza a área para o cultivo. Ele não paga taxa pelo uso do solo, mas uma porcentagem da produção fica para a concessionária de serviços de saneamento (CORNWELL *et al.*, 2000).

Muitas vezes, é utilizado o processo de compostagem para preparar o lodo que será aplicado na agricultura. Este consiste na aceleração dos processos biológicos naturais de mineralização. Ele possibilita uma transformação biológica na fração orgânica que leva à estabilização e redução no peso e volume do produto final – o composto. O material final obtido é de natureza orgânica, sendo estável e muito similar ao húmus (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2004). Este processo é ecológico, dinâmico e complexo e a temperatura e assimilação de nutrientes são variáveis com a atividade microbiana. É recomendável que se utilize o lodo de ETAs para compostagem, evitando, desta forma, teores de metais pesados e outros produtos inapropriados para agricultura. Com o objetivo de uso agrícola, o lodo deve ser processado para reduzir a umidade, aumentar a proporção Carbono/Nitrogênio (C/N), alterar a estrutura física e diminuir a presença de microrganismos patogênicos.

#### 3.4.6. Disposição no solo

O resíduo de ETA pode ser usado na recuperação do solo, a fim de reabilitá-lo para o crescimento de plantas, ao contrário do uso na agricultura, onde ele funciona como um condicionador. Esta prática pode ser adotada em áreas susceptíveis a erosões, como locais que foram utilizados para extração de mineral ou onde se desenvolveram outras atividades, nas quais era necessária a remoção do solo de superfície (CORNWELL *et al.*, 2000).

A Water Services Association of Australia (1997) conduziu uma investigação entre 1993 e 1996, para identificar o potencial do uso do lodo de ETA como condicionador do solo ao invés de dispô-lo em aterros. Segundo a associação, para que ele tivesse esta destinação, era necessário, antes de tudo, saber se algumas de suas propriedades físicas ou químicas poderiam afetar o meio ambiente. Na literatura técnica não havia evidências deste tipo de problema, porém os estudos tinham sido realizados em outros países, em solos e condições ambientais diferentes dos existentes na Austrália. Os quatro objetivos do projeto foram: 1) determinar o teor de alumínio solúvel no lodo em comparação com solos naturais, 2) determinar o teor de alumínio solúvel em um solo ácido do Waite Research Institute sem e com lodo e cal, em várias proporções, 3)

determinar os efeitos de adicionar lodo em solos, em diferentes dosagens, no crescimento de gramíneas e 4) avaliar a utilização de lodo como ingrediente em misturas comerciais para plantio de pequenas mudas.

Em laboratório e experimentos de campo, o lodo não apresentou efeitos prejudiciais nem teor de alumínio solúvel acima dos valores encontrados para os solos naturais da Austrália. Ao contrário, algumas propriedades benéficas foram identificadas, incluindo: baixa densidade, alta taxa de infiltração, abundância de nitrogênio disponível, pH maior que 7,0, e uma equivalência de carbonato de cálcio. Quando foram adicionados areia e outros materiais, o lodo apresentou propriedades favoráveis quando comparado com outras misturas disponíveis no mercado. O rendimento das plantas germinadas no lodo ou em misturas que continham este material foi maior ou igual ao rendimento daquelas germinadas no solo. A principal limitação agrônômica deste lodo foi a sua alta capacidade de fixação de fósforo.

Gallimore *et al.* (1999) estudaram a viabilidade de utilizar os resíduos de duas ETAs (ABJ e Wister) no controle da lixiviação de fertilizantes de um solo agrícola adubado com esterco de galinha. O lodo foi aplicado no solo em uma taxa de 11,2 a 44,8 mg ha<sup>-1</sup>. Os autores concluíram que a habilidade do lodo de reduzir a carga de fósforo lixiviada do solo dependia do teor de alumínio amorfo no resíduo. Constataram, também, que as propriedades do lodo variavam com os produtos químicos utilizados no tratamento da água e com a qualidade da água bruta; acarretando uma variação na sua capacidade de reação com os nutrientes. Ainda segundo tais pesquisadores, a aplicação de lodo no solo pode funcionar como alternativa à disposição em aterros e trazer economia financeira para ETAs, além de proteger a qualidade da água superficial.

Basta *et al.* (2000) apresentaram um estudo analisando três amostras de lodo provenientes de estações diferentes (Wister, Mohawk e ABJ) e um solo que foi utilizado para controle. O principal objetivo desta experiência era determinar a habilidade do lodo de substituir o solo na recuperação de áreas degradadas. Pretendia-se ainda descobrir se ele servia de suporte para o crescimento de plantas, além de determinar se o uso de fertilizantes ricos em fósforo poderia eliminar a deficiência deste nutriente.

Os autores concluíram que os resíduos das estações Mohawk e Wister podiam ser utilizados para a recuperação do solo. Por outro lado, o resíduo da estação ABJ não se mostrou adequado para o crescimento da vegetação por apresentar baixa disponibilidade de fósforo. Porém, por possuir a

característica de alta adsorção de fósforo, o resíduo da ABJ podia ser aplicado para controle das cargas difusas deste nutriente em solos agrícolas. Eles concluíram ainda que a adição de fósforo ( $200\text{mg P kg}^{-1}$ ) no lodo não aumentou a disponibilidade do nutriente para as plantas. No entanto, quando esse nutriente foi aplicado no solo, proporcionou maior crescimento da vegetação e maior quantidade de fósforo no tecido das plantas.

Cornwell *et al.* (2000) relataram a experiência da Bradford City Water Authority (BCWA). A BCWA estudou uma série de alternativas para disposição de resíduos acumulados em lagoas e selecionou a recuperação de solo como a melhor alternativa. Os resíduos, após serem desaguados, foram aplicados em uma cava abandonada da qual se extraía areia. A aplicação consistiu na disposição de aproximadamente 15 centímetros de resíduos sobre  $8093,71\text{ m}^2$  de área a ser recuperada. Para aumentar o teor de nutrientes, foram misturados ao solo, resíduos resultantes da poda de jardins. Após o término da aplicação, uma mistura de sementes de gramíneas foi introduzida na área para iniciar o processo de revegetação. Estas sementes germinaram e rapidamente cobriram a área. Este uso produziu uma significativa redução de custos para a BCWA, além de mostrar resultados satisfatórios naquilo que se propôs.

Este tipo de aplicação pôde ser realizado, pois, apesar do resíduo da estação de tratamento de água possuir poucos nutrientes, ele contém argila, areia, silte e traços de minerais que podem ajudar no crescimento das plantas.

Dayton *et al.* (2001) realizaram um estudo de caracterização do lodo de ETA para verificar a possibilidade de utilizar este resíduo sólido para recuperação de áreas degradadas. Para tanto, caracterizaram 17 resíduos de estações de tratamento de água e compararam suas propriedades físicas e químicas com as características do solo. Analisaram também a existência, no lodo, de nutrientes benéficos para as plantas. Segundo os autores, o lodo tem qualidades similares à de alguns solos e em alguns casos, pode substituí-lo em suas aplicações. No estudo realizado, a função esperada do lodo era que este auxiliasse no crescimento de plantas, sem causar danos ao meio ambiente. As propriedades físicas e químicas dos lodos avaliados mostraram-se adequadas ao crescimento das plantas. No entanto, baixas concentrações de água disponível para a planta e a grande densidade de alguns lodos podiam torná-los impróprios para este uso. Quantificando, nas amostras de lodo, os teores de nutrientes disponíveis, todos foram considerados adequados (N e

K), com exceção do fósforo. Os pesquisadores afirmaram, no entanto, que algumas deficiências de nutrientes deveriam ser corrigidas com acréscimo de fertilizantes.

Oberacker *et al.* (2002) investigaram procedimentos de manejo sustentável do lodo de ETA contendo arsênio. Primeiramente, eles escolheram uma estação de tratamento de água subterrânea e a otimizaram. Como resultado, a produção anual de lodo reduziu em 50 % (m/m), enquanto o teor de arsênio no mesmo diminuiu significativamente em relação ao teor de ferro. Para um mesmo teor de ferro, o de arsênio passou de valores superiores a 0,80 g/Kg (massa seca) para valores inferiores a 0,70 g/Kg (massa seca). Em uma segunda etapa, os pesquisadores analisaram os efeitos da aplicação deste resíduo em uma estação de tratamento de lodo de esgoto. Ali, 18,6 t (massa seca) de lodo da ETA foram desaguados, secos e incinerados junto com 900 t (massa seca) de lodo de esgoto. O arsênio foi totalmente transferido para as cinzas. Anteriormente ao acréscimo do lodo da ETA, as cinzas oriundas da incineração do lodo da ETE eram dispostas em minas desativadas, e este procedimento continuou a ser efetuado nas novas condições. Desta forma, o arsênio poderá retornar à crosta terrestre e então ser retirado da biosfera em longo prazo. Oberacker *et al.* (2002) afirmaram que a lixiviação do arsênio contido nas cinzas de lodo era insignificante, devido à formação de hematita e a presença de quantidades substanciais de cálcio. É sabido que o cálcio influencia a precipitação do arsênio, sobretudo, em materiais que sofreram tratamento térmico.

O Departamento de Saúde Pública e Ambiente do Colorado (COLORADO, 2004) elaborou um documento para regulamentar e assegurar que a aplicação do lodo de ETA no solo constitui um uso benéfico que não afeta negativamente a saúde pública. Tal documento estabelece regras e normas para o projeto e a operação de locais de disposição deste tipo de lodo.

Segundo estes regulamentos, nenhum produtor de lodo pode vender, distribuir ou fornecer este resíduo para uso no solo, sem que: (1) tenha submetido um plano de uso benéfico ao Departamento de Saúde Pública e tenha enviado uma cópia deste plano para a autoridade de saúde local, dissertando sobre a aplicação; (2) tenha obtido permissão do provável usuário do resíduo para realizar o monitoramento constante do plano; (3) tenha repassado cópia das normas e regulamentos para o usuário em potencial; (4) o Departamento tenha emitido um certificado de uso benéfico da atividade.



O plano de uso benéfico deve conter, entre outros itens: (1) descrição do solo onde o lodo de ETA será aplicado; (2) a taxa de aplicação em libras de lodo/acre; (3) os tipos de vegetação que serão produzidos no solo em questão; (4) a área, em acres, a ser utilizada por tipo de vegetação; (5) a determinação dos seguintes parâmetros no lodo: pH, nitrogênio orgânico, nitrato, sólidos, cromo, cobre, ferro, amônia, chumbo, mercúrio, fósforo, molibdênio, potássio, níquel, alumínio, selênio, arsênio, zinco, cádmio e atividade alfa totais; (6) os documentos solicitados pela autoridade de saúde local; (7) um plano de monitoramento detalhado, identificando medidas para mitigar possíveis impactos prejudiciais da aplicação; (8) informação que o Departamento julgar pertinente para a avaliação dos impactos do uso sobre a saúde pública e o meio ambiente.

O mesmo documento determinou ainda que o uso benéfico conjunto de lodo de ETA e biossólidos (lodo de ETE) deve respeitar as normas explicitadas no “Colorado Biosolids Regulations, 4.9.0”. A co-disposição destes dois resíduos pode ser feita com mistura dos substratos anterior ou posterior à aplicação no solo. O lodo de tratamento de água não deve ser usado em raízes comestíveis, em plantas frutíferas rasteiras ou em verduras destinadas ao consumo humano direto. O lodo não pode ser utilizado quando o teste de atividade alfa total sinaliza mais que 40 picocuries por grama de lodo seco (COLORADO, 2004).

#### 3.4.7. Cerâmica

Como já foi citado, o lodo pode ser usado na produção de cimento e no concreto, que são utilizados na construção civil. Neste mesmo segmento, o resíduo pode ser aplicado na confecção de peças cerâmicas, tais como telhas, tijolos e outros blocos.

Os materiais usados na produção de tijolos têm composições químicas e físicas que muito se assemelham às características apresentadas pelo lodo. Resíduos de alumínio, ferro e cloreto de polialumínio têm propriedades físico-químicas similares a de argilas naturais e xistos utilizados nessa atividade industrial. Os resíduos de tratamento de água consistem em argila, silte e areia, além de matéria orgânica e outros compostos químicos formados durante a coagulação, floculação, sedimentação e filtração. Estes resíduos, com grande quantidade de argila, são ideais para produzir peças cerâmicas. Por outro lado, resíduos que apresentam teores significativos de cal não são admitidos para este fim (CORNWELL *et al.*, 2000).

O sucesso ou falha da utilização do lodo em peças cerâmicas depende dos seguintes fatores: proximidade entre a indústria cerâmica e a estação de tratamento de água, características físico-químicas dos resíduos, coagulantes e outros produtos químicos utilizados no processo de tratamento, aceitação deste resíduo pelos ceramistas e os impactos que este uso possa causar nas operações normais da indústria. Com o emprego do lodo, o grau de compactação torna-se menor, facilitando o processo de secagem. Porém, a quantidade de água a ser introduzida na mistura deve ser determinada convenientemente, a fim de evitar danos na extrusora (PRACIDELLI et al, 1997).

É importante notar ainda que a composição granulométrica das massas de cerâmica vermelha exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produtos. A introdução de materiais não-plásticos, como a areia e o pó de carvão, que o lodo de ETA pode possuir, em maior ou menor quantidade, altera a granulometria das massas. Isto ocorre porque a areia e o pó de carvão são constituídos de partículas de tamanhos consideravelmente maiores que as das argilas. A variação da distribuição granulométrica e da plasticidade da massa provoca alterações em seu comportamento, durante o processo.

Segundo Cornwell *et al.* (2000), indústrias cerâmicas experimentaram acrescentar o lodo em dois estágios de produção: (1) aplicação ainda na jazida – método mais fácil para misturar o resíduo com as matérias primas naturais e (2) adição do lodo na própria indústria. Estudos demonstraram que ao misturar o resíduo na jazida, ele praticamente desaparecia dentro do grande volume de argila e não apresentava nenhum efeito significativo na qualidade do produto final. Já a aplicação na indústria era muito mais trabalhosa, exigia mais atenção do operador, além de demandar locais para armazenar o lodo que chegava da ETA.

Ainda segundo Cornwell *et al.* (2000), a umidade contida no resíduo é muito importante para seu manuseio e incorporação no processo de obtenção de materiais cerâmicos. Os fabricantes preferem tortas com teores de sólidos superiores a 20%. Deve-se evitar o uso dos resíduos que contenham altos teores de compostos que possam causar expansão e fissuras ao produto final, tais como o antracito e o carvão ativado em pó (CAP). Além disso, devem ser realizadas análises para determinar se a presença de metais voláteis ocorre em quantidade que possa, no processo de queima da cerâmica, se desprender e poluir o ar.

Conforme estudo de caso apresentado por Cornwell *et al.* (2000), as cidades Cary e Apex na Carolina do Norte entraram em acordo com indústrias cerâmicas da região, a fim de substituir a disposição do lodo em aterros pelo uso na produção de materiais de construção. A mistura do resíduo às outras matérias primas era feita ainda na jazida. A contribuição do lodo da ETA como matéria prima era insignificante. Porém, tanto a indústria cerâmica quanto a estação concordaram que esta aplicação era ambientalmente correta e que poderia preservar espaço valioso nos aterros. A cerâmica cobrava US\$ 25,00/t para resíduos entregues na jazida. Infelizmente, como a indústria tinha poucos benefícios com este uso e temia efeitos na qualidade do bloco, a prática foi cessada e o resíduo voltou a ser disposto em aterros.

Huang *et al.* (2001) estudaram a utilização de lodo de ETA combinado com sedimentos de represa como matéria prima na fabricação de tijolos. Este estudo foi impulsionado pela restrição à disposição de lodos de ETAs em corpos d'água, imposta pela legislação ambiental do Governo de Taiwan. Além disso, as oito maiores barragens de Taiwan sofriam problemas sérios com a acumulação de sedimentos, que reduzia a capacidade dos reservatórios. Ainda que o resíduo e os sedimentos não fossem considerados materiais perigosos, seu depósito em aterros não era possível devido à escassez de área.

No estudo, foram utilizados os resíduos da estação de tratamento de água Chin-Tan, localizada em Taipei e os sedimentos da represa Shi-Men, situada em Taoyuan. Antes de ocorrer a sinterização, foram determinados o pH, a umidade, a volatilidade e o conteúdo de cinzas dos componentes. O lodo apresentou umidade igual a 11,53%.

O estudo confirmou que amostras secas a 105°C por 24 horas podiam ser usadas diretamente no processo de sinterização, não sendo necessária a pré-incineração. Isto era possível porque o lodo e os sedimentos tinham baixo teor de matéria orgânica. Testes de resistência sugeriram que o tijolo feito com lodo e sedimentos era seguro. A retração ao fogo do lodo era maior que a dos sedimentos, no entanto, em retrações de 40~50% do lodo não foram detectadas fissuras ou distorções na superfície do tijolo analisado. Resultados satisfatórios ocorreram quando a quantidade de lodo de ETA utilizada era inferior a 20% da mistura.

Outro estudo de caso apresentado por Cantó *et al.* (2002) foi realizado em Barcelona na ETA Saint Joan Despí. A aplicação do lodo na fabricação de tijolos tornou-se uma opção para esta ETA porque a legislação espanhola tornou-se mais restritiva. Além disso, o fato do grande

volume de resíduo produzido ser muito úmido fez com que a aplicação direta em aterros fosse rejeitada. Para usar o resíduo em cerâmica foi construída uma ETA experimental que desidrata termicamente o lodo e desagrega-o, transformando-o em pó. Este material é então vendido. Ele é composto de SiO<sub>2</sub> (50%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13%), CaO (14%), K<sub>2</sub>O (3%) e matéria orgânica (10%). Os teores de cálcio (CaO, 14%) e de matéria orgânica, que auxiliam a criar um material poroso, são corrigidos com a adição de argila. Misturando 70% do pó produzido com 30% de argila, a cerâmica obtida é aceita no mercado. A porosidade total do material é 54%, ou seja, tem baixa densidade e pode ser usada para isolamento acústico e térmico.

Como vantagens deste processo, os pesquisadores citaram que: (1) o tratamento agrega valor ao lodo, já que ele passa de resíduo para matéria prima na produção de materiais de construção; (2) este tipo de uso é aplicável em qualquer ETA; (3) preserva o meio ambiente, já que o resíduo não é disposto em rios ou no solo; (4) não causa problemas de toxicidade, devido aos altos teores de sais de alumínio, já que o resíduo fica encapsulado dentro das matrizes cerâmicas; (5) há redução na necessidade de locais para estoque de resíduo na estação e economia nos gastos com transporte, além de ser uma tecnologia limpa que pode ajudar a ETA a conseguir a certificação ISO 14001.

Cosin *et al.* (2002) investigaram o potencial de uso de um lodo proveniente da ETA de uma indústria como constituinte de massas de cerâmica vermelha. Para isto, o lodo foi misturado a um taguá da região de Jundiaí (SP), utilizado na fabricação de pisos cerâmicos. Os principais objetivos do trabalho foram: (1) diminuição do impacto ambiental gerado por lodos de ETAs; (2) economia de argila; (3) menor custo do produto acabado; (4) apresentar critérios para o emprego de rejeitos com essa finalidade, ou seja, para que o seu uso se torne o mais eficiente possível.

Através de análises, os pesquisadores (COSIN *et al.*, 2002) determinaram a composição química do lodo e do taguá utilizado (Tabela 12).

Tabela 12: Composição química do Lodo da ETA de uma indústria e do Taguá Samarone.

| ELEMENTOS                      | AMOSTRAS |                |
|--------------------------------|----------|----------------|
|                                | Lodo     | Taguá Samarone |
| %                              |          |                |
| SiO <sub>2</sub>               | 8,31 %   | 54,45 %        |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,45 %   | 0,51 %         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,93 %   | 20,00 %        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 61,18 %  | 9,00 %         |
| MnO                            | 0,89 %   | --             |
| MgO                            | 0,34 %   | 2,03 %         |
| CaO                            | 5,35 %   | 3,00 %         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,15 %   | 0,35 %         |
| K <sub>2</sub> O               | 0,12 %   | 4,34 %         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,52 %   | ----           |
| Perda ao fogo                  | 19,76 %  | 6,32 %         |

Fonte: COSIN *et al.*, 2002

A partir desta análise, foram testadas as seguintes relações água:lodo: 90:10; 80:20; 70:30; 50:50; 10:90; 0:100 e 100:0. O lodo recebido possuía umidade de 68% mas, para a realização dos ensaios, foi seco em estufa.

Após serem fixadas as composições, corpos de prova foram confeccionados por meio de prensagem manual e mecânica. Após secagem e queima a 800°C, 900°C e 1000°C, os corpos de prova foram avaliados quanto às suas propriedades cerâmicas (absorção de água – AA; porosidade aparente – PA e massa específica aparente – MEA). Foram realizados também ensaios de tensão à ruptura. As quantidades de lodo incorporadas à amostra de argila estudada, que proporcionaram corpos de prova com propriedades adequadas ao uso em Cerâmica Vermelha, foram: (1) 10% para corpos de prova prensados mecanicamente e queimados a 900°C e 1000°C; (2) 10% e 20% para corpos de prova prensados manualmente e queimados a 1000°C.

Cosin *et al.* (2002) concluíram que o lodo incorporado, rico em ferro e com baixo teor em elementos fundentes ou formadores de fase vítrea, provocou diminuição da resistência à flexão dos corpos de prova. Essa diminuição revelou-se tanto maior quanto maior a quantidade de lodo incorporada à massa cerâmica. A absorção de água e a porosidade dos corpos de prova

queimados tendiam a aumentar com a quantidade de lodo incorporado. O lodo comportou-se, desta maneira, como uma carga (filler) ou enchimento não-plástico.

Os pesquisadores indicaram, como próximo passo, a necessidade de serem efetuados ensaios em escala industrial. Uma conclusão geral dos autores foi que para se conseguir o maior valor possível para a porcentagem de carga (com uma dada composição química e estrutura cristalina) era recomendável escolher uma argila adequada. Dentre os requisitos, ela deveria apresentar teores de cátions formadores de vidros de baixa temperatura de amolecimento os maiores possíveis, como é o caso dos taguás.

Godbold *et al.* (2003) apresentaram um estudo piloto, substituindo 10% de argila por uma mistura de cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto e resíduo de tratamento de água com alumínio (proporção 80:20). O lodo de ETA apresentava 80% de umidade. Amostras representativas dos dois resíduos foram coletadas de estações em operação. Os blocos produzidos ficaram visualmente idênticos aos blocos padrões feitos com 100% de argila. Testes físicos com o bloco feito com os resíduos não demonstraram desvio significativo em relação aos realizados com os blocos padrões. Além disto, estes testes demonstraram que o bloco feito com resíduos obedeceu as especificações britânicas, Brick Standart BS 3921:1985, em termos de resistência, retração e absorção de água.

Para examinar o potencial dano ao ambiente que estes blocos poderiam trazer, eles foram submetidos à trituração e a testes químicos. Estes incluíram o teste de lixiviação europeu, EM 12457, que compara os resultados encontrados com valores limites que determinam a aceitação do resíduo em aterros. Resultados indicaram que os tijolos atendiam a norma, exceto pelos teores de Molibdênio (Mo) e sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Como estes elementos não tinham sido encontrados no monitoramento rotineiro dos resíduos das estações de tratamento de água e esgoto, considerou-se que isto poderia ser característica apenas das amostras usadas nos testes.

Os teores de Cu, Pb e Zn do lixiviado do bloco com os resíduos foram menores ou iguais aos obtidos com o bloco composto inteiramente por materiais naturais. A mistura de cinzas de incineração de lodo de tratamento de esgoto com lodo de tratamento de água com alumínio como componente na produção de blocos foi considerada tecnicamente viável.

Magalhães (2003) estudou a possibilidade da incorporação do resíduo, gerado na Estação de Tratamento de Água do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Barra Mansa (ETA SAAE/BM),

na produção de cerâmica vermelha. Para tanto, confeccionou corpos de prova (CPs) com a mistura de argilas utilizada pela Cerâmica Porto Velho e lodo coletado na ETA durante um período de quatro meses (setembro a dezembro de 2002). Na produção dos CPs, este autor empregou a moldagem por extrusão à vácuo, utilizando uma maromba de laboratório. Foram seguidas as seguintes etapas de fabricação: a) tomaram-se as amostras de resíduo da ETA e de argila, que foram secas, quarteadas e trituradas, em um moinho de martelo de laboratório, a fim de reduzi-las a partículas de tamanhos pequenos; b) peneirou-se a argila e o resíduo da ETA em uma peneira de # 48 (0,297mm de abertura); c) misturou-se à seco os dois materiais nos percentuais de incorporação previamente estabelecidos: 0% (testemunha); 40%; 50% e 60% da massa total; d) introduziu-se água na mistura, obtendo-se uma umidade aproximada entre 20% e 22%; e) deixou-se a mistura descansar por 24 (vinte quatro) horas; f) em seguida, a mistura úmida foi encaminhada para a extrusora à vácuo, até conseguir-se um estado plástico adequado; g) foram moldados dezesseis corpos de prova para cada mistura, com dimensões aproximadas de 150mm x 15mm x 10mm, que foram acomodados sobre uma superfície plana.

Para cada lote de mistura, quatro CPs foram utilizados na determinação da Tensão de Ruptura à Flexão à seco. Para isto, eles sofreram secagem ao ar livre por vinte quatro horas e posteriormente secagem à 40°C por 12 horas e à 70°C por 24 horas em estufa. Após a secagem, os CPs foram queimados separadamente, em um forno elétrico, em quatro estágios de temperatura (800°C, 850°C, 900°C e 950°C), com duas horas de patamar. O autor verificou que os resultados apresentados evidenciaram ganho de resistência, a partir de 900°C, para todas as misturas testadas. Ele verificou, também, que a incorporação do resíduo não alterou a qualidade do produto, pois os valores de resistência, dos corpos de prova com adição de lodo, ficaram próximos ou superiores aos apresentados pelo corpo testemunha. No entanto, Magalhães (2003) notou que corpos de prova queimados até temperaturas de 900°C apresentaram absorção sempre superior a 25%, limite máximo estabelecido por norma (BRASIL, 1992a).

O autor realizou, também, testes de lixiviação, solubilização e massa bruta segundo NBR 10004 (BRASIL, 1987a) em corpos de prova sem e com 60% de lodo. Os resultados mostraram que o solubilizado dos dois CPs não se enquadraram nos limites impostos pela NBR 10004 para o alumínio. Os limites para o ferro também não foram atendidos.

Magalhães (2003) concluiu, através dos ensaios qualitativos e do tratamento estatístico dos resultados obtidos com CPs, que o resíduo podia ser incorporado na escala real em percentuais iguais aos adotados nos experimentos em escala de laboratório, sendo necessário, apenas, um maior controle da produção, especialmente no que diz respeito às dimensões das peças conformadas, para a correção das características dimensionais que ficarem fora dos padrões estabelecidos. Ele observou ainda que a utilização deste resíduo não tinha grande importância do ponto de vista econômico, pois o volume gerado pela ETA estudada era da ordem de 25 toneladas/mês de material semi-seco, o que equivale a sete milheiros de tijolos com resíduo incorporado a 60%. Segundo o pesquisador, a relevância da utilização deste material estava na destinação adequada do resíduo, que quando disposto de forma inadequada, causa impactos ambientais e se destinado em aterros, onera o processo de tratamento de água. Os ganhos ambientais se estendem, ainda, do ponto de vista extrativo, pois o incremento de 25 toneladas/mês de resíduo na massa cerâmica reduz em volume equivalente a argila extraída. Concluiu, ainda, que a maior quantidade de alumínio e ferro obtidos no extrato solubilizado para os CPs com lodo não devia estar relacionada à incorporação do resíduo da ETA e sim, às próprias características da matriz, pois as concentrações destes elementos estavam próximas e não eram proporcionais à quantidade de lodo incorporada à massa cerâmica (0,57 mg/L e 0,53 mg/L de alumínio e < 0,6 mg/L e < 0,1 mg/L de ferro, respectivamente, para CPs com e sem lodo).

De acordo com a experiência da pesquisadora, incorporações de lodo “semi seco” desta ordem (40%; 50% e 60% em massa), em escala real, são difíceis de serem factíveis. Novaes (2005) concluiu que a incorporação de lodo nestas quantidades só seria possível se o lodo apresentasse 0% de umidade – possível somente com tratamento térmico – e fosse moído, assim como as outras matérias primas, condições possíveis de serem realizadas em laboratório, mas que não ocorrem na maioria das indústrias cerâmicas brasileiras. Além disto, o acréscimo de alumínio e ferro no extrato do solubilizado pode ser resultado da incorporação do lodo, pois este material é rico nestes elementos e a quantidade incorporada foi alta (60%).

Rouf et al. (2003), por sua vez, testaram o uso de lodo de ETA rico em arsênio e ferro em blocos cerâmicos. Segundo os autores, ocorrem grandes concentrações de arsênio na água de Bangladesh e o governo tem se preocupado com a retirada deste elemento. No entanto, pouca atenção tem sido dada à disposição do lodo gerado nos processos de tratamento de água. Os pesquisadores afirmaram que a disposição sem controle do lodo com arsênio pode levar à



poluição da água superficial e da água subterrânea, além de criar sérios problemas ambientais. Em Bangladesh, atualmente, pratica-se a incineração do lodo, que é cara e contribui para a poluição do ar. Adota-se também, comumente, a sua disposição em aterros sanitários, que é problemática, devido à escassez de áreas. A longo prazo, portanto, a saída para a disposição do lodo será a sua reciclagem e o uso benéfico do mesmo. Uma técnica disponível para tratar material perigoso é a solidificação que estabiliza os poluentes do resíduo. O produto solidificado é disposto em aterro. Pode ser, ainda, reciclado como material de construção, caso atenda as especificações de resistência e lixiviação de poluentes tóxicos.

O trabalho de Rouf *et al.* (2003) demonstrou a viabilidade de se utilizar lodo rico em arsênio e ferro como substituto da argila na fabricação de tijolos. Diferentes misturas de argila-lodo foram testadas e também foram realizados testes em branco (somente com argila) para avaliar como o lodo poderia alterar a qualidade do tijolo. As peças moldadas foram corpos de prova com 12,25cm de comprimento, 5,85cm de espessura e 3,81cm de altura.

O teor de arsênio no lodo bruto mostrou ser maior que o dobro do encontrado no lodo estabilizado. Testes mostraram que a lixiviação do arsênio era maior no lodo do que no tijolo já queimado. O aumento da temperatura de queima do tijolo resultou em uma menor lixiviação de arsênio. Resultados de testes de compressão indicaram que a resistência era dependente do teor de lodo no tijolo e também da temperatura de queima. Tijolos de boa qualidade foram obtidos adicionando 15% em massa de lodo à argila e realizando queima a uma temperatura de 1000°C. A resistência à compressão de todos os tijolos produzidos com a mistura lodo-argila atendeu a norma BDS 208 (1980). Grandes quantidades de lodo na mistura levaram a um comportamento menos plástico da massa. O bloco fabricado não mostrou deformações durante a queima. Os autores indicaram como apropriadas, para a produção de blocos de qualidade, adições de 15 a 25% (m/m) de lodo na massa cerâmica. Afirmaram ainda que a umidade ótima de mistura variou entre 15 e 18%.

Novaes (2005) realizou estudo tendo como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica do uso benéfico do lodo de cloreto férrico, gerado nos decantadores das ETAs 3 e 4 do município de Campinas (SP), em uma indústria cerâmica de Valinhos (SP). Foi escopo da pesquisa, também, verificar se os resultados obtidos em escala de laboratório reproduziam a realidade e averiguar se um tratamento complementar do lodo, através de leito de secagem, melhoraria as condições

requeridas pelo referido uso. O lodo desaguado por centrifugação foi caracterizado através de análises físicas, mineralógicas e geotécnicas, realizadas também nas matérias-primas cerâmicas.

A investigação quanto à viabilidade da incorporação de lodo nas matérias-primas cerâmicas foi feita em escala de laboratório e real nas proporções lodo:mistura de argilas de 10, 20, 30, 40 e 50% e 7, 10,7, 14,2 e 17,8 %, respectivamente. O lodo utilizado nestas misturas apresentou teor de sólidos em torno de 55%. Testes mecânicos foram realizados nos corpos de prova produzidos no laboratório e nos blocos processados na indústria cerâmica.

Os resultados obtidos mostraram que os corpos de prova apresentaram propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos blocos cerâmicos, embora se tenha constatado que, devido às condições de mistura, os resultados em escala de laboratório não reproduziam os obtidos em escala real. O pesquisador concluiu, ainda, que o uso do leito de secagem melhorou significativamente as condições do lodo, permitindo incorporar até 17,8 % na massa cerâmica.

Para o estudo de caso apresentado pelo autor, mostrou-se necessária a utilização de um tratamento complementar, pois o lodo com teor de umidade em torno de 80%, utilizado nos primeiros ensaios, provocou interferências significativas no processo da indústria como: (1) problemas no transporte e para descarregar o lodo no pátio; (2) possibilidade de incorporar baixas quantidades de lodo, o que não trazia grande economia de matéria-prima ao fabricante.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Descrição Geral da Bacia do Rio Cubatão

O Rio Cubatão está localizado na Bacia da Baixada Santista, que possui área de drenagem igual a 2.886 km<sup>2</sup>. O referido curso d'água é usado no abastecimento da cidade de mesmo nome e tem parte de suas águas tratadas pela ETA Cubatão, objeto da presente pesquisa.

Quanto aos usos do solo, a referida bacia abrange a Região Metropolitana da Baixada Santista e apresenta ocupação urbana e industrial intensa. Destacam-se o distrito industrial de Cubatão, o porto de Santos e a vegetação natural protegida da Mata Atlântica. Os usos da água incluem: abastecimento público e industrial; recepção de efluentes domésticos e industriais; pesca de subsistência; recreação; navegação e geração de energia elétrica. Entre as principais atividades da região, sobressaem o turismo, a pesca, o refino de petróleo, a siderurgia e as indústrias químicas e de fertilizantes (SÃO PAULO, 2004a).

Segundo o CBH – BS (Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista, 2004), predomina na sub-bacia do rio Cubatão os usos de solo descritos na Tabela 13.

Tabela 13: Usos de solo predominantes na sub-bacia do rio Cubatão (áreas de uso do solo – km<sup>2</sup>).

| Agricultura | Cobertura Vegetal Natural | Áreas de Reflorestamento | Predomínio de Pastagens e/ou Campo Antrópico | Áreas Urbanas e Industrializadas | Mangues |
|-------------|---------------------------|--------------------------|--|----------------------------------|---------|
| -           | 143,24                    | -                        | 21,33  | 5,93                             | 5,04    |

Fonte: Adaptado de CBH – BS (2004)

Outra informação importante sobre esta bacia é que nos fins de semana e temporadas de verão, o contingente de pessoas é duplicado, devido à afluência de turistas, agravando significativamente os problemas de saneamento básico.

Segundo CETESB (SÃO PAULO, 2004a), o Rio Cubatão recebe as águas advindas do Reservatório Billings, por meio do Canal de Fuga da Usina Hidroelétrica de Henry Borden. Portanto, existe uma reversão das águas da UGRHI 6 (Alto Tietê) para a UGRHI 7 (Baixada Santista), realizada apenas em casos críticos. Em virtude deste fato, as águas do Rio Cubatão têm a sua qualidade influenciada pelo regime operacional adotado no Sistema do Alto Tietê. O aludido sistema controla o nível de bombeamento das águas do Alto Tietê para o Reservatório Billings, através da Estação Elevatória de Pedreira.

A avaliação das médias dos parâmetros sanitários nitrogênio amoniacal, fósforo total e coliformes termotolerantes ao longo do rio Cubatão mostra uma queda acentuada na qualidade da água desde a captação da ETA até o ponto situado à jusante do canal de Fuga. O recebimento de parte dos lançamentos domésticos e industriais do município de Cubatão é o principal fator da degradação desta qualidade.

#### **4.2. Descrição do processo de geração do lodo da ETA Cubatão**

A Estação de Tratamento de Água de Cubatão trata em média  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  e é responsável, atualmente, pelo abastecimento de 2.000.000 de habitantes dos municípios de Santos, São Vicente, Cubatão e grande parte da Praia Grande. Estava prevista para 2004 a conclusão de obras que ampliariam a atuação desta ETA para a região do Guarujá.

O sistema possui duas captações: a primeira, mais recente, está situada no rio Cubatão, aproximadamente 1 km à montante da estação, capta água do rio através da barragem Sub-Álvea. A segunda complementa a captação da primeira, retira água diretamente do rio Cubatão e recebe, esporadicamente, a contribuição do reservatório Billings.

A estação funciona em sistema fechado. Isto se caracteriza pelo retorno de parte das águas de lavagem de filtros e decantadores, além da água excedente da Estação de Tratamento de Lodo (ETL) para o início do tratamento. Esta água recirculada contribui para a vazão tratada diariamente na ETA Cubatão.

Inicialmente, a água bruta passa pela caixa de areia, composta de 3 unidades. Em seguida, ela é recalçada pela Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) para a caixa de mistura. Nesta, são

adicionados cal e cloreto férrico. O tempo de detenção hidráulico é de 18 segundos. Imediatamente à jusante, na tubulação de saída, são adicionados o cloro e o flúor.

Após a passagem pela câmara de mistura, a água coagulada é enviada, por gravidade, para seis floculadores ligados a seis decantadores. Cada floculador é formado por quatro câmaras semelhantes, operando em série, interligadas por passagens inferiores e superiores alternadas. Cada uma destas câmaras é dotada de um agitador de eixo vertical do tipo turbina, com polias escalonadas que permitem o ajuste do gradiente médio de velocidades em três valores diferentes.

Os decantadores são do tipo convencional, de formato retangular, de fluxo longitudinal, com limpeza manual. Possuem cortinas de madeira, bocais na entrada e calhas vertedoras para a coleta de água decantada na saída.

Em média, um decantador passa por procedimento de limpeza a cada 20 dias. Esta atividade consiste de esgotamento do decantador e floculador anexo, seguido de remoção do lodo restante com jatos de água de mangueiras.

Os seis decantadores são ligados a 12 filtros do tipo rápido por gravidade, com leito filtrante de antracito e areia sobre camada suporte de pedregulho.

O sistema de lavagem é com água em contra corrente auxiliada por lavagem superficial. A água é fornecida por um reservatório apoiado, cujo volume útil é de 1300 m<sup>3</sup>. Este reservatório é abastecido por três conjuntos moto-bombas, situados no sub-solo da casa de química. A sucção é feita a partir do reservatório de água tratada, situado sob os filtros. Cada filtro é lavado a cada 18 horas.

A Figura 3 apresenta a seqüência de tratamento da ETA Cubatão, indicando inclusive o fluxo do lodo e da água recirculada. A Figura 4 mostra uma vista aérea da estação.

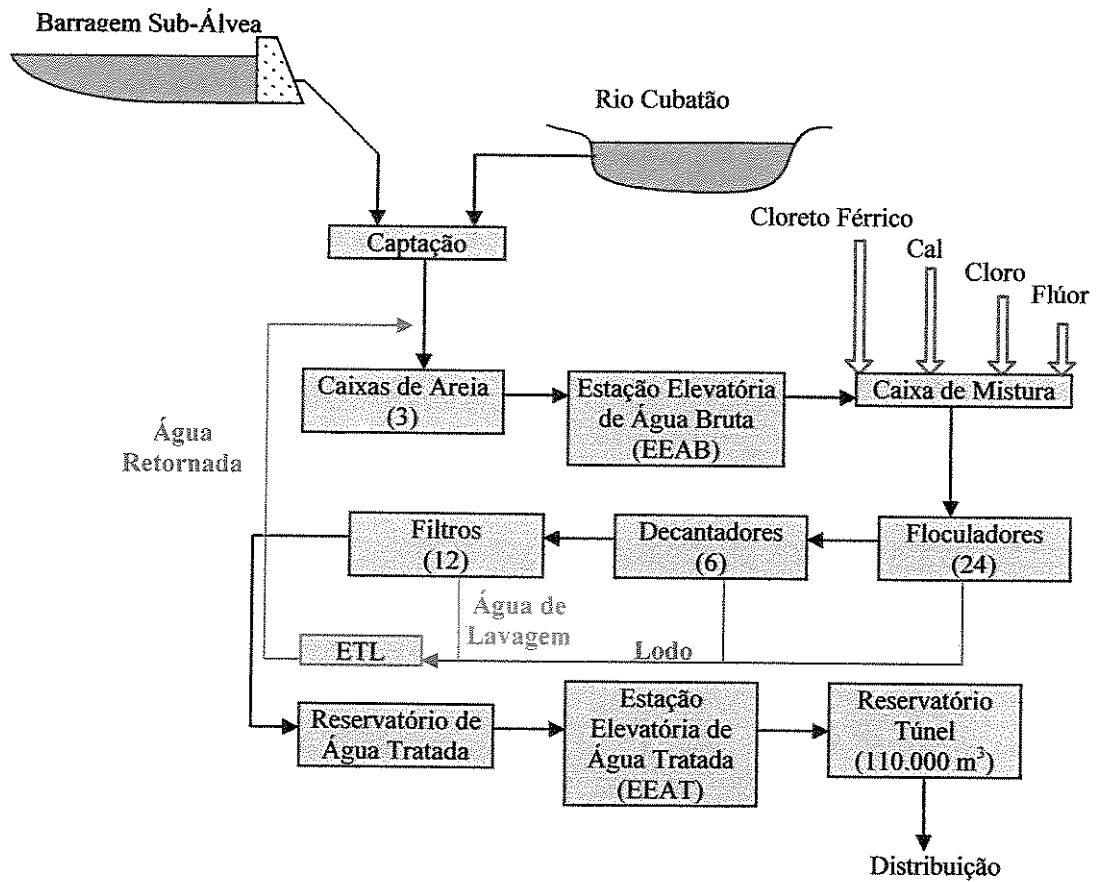


Figura 3 – Esquema do processo de tratamento de água da ETA Cubatão.

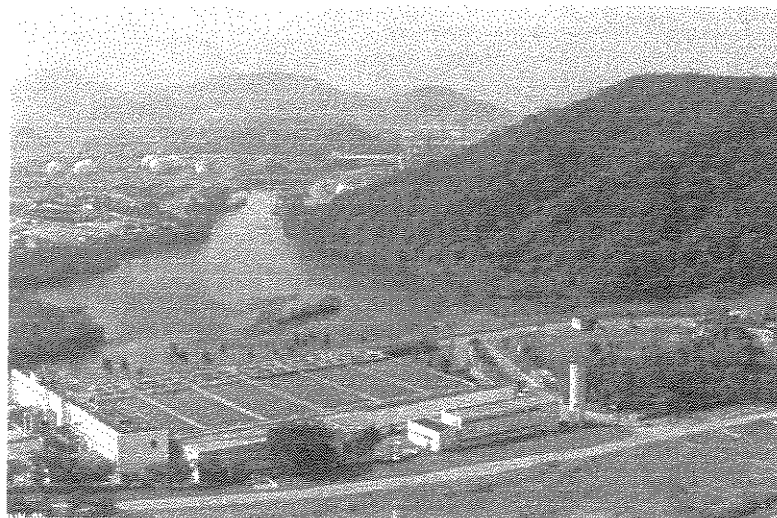


Figura 4 – Vista aérea da ETA Cubatão.

### 4.3. Descrição do Sistema de Tratamento de Lodo

Os lodos gerados na ETA Cubatão têm sua origem nos decantadores e nos filtros. Cada decantador é lavado, em média, a cada vinte dias e o intervalo entre duas limpezas de um filtro é de 18 horas.

A água de lavagem dos filtros é bombeada para três tanques de sedimentação. Com relação ao resíduo produzido na limpeza dos decantadores, 1/3 retorna ao início do sistema e o restante segue para os tanques de estocagem.

A água de lavagem entra nos tanques de sedimentação com 0,5 a 0,8 % de sólidos secos e deixa estes compartimentos com 2 a 3% (FERREIRA, 2004). Este adensamento é auxiliado por polímeros. Os lodos sedimentados nestes tanques são encaminhados para o tanque de estocagem dos lodos. O excesso de água, por sua vez, é recirculado no sistema.

No tanque de estocagem, os lodos sedimentados dos filtros se misturam ao lodo proveniente dos decantadores. Este último também se encontra com teor de sólidos de 2 a 3%. A Figura 5 apresenta um esquema do processo de tratamento de lodos da ETA Cubatão.

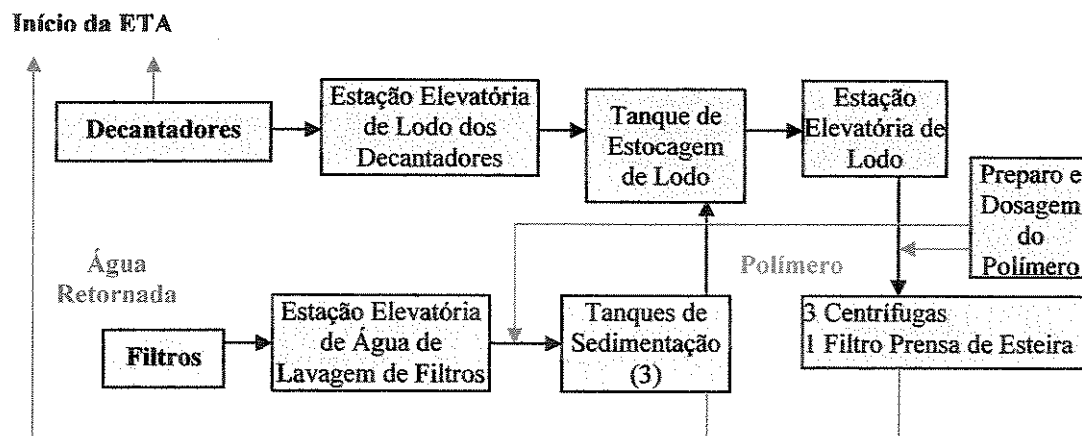


Figura 5 – Esquema do sistema de tratamento de lodos da ETA Cubatão.

Os lodos são removidos pelo fundo do tanque de estocagem e bombeados para a etapa de desaguamento, que é realizado por meio de centrífugas, obtendo teor de sólidos de 20% (FERREIRA, 2004).

Os lodos desaguados são conduzidos por uma esteira transportadora a uma caçamba receptora, ou caminhão, para disposição final em aterro sanitário.

#### **4.4. Descrição do Processo de Fabricação dos Blocos Cerâmicos**

A indústria cerâmica, escolhida neste estudo, localiza-se no pólo de Tatuí e processa em torno de 7.500 t de argila por mês.

A argila é procedente de jazida própria, situada a uma distância de 12 quilômetros da fábrica. Ali, existe uma grande variedade de argilas, de coloração e composição diferentes. Dentre elas, destacam-se os quatro tipos denominados: argila verde escura, saibro, argila amarela, taguá verde. São estes os principais componentes da mistura, que dará origem à massa cerâmica utilizada pela indústria.

Na jazida, com o auxílio de tratores, ocorre a mistura das diversas argilas. Esta mistura é deixada em repouso ao ar livre por aproximadamente três meses. Após este período, ela é transportada por caminhões até o pátio da fábrica, onde fica armazenada até que seja utilizada no processo. Neste momento, a massa cerâmica é recolhida por trator e transportada a um silo dosador. À medida que ela deixa o silo, seguindo por esteiras, para a laminação, 18 kg de carvão por minuto (correspondente a 2,4% da massa cerâmica) são adicionados à mesma.

Assim que recebe a adição de carvão, a massa passa por misturadores e laminadores. Nestas etapas, ocorre sua homogeneização, além de ser acrescentada água, se necessário. A massa segue, então, para a extrusora. Nesta, ela é prensada através do molde, resultando num feixe contínuo, que é cortado em blocos por fios de arame. As sobras deste corte são reaproveitadas retornando para os misturadores.

Os blocos seguem por esteiras e são empilhados mecanicamente em vagonetas. As vagonetas, totalmente preenchidas, são levadas para a estufa de secagem. Os blocos permanecem ali por 48 horas, em temperatura em torno de 100°C.



Após a secagem na estufa, os blocos são transferidos para o forno de queima. Peças que apresentam defeito após a secagem não são queimadas. Elas são descartadas, retornam ao pátio e são misturadas à argila.

No forno, os blocos secos em boas condições são empilhados, de forma a preencher todo o seu interior. O combustível utilizado é o cavaco, que é constituído por rejeito de madeiras. Para a produção de calor no forno, os cavacos são colocados em alimentadores, que são posicionados em bocais onde são queimados.

A queima é realizada durante 30 horas a uma temperatura de 900°C. Após este período, cessa-se a produção de calor e os blocos permanecem dentro do forno por mais 24 horas para resfriamento. O resfriamento é realizado pela circulação de ar através dos mesmos. O ar quente gerado neste processo é transferido para a estufa de secagem para aproveitamento de energia.

Após resfriamento, os blocos são retirados do forno e é realizada uma triagem das peças. Peças muito trincadas e partidas são utilizadas para cascalhar vias internas ou são, às vezes, vendidas para a prefeitura com este mesmo intuito. Peças de qualidade inferior (levemente trincadas) são estocadas e vendidas como produto “de segunda”. Peças em boas condições são também estocadas, vendidas e transportadas ao consumidor final.

Todo o processo de fabricação dos blocos cerâmicos, desde a alimentação da argila até a retirada dos blocos do forno, leva em torno de 7 dias.

A Figura 6 mostra um esquema do processo de fabricação de blocos. A Figura 7 mostra as principais etapas na indústria cerâmica escolhida.

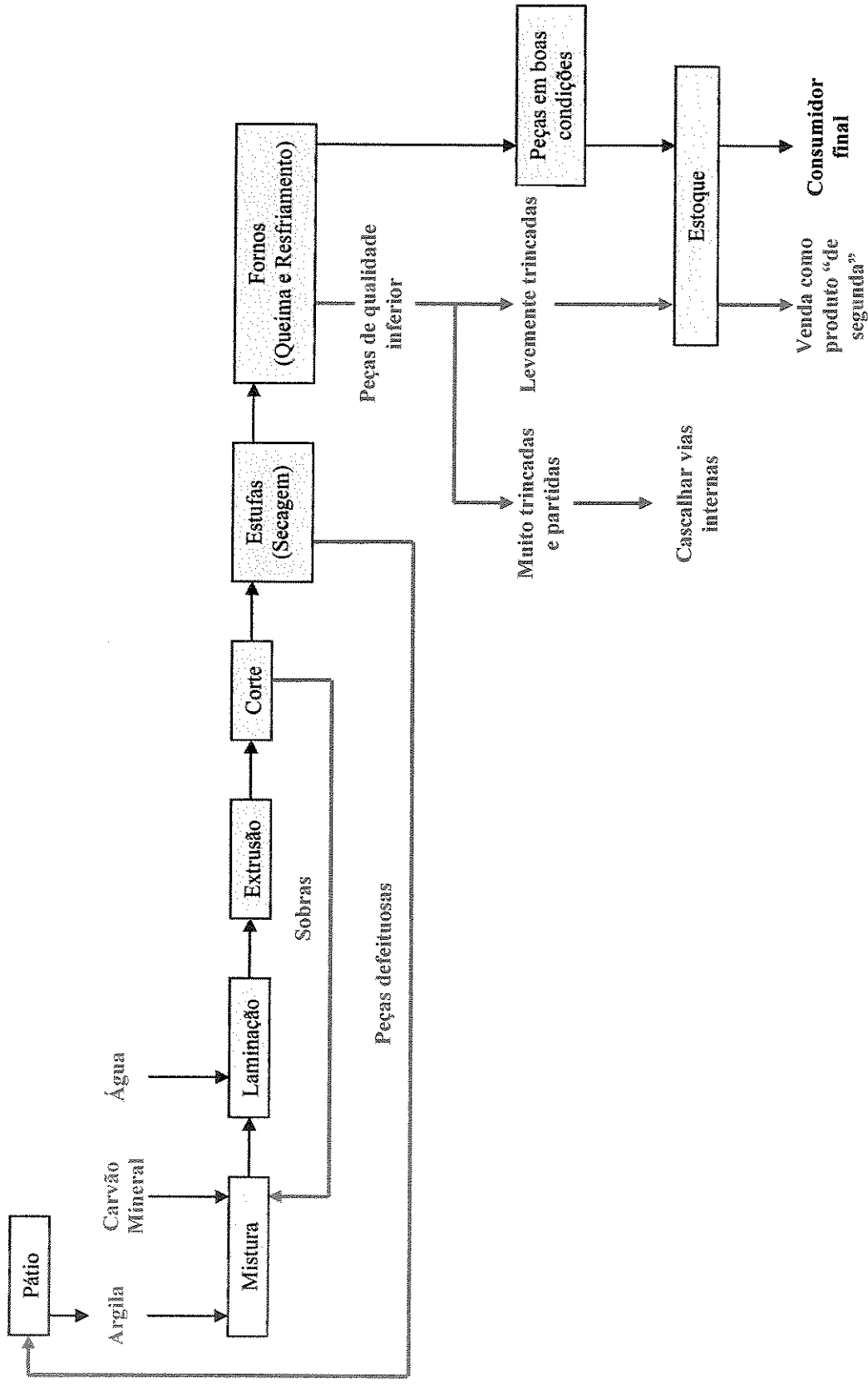


Figura 6 – Esquema do processo de fabricação de blocos cerâmicos.

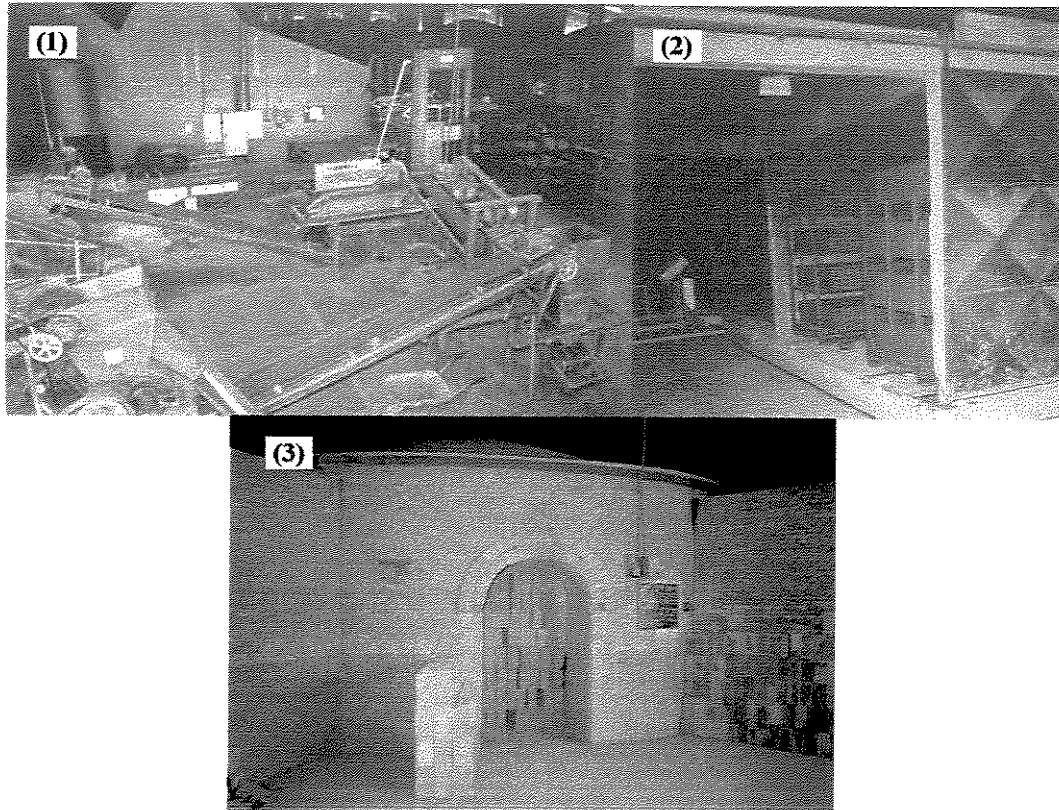


Figura 7 – (1) Mistura, Laminação, Extrusão e Corte; (2) Secagem; (3) Queima.

#### **4.5. Desenvolvimento da Metodologia para Verificação da Viabilidade Ambiental da Incorporação de Lodo de ETA Cubatão em Blocos Cerâmicos**

É possível reconhecer a importância deste projeto e o contexto de seu surgimento, conhecendo o histórico que segue.

##### **4.5.1. Histórico do projeto**

Em 2001, a professora Dione Mari Morita, como assessora do Secretário Adjunto da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), iniciou um projeto, denominado "Incorporação de lodos de estações de tratamento de águas em blocos cerâmicos". O objetivo do

projeto era encontrar uma forma de disposição de lodos de estações de tratamento de águas que fosse ambientalmente adequada, tecnicamente e economicamente viável.

A equipe do engenheiro Américo de Oliveira Sampaio da Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da SABESP tinha estimado que a quantidade de lodos de ETAs gerada no Estado de São Paulo era de 1000 t/dia, considerando que ele fosse desaguado e se obtivesse 40% de sólidos secos. Portanto, seria necessário encontrar um setor industrial que fosse capaz de absorver tal quantidade de resíduo. Como na época, a SMA estava fazendo um trabalho com os ceramistas de Santa Gertrudes – Projeto Corumbataí Cerâmicas, tinha-se conhecimento da potencialidade desta categoria industrial no Estado. Neste trabalho, coordenado pela Prof<sup>a</sup>. Dione, estava sendo testada a metodologia de negociação de conflitos com a participação dos setores envolvidos para a recuperação e reabilitação de uma extensa área contaminada com metais pesados. Os resultados do Projeto foram excelentes. Pela primeira vez, a SMA, a CETESB, as 41 indústrias cerâmicas, a prefeitura de Santa Gertrudes e a Secretaria de Saúde Estadual estavam trabalhando em conjunto para a solução do problema ambiental. Confiante em tal metodologia, a profa. Dione entrou em contato com a SABESP (Eng<sup>o</sup>. Américo de Oliveira Sampaio) e com a CETESB (engenheiras Maria da Penha de Oliveira Alencar e Fabíola Maria Gonçalves Ribeiro, respectivamente, Gerentes Regionais das Bacias da Baixada Santista e do Sorocaba, Alto Paranapanema e Litoral Sul), dando início à parceria.

Decidiu-se trabalhar com a ETA Cubatão, pois, na época, era a única que já possuía uma estação de tratamento de lodo. As indústrias do pólo de Santa Gertrudes foram visitadas pelo engenheiro Américo e pela professora Dione, que descobriram que elas operavam por via seca, não sendo possível, portanto, realizar o projeto com as mesmas. Pesquisando na SMA, a profa. Dione constatou que existiam dois pólos cerâmicos fortes no Estado: um em Itú e outro em Tatuí. Foram levantadas na CETESB, as indústrias que estavam ambientalmente adequadas nestas regiões. Dentre as possíveis alternativas, foi escolhida uma que tinha capacidade para absorver o lodo da referida ETA e que representava uma liderança no setor, já visando a expansão desta solução para as demais ETAs da SABESP. Esta estratégia era extremamente importante, pois se tinha conhecimento que o setor era familiar. Começaram as negociações. Como era esperado, houve uma resistência inicial à utilização do lodo por parte do ceramista. Vencida esta resistência, a SABESP e a cerâmica realizaram testes preliminares, em escala real, em 2002. Tais testes mostraram que era possível incorporar o lodo na massa cerâmica numa relação volumétrica de

12,5% (lodo:argila). Com esta informação, foram quantificados os ganhos econômicos da incorporação para o ceramista, uma vez que ele economizava argila e deixava de ter que recuperar a área degradada pela mineração. Foi realizada, também, pela SABESP, uma comparação de custos desta alternativa com a disposição do lodo da ETA Cubatão em aterro sanitário, chegando a uma economia de aproximadamente 67%.

Em seguida, foram programados outros testes para avaliar o impacto ambiental desta alternativa. A SABESP solicitou a autorização da CETESB para a realização desta etapa do projeto. Obteve-se a autorização após seis meses. Neste momento, começaram a surgir problemas não técnicos (problemas administrativos na ETA Cubatão, demora na contratação da empresa que transportaria o resíduo, mudança na presidência e diretoria na SABESP, mudança do Secretário do Meio Ambiente, saída da profa. Dione da SMA, etc.), que causaram atraso no desenvolvimento do projeto. Finalmente, em março de 2004, ele foi reiniciado. A professora Dione, não pertencendo mais ao corpo técnico da SMA, integrou-se à equipe como docente da Universidade de São Paulo.

Também neste período, a CETESB lavrou um auto de infração pela disposição inadequada de lodo no pátio da Cerâmica, embora já tivesse autorizado a mesma. Em decorrência do auto de infração, a indústria passou a armazenar o lodo em um local com piso de concreto e cobertura.

#### 4.5.2. Desenvolvimento do presente trabalho

No estudo realizado, o lodo foi encarado não mais como resíduo sólido, e sim como matéria prima de um processo industrial. Com este propósito foi dispensável, nesta fase, realizar os testes descritos na NBR 10004 (BRASIL, 1987a), que classifica o resíduo tendo como premissa sua co-disposição com o resíduo sólido domiciliar em aterros sanitários.

O objetivo deste trabalho foi criar uma metodologia que capacite os interessados em utilizar resíduos de lodos de ETAs em cerâmica vermelha.

Por esta razão, foi realizado, inicialmente, um levantamento das características do manancial da ETA Cubatão ao longo dos últimos sete anos, através dos dados de monitoramento da CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a), bem como dos contaminantes

dos produtos químicos utilizados na mesma. Analisando estes dados, foram escolhidos os parâmetros que superaram os padrões para água superficial e os limites de qualidade dos produtos químicos. Após esta definição, avaliou-se o destino destes elementos em uma ETA convencional. Foram escolhidos os que ficavam predominantemente adsorvidos no lodo do decantador e que estivessem presentes na água de lavagem dos filtros. Com estes dados, e visando a aplicação em cerâmica, foram escolhidos os seguintes parâmetros para caracterização do lodo desaguado: Arsênio; Bário; Berílio; Cádmio; Chumbo; Cianeto; Cobre; Cromo Hexavalente; Cromo Total; Fenol; Mercúrio; Níquel; Selênio; Vanádio; Zinco; Compostos Orgânicos Voláteis (Clorometano; Cloreto de Vinila; Bromometano; 1,1-Dicloroetano; Cloreto de Metileno; Dissulfeto de Carbono; Trans-1,2-Dicloroetano; 1,1-Dicloroetano; 2-Butanona; Cis-1,2-Dicloroetano; Clorofórmio; 1,1,1-Tricloroetano; 1,2-Dicloroetano; Tetracloreto de Carbono; Benzeno; Tricloroetano; 1,2-Dicloropropano; Bromodiclorometano; Cis-1,3-Dicloropropeno; Tolueno; 1,1,2-Tricloroetano; Tetracloreto; Dibromoclorometano; Clorobenzeno; Etilbenzeno; m,p-Xilenos; o-Xileno; Estireno; Bromofórmio; 1,1,2,2-Tetracloroetano), Coliformes Fecais, *Giardia sp.* e *Cryptosporidium sp.*

As determinações destes parâmetros seguiram as metodologias constantes nas referências: Estados Unidos (1986), Brasil (1987a); Brasil (1993); Estados Unidos (1996b).

Além destas determinações, foi realizada a análise mineralógica do lodo. As fases cristalinas mais frequentes foram obtidas por difratometria de raios-x e comparação do difratograma da amostra com o banco de dados do International Centre for Diffraction Data. A porcentagem de óxidos no lodo foi determinada em ensaios de fluorescência de raios-x, em análise semiquantitativa, sem padrões, de Flúor a Urânio. As metodologias utilizadas nestes dois ensaios estão descritas no ANEXO I-1.

Foram realizados, ainda, ensaios de granulometria no lodo, segundo NBR 7181 (BRASIL, 1984d) e de limites de Atterberg (determinação do índice de plasticidade) segundo NBR 6459 (BRASIL, 1984a) e NBR 7180 (BRASIL, 1984c).

De posse destas determinações, foi verificada a viabilidade técnica de aplicação do resíduo na indústria cerâmica. Morita *et al.* (2002) já haviam avaliado e comprovado esta viabilidade e determinaram a melhor relação lodo:argila - 12,5% (em volume). Portanto, neste trabalho, foram

realizados apenas ensaios mecânicos nos blocos com 10% de lodo e sem lodo. Estes ensaios seguiram as normas:

- NBR 6461 (BRASIL 1983): fornece a metodologia do ensaio de resistência à compressão para blocos cerâmicos;
- NBR 7171 (BRASIL, 1992a): fixa as condições exigíveis no recebimento de blocos cerâmicos a serem utilizados em obras de alvenaria, com ou sem revestimento;
- NBR 8042 (BRASIL, 1992b): padroniza as formas e dimensões de blocos cerâmicos a serem utilizados em alvenaria, com e sem revestimento.

Para o ensaio de absorção de água, utilizou-se a metodologia constante no ANEXO I-2.

Foram determinados, também, os teores de sólidos do lodo e das argilas no momento da mistura, além das massas específicas dos grãos, a fim de obter a relação mássica lodo:argila. A coleta e a preservação das amostras, bem como a determinação do teor de sólidos, foram realizadas segundo a referência APHA; AWWA; WEF (2000). A preparação das amostras para a determinação da massa específica dos grãos foi executada de acordo com a NBR 6457 (BRASIL, 1986) e a determinação propriamente dita, segundo a NBR 6508 (BRASIL, 1984b).

Foram obtidas ainda, as curvas granulométricas, as características mineralógicas (por difratometria e fluorescência de raios-X) e o índice de plasticidade das diferentes argilas da jazida para avaliar que matéria(s)-prima(s) poderia(m) ser substituída(s) pelo lodo.

Após a avaliação da viabilidade técnica, foram realizadas entrevistas com profissionais especializados nas áreas de poluição do solo, da água e do ar – Método “Ad-Hoc” de avaliação de impacto ambiental (SÃO PAULO, 1992; BRAGA *et al.*, 2002). Estas entrevistas possibilitaram a identificação dos impactos ambientais potenciais decorrentes da incorporação do resíduo no processo cerâmico. Os impactos apontados pelos especialistas foram:

- contaminação do solo e da água subterrânea devido ao armazenamento do lodo no pátio;
- contaminação dos funcionários da indústria ocasionada pelo manuseio do lodo;
- contaminação do ar em decorrência da volatilização dos componentes do lodo no pátio e no processo industrial e devido às emissões no forno;

- contaminação do solo e da água subterrânea em virtude da disposição inadequada dos blocos pós-consumo;
- contaminação da população que mora nestes locais de disposição e no entorno.

Para avaliar os impactos, foram propostas as seguintes metodologias:

**A) impacto nos funcionários da indústria cerâmica:**

- determinação dos teores no lodo de: Arsênio; Bário; Berílio; Cádmio; Chumbo; Cianeto; Cobre; Cromo Hexavalente; Cromo Total; Fenol; Mercúrio; Níquel; Selênio; Vanádio; Zinco; Compostos Orgânicos Voláteis (Clorometano; Cloreto de Vinila; Bromometano; 1,1-Dicloroetano; Cloreto de Metileno; Dissulfeto de Carbono; Trans-1,2-Dicloroetano; 1,1-Dicloroetano; 2-Butanona; Cis-1,2-Dicloroetano; Clorofórmio; 1,1,1-Tricloroetano; 1,2-Dicloroetano; Tetracloroeto de Carbono; Benzeno; Tricloroetano; 1,2-Dicloropropano; Bromodichlorometano; Cis-1,3-Dicloropropeno; Tolueno; 1,1,2-Tricloroetano; Tetracloroetano; Dibromoclorometano; Clorobenzeno; Etilbenzeno; m,p-Xilenos; o-Xileno; Estireno; Bromofórmio; 1,1,2,2-Tetracloroetano), Coliformes Fecais, *Giardia sp.* e *Cryptosporidium sp.* Estas determinações foram realizadas no Laboratório BIOAGRI, que utilizou as metodologias analíticas constantes nas referências: Estados Unidos (1986), Brasil (1987a), Estados Unidos (1996b). A coleta e a preservação de amostras foram realizadas segundo a norma NBR 10007 (BRASIL, 1987d).
- ensaios de lixiviação e solubilização do lodo, segundo a NBR 10005 (BRASIL, 1987b) e NBR 10006 (BRASIL, 1987c), respectivamente.
- análise de risco à saúde dos funcionários, comparando os valores encontrados com diretrizes indicadas pela U.S. Department of Health and Human Services – U.S. DHHS (ESTADOS UNIDOS, 1999c; 1999d; 2003) e EGVM – Expert Group on Vitamins and Minerals (INGLATERRA, 2003) e WHO (1977).

**B) impacto na qualidade da água subterrânea devido ao armazenamento do lodo no pátio:**

- ensaios de lixiviação e solubilização, segundo a NBR 10005 (BRASIL, 1987b) e NBR 10006 (BRASIL, 1987c), respectivamente.



### **C) impacto na qualidade do solo devido ao armazenamento do lodo no pátio:**

- caracterização do solo no local onde o lodo ficou armazenado por três meses e num solo que não teve contato com o mesmo. Os parâmetros analisados foram: Alumínio; Arsênio; Bário; Cádmio; Chumbo; Cromo total; Cobre; Mercúrio; Níquel; Selênio; Ferro; Manganês; Sódio; Fluoreto; Zinco; Prata. A coleta das amostras foi realizada segundo a norma NBR 10007 (BRASIL, 1987d). As análises foram realizadas pelo IPT, seguindo procedimentos padrões e referências: DQ-LAQI-ICP-002 e Estados Unidos (1994) e WEF (2000) – Espectrometria de plasma-ICP e Espectrofotometria de absorção atômica; DQ-LAQI-VC-020 e Peters *et al.* (1971) – Potenciometria - eletrodo íon seletivo.
- comparação dos teores obtidos na caracterização do solo com os valores de intervenção propostos pela CETESB (SÃO PAULO, 2001b).

### **D) impacto sobre a qualidade do ar devido à volatilização dos compostos do lodo no pátio e na área interna da indústria, na secagem e nos fornos:**

- Em todo o processo industrial:
  - determinação de compostos orgânicos voláteis no lodo. A análise foi realizada pela BIOAGRI seguindo as metodologias propostas na referência: Estados Unidos (1996b);
  - determinação de metais no lodo, realizada pela BIOAGRI segundo metodologia proposta na referência Brasil (1987a).
- No forno:
  - determinação dos teores de carbono orgânico total, cloro residual e cloretos no lodo, realizada pela BIOAGRI segundo as referências Brasil (1987a) e Estados Unidos (1996b) e comparação com a diretiva europeia – Directive 2000/76/EC (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2000), que estipula limites máximos destes elementos para evitar a formação de dioxinas e furanos durante o processo de queima;
  - testes de queima: realizado pelo IPT, segundo metodologia constante no ANEXO I-3. Os seguintes parâmetros foram monitorados durante a queima:

- CO, CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>: medido por infravermelho (ANEXO I-3);
- concentração de SO<sub>x</sub>: pelo método número 8 da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1998);
- NO<sub>x</sub>: medido por quimioluminescência (ANEXO I-3);
- concentração de material particulado: pelo método número 5 da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1998);
- Antes da realização dos testes de queima, foram tomadas as seguintes medidas para minimizar as diferenças devido ao processo produtivo:
  - uso do mesmo forno;
  - utilização da mesma argila nos dois testes: cerca de 2500 t deste material foi armazenada no pátio. Dali, foi retirada a amostra para o teste em branco e para a mistura com o lodo;
  - utilização do mesmo cavaco nos dois testes: antes do início do teste em branco, anterior àquele com incorporação, separou-se grande quantidade de cavaco. Isto garantiu, em parte, que a origem e qualidade do cavaco era a mesma;
  - utilização do mesmo carvão nos dois testes: foi utilizado carvão de mesma origem nos dois testes;
  - limpeza do forno;
  - mesma quantidade de blocos em cada fornada;
  - uso do mesmo bocal de extrusora.
- comparação dos teores encontrados para CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e MP com fatores de emissão indicados pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997);
- avaliação da dispersão de poluentes, utilizando o programa SCREEN3 (ESTADOS UNIDOS, 1996a). Este modelo foi aplicado segundo os procedimentos da referência EPA (ESTADOS UNIDOS, 1995). Foram realizadas,

ainda, comparações dos resultados obtidos com os padrões propostos pelas legislações federal (BRASIL, 1990) e estadual (SÃO PAULO, 1976);

- caracterização do material particulado: foram coletadas amostras durante a queima dos blocos sem lodo e com 10% de lodo e determinados os teores de Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo total, Ferro, Manganês, Mercúrio, Níquel, Prata, Selênio, Sódio e Zinco. Além disto, foram realizadas as mesmas determinações em filtros que não sofreram influência da queima. Estas determinações foram realizadas pelo IPT por Espectrometria de plasma-ICP segundo o procedimento interno DQ-LAQI-ICP-002 e referências: Estados Unidos (1994) e WEF (2000);
- caracterização das cinzas segundo os parâmetros: Carbono Total, Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Cobre, Mercúrio, Níquel, Selênio, Ferro, Manganês, Sódio, Cloreto, Fluoreto, Zinco e Prata. As análises foram realizadas pelo IPT segundo ASTM (2000a) e procedimentos internos e referências: DQ-LAQI-CO-001 e ASTM (2000b) – Combustão; DQ-LAQI-AA-012 e ASTM (1995) – Espectrometria de plasma-ICP e Espectrofotometria de absorção atômica; DQ-LAQI-VC-016 e ASTM (2000c) – Volumetria - permanganato; DQ-LAQI-VC-020 e Peters *et al.* (1971) – Potenciometria - eletrodo íon seletivo. Comparação com a diretiva européia – Directive 2000/76/EC (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2000);
- caracterização do carvão e do cavaco: determinações de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio realizadas pelo IPT, segundo norma da referência ASTM (1996a) e procedimento interno e referência: DQ-LCL-PE-017 e IPT (1980).
- caracterização do carvão segundo os parâmetros: Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Cobre, Mercúrio, Níquel, Selênio, Ferro, Manganês, Zinco, Prata e Sódio. As análises foram realizadas pelo IPT segundo procedimentos internos e referências: DQ-LAQI-CO-001 e ASTM (2000b) – Combustão; DQ-LAQI-AA-012 e ASTM (1995) – Espectrometria de plasma-ICP e Espectrofotometria de absorção atômica.

- caracterização do cavaco segundo os parâmetros: Cloro, Fluoreto, Silício, Alumínio, Ferro, Titânio, Cálcio, Magnésio, Sódio, Potássio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Cobre, Mercúrio, Níquel, Selênio, Manganês, Prata e Zinco. As análises foram realizadas pelo IPT segundo procedimentos internos e referências: DQ-LAQI-VC-036 e ISO (1993) – Gravimetria; DQ-LAQI-VC-013 e ASTM (1996b) – Gravimetria - ácido fluorídrico; DQ-LAQI-AA-017 e IPT (1980) – Espectrometria de plasma-ICP; DQ-LAQI-AA-015 e IPT (1980) – Espectrofotometria de absorção atômica; DQ-LAQI-VC-016 e ASTM (2000c) – Volumetria; DQ-LAQI-VC-020 e Peters *et al.* (1971) – Fusão - eletrodo íon seletivo; DQ-LAQI-FX-010 e University of Denver (1958-1969) – Espectrometria de fluorescência de raios-X.

**E) impacto no solo e na água subterrânea decorrente da disposição dos blocos pós-consumo em lixões:**

- ensaios na massa bruta, no lixiviado e no solubilizado, realizados pela BIOAGRI, segundo as normas NBR 10004 (BRASIL, 1987a), NBR 10005 (BRASIL, 1987b) e NBR 10006 (BRASIL, 1987c), respectivamente.

**F) impacto nos indivíduos que habitam os lixões ou áreas no entorno, onde foram depositados os blocos pós-consumo:**

- a partir dos valores encontrados no item E, foram realizadas análises de risco à saúde da população exposta, considerando as referências: Estados Unidos (1992; 1999c; 2000a; 2000b; 2000c; 2003), WHO (1977; 1984; 1988) e Paoliello et al. (2001).

**G) impacto sobre os funcionários ou população, que mora no entorno da usina de reciclagem de entulho, para a qual os blocos pós-consumo podem ser encaminhados**

- a partir dos valores obtidos no item E, foram realizadas análises de risco à saúde da população exposta, considerando as referências Estados Unidos (1992; 1999c; 1999d; 2000a; 2000b; 2000c).

A Figura 8 resume as etapas da metodologia.

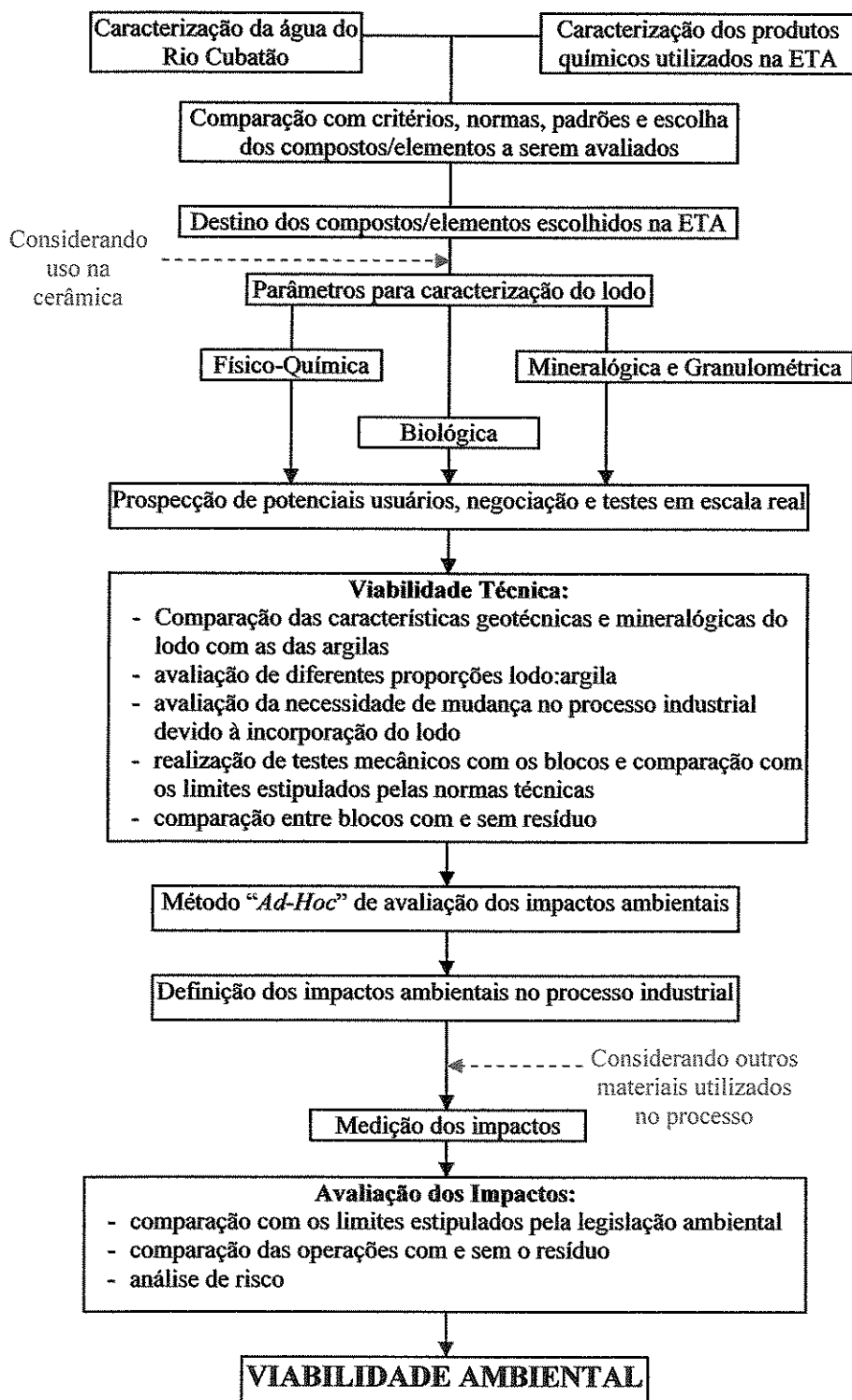


Figura 8 - Resumo das etapas da metodologia proposta para avaliação da viabilidade ambiental da incorporação dos resíduos de ETAs em cerâmica vermelha.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Análise da Qualidade da Água Bruta Captada pela ETA Cubatão

Foi realizado um levantamento dos parâmetros e indicadores de qualidade das águas processadas pela ETA Cubatão, monitorada pela CETESB nos últimos sete anos (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

De posse destes dados, foi possível avaliar como variou a qualidade da água ao longo de cada ano e nos sete anos consecutivos e, portanto, escolher os parâmetros para caracterizar o lodo e os blocos.

A seguir, são relatados os resultados deste levantamento e a análise dos mesmos por meio da comparação com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20 (BRASIL, 1986), sua revisão – CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) – e com a qualidade de águas naturais – isentas de contaminação antrópica (LISLE; ROSE, 1995; ESTADOS UNIDOS, 1999a; SÃO PAULO, 2002; 2004a).

#### 5.1.1. Ponto de amostragem da CETESB

O ponto de amostragem da CETESB, de onde se coletaram os dados para a análise que segue, é o denominado CUBA 02700. Ele está localizado na Ponte Preta, em frente à antiga estação de tratamento de água do rio Cubatão.

A água coletada para análise é afetada por pequena parte da carga poluidora que o rio recebe, pois o local de amostragem antecede a maioria dos pontos de descarga de efluentes industriais e domésticos. Os principais focos de poluição que atingem o ponto de amostragem são:

- RIPASA: antiga Companhia Santista de Papel. Esta empresa produz papéis para fins industriais como cartolinas, papéis especiais para capas de cadernos, livros, revistas, convites, etc. A empresa trata e descarta seus efluentes líquidos neste rio.

- Via Anchieta: Caminhões carregando todo tipo de carga estão sujeitos a acidentes. Antigamente, o material perdido nos acidentes de caminhão era lavado pelos bombeiros e escoava para o Rio Cubatão, contaminando este corpo d'água. Ultimamente, com a ação da CETESB, estes acidentes são contornados de forma diferente (uso de areia para drenar o líquido, entre outros métodos). Com esta nova prática, o vazamento do conteúdo dos caminhões na rodovia não tem afetado as águas do rio Cubatão.

### 5.1.2. Captação da SABESP

O ponto de captação da SABESP para tratamento na ETA Cubatão coincide com o ponto de amostragem da CETESB. Esporadicamente, a água da represa Billings contribui para a vazão tratada na estação (somente em casos críticos).

As águas captadas sofrem, portanto, impacto dos mesmos focos de poluição citados anteriormente. Em adição, estão sujeitas à possível contaminação pelo óleo bombeado pela Petrobrás. Para que isto não ocorra, há um controle minucioso por parte da Petrobrás para evitar vazamentos. No entanto, em caso de ocorrência, a ETA Cubatão cessa a parte da captação que conta com a contribuição da Billings (onde ocorre o possível vazamento) e continua trabalhando sem maiores problemas.

A SABESP realiza um mapeamento das situações de alerta nas estações e possíveis paradas e seus motivos. Em consulta a estes dados, no período compreendido entre janeiro de 2000 e outubro de 2004, a pesquisadora constatou que as paralisações ou estado de alerta na ETA Cubatão ocorreram, mais comumente, devido a alterações nas características físicas da água - valores elevados de cor e turbidez. Outras paralisações neste período tiveram como causas:

- pH elevado;
- vazamento de material (suco de laranja, ácido nítrico, dicloroetano) de carretas transportadoras trafegando pela Via Imigrantes ou Anchieta;
- vazamento de óleo combustível ou de natureza desconhecida em algum ponto da captação;
- reclamações com relação à qualidade da água pelos consumidores (água salgada ou suja);

- indicações de cloro ou flúor fora dos padrões no tratamento;
- aparência suspeita da água do manancial (aspecto leitoso);
- possibilidade de atividade de mineração à montante da tomada de água.

### 5.1.3. Valores limites de qualidade da água bruta e análise dos dados da CETESB

A Tabela 14 mostra os padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 20 (BRASIL, 1986) para corpos d'água classe 2 (classe do Rio Cubatão). Esta resolução passou por revisão e a partir de março de 2005, os novos limites a serem respeitados são àqueles estabelecidos pela CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005). Na tabela que segue estão indicados os novos limites propostos e em negrito estão os limites que foram alterados em relação a resolução anterior (CONAMA nº 20). Além disto, ela mostra os valores comumente encontrados em águas isentas de contaminação antrópica (UNESCO/WHO/UNEP, 1992; LISLE; ROSE, 1995; ESTADOS UNIDOS, 1999a; SÃO PAULO, 2002; 2004a) e a faixa de variação dos parâmetros de qualidade no Rio Cubatão ao longo dos últimos sete anos. A coluna "Tabelas Dados CETESB (Rio Cubatão)" indica qual a tabela, no ANEXO II, que contém o levantamento referente a cada parâmetro.

Tabela 14: Características da água do Rio Cubatão e limites para as variáveis constantes na Resolução CONAMA nº 20 (classe 2), sua Revisão, dados da UNESCO e outras fontes, tabelas com dados CETESB.

| PARÂMETRO                                 | Resolução<br>Conama<br>nº 20 | Resolução<br>Conama<br>nº 357 | UNESCO      | Outras<br>Fontes* | Faixa de Variação<br>no Rio Cubatão | Tabelas<br>Dados CETESB<br>(Rio Cubatão) |
|---|------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------|-------------------------------------|--|
| Coliformes Fecais<br>(NMP/100mL)          | 1000                         | -                             | 100 - 10000 | -                 | 2,0 - 1,4E+04                       | Tabela AII-1                             |
| Estreptococos Fecais                      | -                            | -                             | -           | -                 | 2,0 - 3,6E+03                       | Tabela AII-2                             |
| Clostridium<br>Perfringens                | -                            | -                             | -           | -                 | 0,0 - 3,3E+03                       | Tabela AII-3                             |
| <i>Cryptosporidium sp</i><br>(oocistos/L) | -                            | -                             | -           | 0,08 e 0,29       | 0,0 - 0,3                           | Tabela AII-4                             |
| <i>Giardia sp</i> (cistos/L)              | -                            | -                             | -           | 0,01 - 5,20       | 0,0 - 13,0                          | Tabela AII-5                             |
| Nitrogênio Total<br>(mgN/L)               | -                            | -                             | 0,05 - 1,00 | <0,03 - 0,94      | 0,15 - 3,02                         | Tabela AII-6                             |



| PARÂMETRO                 | Resolução Conama n° 20 | Resolução Conama n° 357 | UNESCO       | Outras Fontes* | Faixa de Variação no Rio Cubatão | Tabelas Dados CETESB (Rio Cubatão) |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------------|----------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Ferro (mgFe/L)            | -                      | -                       | 0,05         | -              | 0,14 - 7,50                      | Tabela AII-7                       |
| Cloreto (mgCl/L)          | 250                    | 250                     | 0,60 - 25,00 | -              | 0,5 - 18,1                       | Tabela AII-8                       |
| Alumínio (mgAl/L)         | 0,10                   | -                       | 0,04         | -              | 0,01 - 5,44                      | Tabela AII-9                       |
| Bário (mgBa/L)            | 1,00                   | <b>0,70</b>             | -            | -              | 0,08 - 0,40                      | Tabela AII-10                      |
| Cádmio (mgCd/L)           | 0,001                  | 0,001                   | 0,001        | -              | 0,001 - 0,02                     | Tabela AII-11                      |
| Chumbo (mgPb/L)           | 0,03                   | <b>0,01</b>             | 0,04         | -              | 0,01 - 1,12                      | Tabela AII-12                      |
| Cobre (mgCu/L)            | 0,02                   | -                       | 0,0014       | -              | 0,004 - 0,11                     | Tabela AII-13                      |
| Níquel (mgNi/L)           | 0,025                  | 0,025                   | 0,0004       | -              | 0,01 - 0,05                      | Tabela AII-14                      |
| Mercúrio (mgHg/L)         | 0,0002                 | 0,0002                  | -            | -              | 0,0001 - 0,1                     | Tabela AII-15                      |
| Zinco (mgZn/L)            | 0,18                   | 0,18                    | 0,0002       | -              | 0,01 - 0,14                      | Tabela AII-16                      |
| Manganês (mgMn/L)         | 0,10                   | 0,10                    | 0,01         | -              | 0,01 - 0,16                      | Tabela AII-17                      |
| Cromo (mgCr/L)            | 0,05                   | 0,05                    | 0,0001       | -              | 0,01 - 0,05                      | Tabela AII-18                      |
| PTHM                      | -                      | -                       | -            | 322 - 674      | 54,5 - 405                       | Tabela AII-19                      |
| Toxicidade                | Não Tóxico             | Não Tóxico              | -            | -              | Não Tóxico - Crônico             | Tabela AII-20                      |
| COD <sup>(1)</sup> (mg/L) | -                      | -                       | 1,50 - 25,00 | 4,60 - 8,70    | 1,0 - 9,23                       | Tabela AII-21                      |

LEGENDA:

\* - EPA (ESTADOS UNIDOS, 1999a), Águas Protegidas - Alto Cotia (SÃO PAULO, 2002; 2004a), Águas Isentas de Contaminação Antrópica (LISLE; ROSE, 1995 - valores médios).

<sup>(1)</sup> - Carbono Orgânico Dissolvido

#### 5.1.4. Frequência de resultados não conformes

As Tabelas 15 a 18 foram elaboradas considerando as informações da Tabela 14 e os dados da CETESB para os últimos sete anos. Foi analisada a frequência em que estes dados superaram os limites esperados para qualidade do rio.

Tabela 15: Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos limites estipulados pela Resolução CONAMA n° 20.

| N° de medições que não atenderam ao limite da CONAMA n° 20 |       |       |               |       |       |               |       |      |            |
|--|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|------|------------|
| N° de medições realizadas                                  |       |       |               |       |       |               |       |      |            |
| CF   | Cd    | Pb    | Cu            | Ni    | Hg    | Zn            | Al    | Mn   | Toxicidade |
| 29/48  | 26/41 | 22/41 | 6/41          | 11/41 | 20/40 | 1/41          | 32/35 | 5/48 | 10/31      |
| Legenda:   |       |       |               |       |       |               |       |      |            |
| CF – Coliformes Fecais                                     |       |       | Cu – Cobre    |       |       | Zn – Zinco    |       |      |            |
| Cd – Cádmio  |       |       | Ni – Níquel   |       |       | Al – Alumínio |       |      |            |
| Pb – Chumbo  |       |       | Hg – Mercúrio |       |       | Mn – Manganês |       |      |            |

Tabela 16: Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos novos limites estipulados na Resolução CONAMA nº 357.

| Nº de medições que não atenderam ao limite da CONAMA nº 357 |  |
|---|--|
| Nº de medições realizadas                                   |  |
| <b>Pb</b>   |  |
| 40/41   |  |

Tabela 17: Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores ao limite estabelecido por outras fontes (águas protegidas ou isentas de contaminação antrópica), além das Resoluções CONAMA nº 20 e nº 357.

| Nº de medições que não atenderam ao limite |                    |            |      |
|--|--------------------|------------|------|
| Nº de medições realizadas                  |                    |            |      |
| <i>Cryptosporidium sp.</i>                 | <i>Giardia sp.</i> | Nitrogênio | COD  |
| 1/20                                       | 4/20               | 23/46      | 1/25 |

Tabela 18: Frequência em que os parâmetros apresentaram valores superiores aos apresentados pela UNESCO, comumente encontrados em águas naturais (isentas de contaminação antrópica).

| Nº de medições que não atenderam ao limite |           |           |           |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nº de medições realizadas                  |           |           |           |           |           |
| <b>CF</b>                                  | <b>NT</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>Cu</b> | <b>Cr</b> |
| 2/48                                       | 21/46     | 26/41     | 21/41     | 41/41     | 24/24     |
| <b>Zn</b>                                  | <b>Fe</b> | <b>Al</b> | <b>Mn</b> | <b>Ni</b> |           |
| 41/41                                      | 48/48     | 34/35     | 47/48     | 41/41     |           |

Analisando as tabelas anteriormente citadas, pôde-se concluir que os parâmetros e indicadores críticos para o Rio Cubatão são: Coliformes Fecais, *Cryptosporidium sp.*, *Giardia sp.*, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel, Mercúrio, Zinco, Alumínio, Manganês, Nitrogênio, Carbono Orgânico Total, Toxicidade Crônica e Ferro.

### 5.1.5. Avaliação do destino dos poluentes desconformes na estação de tratamento de água

De posse das variáveis de qualidade de água não conformes, foram avaliados os destinos dos poluentes na estação de tratamento, a fim de possibilitar a escolha dos parâmetros para a caracterização do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros.

#### **Indicadores Biológicos (Coliformes Fecais, *Cryptosporidium sp.*, *Giardia sp.*)**

Lechevallier e Au (2004) afirmaram que nos processos e operações unitárias do tratamento convencional de água, a coagulação era crucial para uma efetiva remoção dos patógenos. A coagulação, floculação e sedimentação combinadas podiam resultar em remoções da ordem de 1–2 log de bactérias, vírus e protozoários. Analisando o desempenho de ETAs de vários países, estes autores chegaram à conclusão que a coagulação, a floculação e a sedimentação eram responsáveis por 32 e 87% de remoção de Coliformes Totais e Estreptococos Fecais, respectivamente.

Segundo a EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001a), os oocistos de *Cryptosporidium sp.* são muito resistentes e capazes de sobreviver à maioria dos processos de desinfecção. Os oocistos resistem por vários meses no solo, em ambiente fresco e escuro e por mais de um ano em águas com baixa turbidez (ESTADOS UNIDOS, 2001a). Já que sobrevivem no solo nestas condições, é provável que possam sobreviver no lodo desaguado por alguns meses.

Segundo a EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001a), oocistos de *Cryptosporidium sp.* são removidos na coagulação, floculação e sedimentação, além da filtração (Tabela 19).

Tabela 19: Eficiência de alguns processos físico-químicos de tratamento de água na remoção de *Cryptosporidium sp.*

| Processo / Operação unitária          | Remoção de Oocistos Alcançada (log) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Coagulação + Sedimentação             | 0,4 - 1,7                           |
| Coagulação + Filtração                | 1,6 - 4,0                           |
| Coagulação + Sedimentação + Filtração | < 0,5 - 4,0                         |

Fonte: Adaptado de ESTADOS UNIDOS, 2001a

Em escala de bancada, a combinação de coagulação, floculação e sedimentação alcançou valores de remoção de oocistos de *Cryptosporidium sp.* iguais ou inferiores a 1,0 log (ESTADOS UNIDOS, 2001b).

Segundo a Environmental Protection Agency (ESTADOS UNIDOS, 1999a), em águas com turbidez de 27 a 32 NTU, que sofreram coagulação com alumínio e passaram por processo de decantação, houve remoção de 65% a 83% dos cistos de *Giardia sp.*, respectivamente. No entanto, águas com valores de turbidez inferiores, 7,5 a 15 NTU, coaguladas com alumínio e com pequeno acréscimo de polímero aniônico e que, seguidamente, passaram por processo de decantação, apresentaram eficiência de remoção um pouco superior (o autor não indicou quanto).

Em estações convencionais adequadamente operadas, produzindo águas com turbidez final entre 0,1 e 0,2 NTU, Nieminski e Ongerth (1995) obtiveram eficiência na remoção de cistos de *Giardia sp.* em torno de 3,0 log.

Portanto, durante o tratamento da água, os patógenos são removidos na coagulação, floculação, decantação e filtração. Conseqüentemente, estarão presentes no lodo dos decantadores e nas águas de lavagem dos filtros, sendo estes parâmetros importantes na sua caracterização.

### **Metais (Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel, Mercúrio, Zinco, Alumínio, Manganês e Ferro)**

Os metais podem ser encontrados na água nas formas: combinada com a matéria orgânica ou inorgânica; solúvel ou particulada.

Logsdon e Symons (1975) estudaram a remoção de mercúrio durante o tratamento convencional e concluíram que ele era adsorvido nas partículas de argila e removido pela coagulação, floculação e sedimentação.

A EPA (ESTADOS UNIDOS, 1979) apud Morita (1993) verificaram, através de um levantamento em diversos sistemas de tratamento físico-químico de efluentes industriais, que a coagulação, a floculação e a sedimentação removiam mais de 69% de cádmio, cobre, mercúrio, chumbo, níquel e zinco, sendo estes metais adsorvidos no floco.

Faust et al. (1998) afirmaram que a coagulação, floculação e sedimentação eram responsáveis pela remoção de 90 a 100% do cádmio, do cromo e do chumbo e de 40 a 70% do mercúrio, contidos na água superficial.

Patoczka *et al.* (1998) concluíram que os metais pesados podiam ser adsorvidos pelos precipitados de hidróxido de ferro. Cátions como  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  eram adsorvidos em meio neutro e básico e ânions ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{VO}_3(\text{OH})^{2-}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ) em meio neutro e levemente ácido.

Lehmann *et al.* (1999) analisaram a remoção de cromo (VI) e zinco de soluções aquosas por coagulação, floculação e sedimentação. Eles constataram que o hidróxido de ferro removeu entre 10% e 50% do Cr (VI) contido na solução, em valores de pH iguais a 10 e 2, respectivamente. A remoção do zinco, por sua vez, foi maior com o aumento do pH, sendo nula em 2 e 100%, entre 8 e 10.

Segundo a AWWA (1990), o uso de coagulação, sedimentação e filtração proporciona uma eficiência na remoção do alumínio entre 0 e 60%. Srinivasan *et al.* (1999), no entanto, afirmaram que em valores de pH entre 6,5 e 8,5, o alumínio era praticamente insolúvel. Em alguns casos, a coagulação, nesta faixa de pH, resultava na remoção de até 95% de alumínio.

Segundo a WHO (2003), a coagulação é responsável por uma remoção superior a 50% do manganês contido na água. Remove, também, mais que 80% do cádmio e do mercúrio.

Para Johnston e Heijnen (2004), a coagulação e a filtração podem remover, com eficácia, o ferro e o manganês.

Dos dados de literatura, pode-se concluir que os metais presentes na água (Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, Hg, Zn, Al, Mn e Fe) ficarão adsorvidos no lodo ou estarão presentes na água de lavagem dos filtros.

### **Nitrogênio e Carbono Orgânico Total**

A remoção do nitrogênio pela coagulação-filtração está relacionada com a remoção do material coloidal (AGUILAR *et al.*, 2001; 2005).

Aguilar et al. (2005) estudaram o uso de coagulação e floculação para remover nitrogênio de uma água residuária contendo 90 mg.L<sup>-1</sup> de Nitrogênio Total Kjeldahl, 24 mg.L<sup>-1</sup> de amônia e 53 mg.L<sup>-1</sup> de nitrogênio albuminóide. Eles constataram que a aplicação de diferentes coagulantes (sulfato férrico, sulfato de alumínio e cloreto polialumínico), com ou sem a adição de polímero aniônico, resultou na remoção da ordem de 51 a 63 % do NTK, 3 a 17 % da amônia e 80 a 88 % do nitrogênio albuminóide.

Poon e Chu (1999) analisaram o tratamento de esgotos sanitários pela decantação primária convencional quimicamente assistida. Eles constataram que a adição de 30 ppm (partes por milhão) de cloreto férrico e 0,5 ppm de polímero resultou em uma remoção de nitrogênio total superior a 70%.

O COT da água pode ser removido com a aplicação de quantidades suficientes de coagulantes, geralmente superiores àquelas aplicadas na remoção de turbidez (CALIFÓRNIA, 2004). Segundo a AWWA (1990), a remoção de carbono orgânico dissolvido está relacionada com a remoção de substâncias húmicas. A coagulação e a filtração foram citadas por esta referência como etapas importantes para a remoção destas substâncias da água. Ainda segundo este autor, em alguns estudos, obteve-se remoção de COT da ordem de 60 a 70% utilizando coagulação convencional e sedimentação.

Eikebrokk (1999) estudou a remoção de substâncias húmicas, utilizando processos de coagulação e filtração direta, em escala piloto. Para os experimentos, utilizou água com baixa alcalinidade e rica em material orgânico natural. As remoções de carbono orgânico variaram entre 40 e 70%.

Considerando os dados de literatura anteriormente citados, pode-se concluir que parte do Nitrogênio e do COT, presentes na água, ficará adsorvida no lodo ou estará presente na água de lavagem dos filtros.

## **5.2. Análise dos Contaminantes Presentes nos Produtos Químicos Utilizados na ETA Cubatão.**

Segundo Carvalho (2000), os produtos químicos adicionados à água bruta durante o tratamento são responsáveis por 20 a 92% dos sólidos contidos nos resíduos de ETAs. Desta forma, os

contaminantes contidos nestes produtos podem ter grande influência nas características químicas dos resíduos e na seleção do método de disposição final. Este autor afirma que os reagentes químicos podem ser responsáveis por 100% dos teores de cromo, cobre e chumbo presentes nos lodos de ETAs.

A seguir, na Tabela 20, são listados os teores dos contaminantes dos produtos químicos monitorados pela SABESP na ETA Cubatão.

Tabela 20: Teores dos contaminantes dos produtos químicos monitorados pela SABESP na ETA Cubatão.

| PRODUTOS QUÍMICOS ADICIONADOS AO TRATAMENTO |                                     |   | CONTAMINANTES   | Variação     | LIMITES <sup>(1)</sup>              |
|---|-------------------------------------|---|-----------------|--------------|-------------------------------------|
|   |                                     |   | Cloreto Férrico | Fabricante 1 | Ferro Total – FeCl <sub>3</sub> (%) |
| Ferro II (%Fe II / Fe Total)                | 0,1 - 3,0                           | máx. 2,5  |                 |              |                                     |
| Acidez Livre – HCl Livre (%)                | 0,0 - 1,7                           | máx. 1,0  |                 |              |                                     |
| Alumínio (mg/Kg)                            | 178,5 - 516,8                       | máx. 400  |                 |              |                                     |
| Cromo (mg/Kg)                               | 0,0 - 91,30                         | máx. 40   |                 |              |                                     |
| Material Insolúvel (%)                      | 0,0 - 0,05                          | máx. 0,1  |                 |              |                                     |
| Fabricante 2                                | Ferro Total – FeCl <sub>3</sub> (%) | 34,8 - 41,7   |                 | min. 38      |                                     |
|   | Ferro II (%Fe II / Fe Total)        | 0,2 - 2,7   |                 | máx. 2,5     |                                     |
|   | Acidez Livre – HCl Livre (%)        | 0,2 - 1,3   |                 | máx. 1,0     |                                     |
|   | Alumínio (mg/Kg)                    | 264,6 - 643,2   |                 | máx. 400     |                                     |
|   | Cromo (mg/Kg)                       | 0,0 - 67,4  |                 | máx. 40      |                                     |
|   | Material Insolúvel (%)              | 0,0 - 0,05  |                 | máx. 0,1     |                                     |
| Cal Virgem                                  | Fabricante 3                        | Óxido de Cálcio Livre - CaO (%)                           | 79,6 - 95,8     | min. 89      |                                     |
|   |                                     | Carbonato de Cálcio - CaCO <sub>3</sub> (%)               | 2,0 - 17,0      | máx. 5,5     |                                     |
|   | Fabricante 4                        | Óxido de Cálcio Livre - CaO (%)                           | 91,9 - 97,5     | min. 89      |                                     |
|   |                                     | Carbonato de Cálcio - CaCO <sub>3</sub> (%)               | 2,3 - 5,4       | máx. 5,5     |                                     |
|   | Fabricante 5                        | Óxido de Cálcio Livre - CaO (%)                           | 91,5 - 97,9     | min. 89      |                                     |
|   |                                     | Carbonato de Cálcio - CaCO <sub>3</sub> (%)               | 0,7 - 5,0       | máx. 5,5     |                                     |
| Cal Hidratada                               | Fabricante 6                        | Hidróxido de Cálcio - Ca(OH) <sub>2</sub> (%)             | 89,5 - 94,8     | min. 90      |                                     |
|   |                                     | Carbonato de Cálcio - CaCO <sub>3</sub> (%)               | 3,0 - 8,6       | máx. 5,5     |                                     |
|   | Fabricante 7                        | Hidróxido de Cálcio - Ca(OH) <sub>2</sub> (%)             | 84,6 - 93,3     | min. 90      |                                     |
|   |                                     | Carbonato de Cálcio - CaCO <sub>3</sub> (%)               | 2,9 - 7,4       | máx. 5,5     |                                     |
| Ácido Fluorsilícico                         | Fabricante 8                        | Ácido Fluorsilícico - H <sub>2</sub> FIS <sub>6</sub> (%) | 20,9 - 25,2     | min. 20      |                                     |
|   |                                     | Acidez Livre (%)  | 0,1 - 0,8       | máx. 1,0     |                                     |
|   | Fabricante 9                        | Ácido Fluorsilícico - H <sub>2</sub> FIS <sub>6</sub> (%) | 17,9 - 25,0     | min. 20      |                                     |
|   |                                     | Acidez Livre (%)  | 0,0 - 1,0       | máx. 1,0     |                                     |

LEGENDA:

<sup>(1)</sup> limites utilizados pela SABESP na certificação dos produtos químicos



Como pode ser observado da Tabela 20, a SABESP não quantifica os teores de arsênio, cromo, cobre, chumbo, níquel, selênio e zinco no cloreto férrico, contaminantes comumente encontrados neste produto químico (CORNWELL et al., 1990). Analisando os teores dos contaminantes monitorados, pode-se afirmar que além destes, merecem atenção o Alumínio e o Cromo.

### 5.3. Caracterização do Lodo Desaguado

Do levantamento realizado nos itens 5.1 e 5.2, concluiu-se que os parâmetros que deveriam ser avaliados no lodo desaguado eram: Coliformes Fecais, *Cryptosporidium sp.*, *Giardia sp.*, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel, Mercúrio, Zinco, Alumínio, Manganês, Ferro, Toxicidade Crônica, Nitrogênio e Carbono Orgânico Total. Além destes parâmetros, foram determinados todos os constantes na NBR 10004 (BRASIL, 1987a).

Considerando o uso do lodo na cerâmica vermelha, foram incluídos os seguintes parâmetros na caracterização: compostos orgânicos voláteis, cloretos, cloro e compostos organo-halogenados (TOX).

Além disso, foi feita a caracterização mineralógica e geotécnica do lodo.

#### 5.3.1. Características físico-químicas e microbiológicas do lodo

Foram realizadas sete caracterizações da massa bruta do lodo, segundo a NBR 10004 (BRASIL, 1987a), seis determinações de compostos orgânicos voláteis e seis determinações microbiológicas (ANEXO III – Tabelas AIII-1, AIII-2 e AIII-3). Um resumo dos resultados é mostrado nas Tabelas 21 e 22. A Tabela 21 inclui, ainda, um resumo dos valores característicos de lodos de cloreto férrico encontrados por autores citados na revisão bibliográfica (CORDEIRO; 1993; HORTH et al.; 1994; BARBOSA; 2000; BARROSO et al.; 2001; HUANG et al.; 2001; RICHTER; 2001; PAULSRUD et al.; 2002; GODBOLD et al.; 2003).

Tabela 21: Características físico-químicas do lodo desaguado da ETA Cubatão e comparação com os valores encontrados na revisão bibliográfica.

| PARÂMETROS                                 | UNIDADE | VARIAÇÃO       | RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA <sup>(1)</sup> |
|--|---------|----------------|--|
| Arsênio                                    | mg/kg   | <1,00 - 20,70  | 10 - 20  |
| Bário                                      | mg/kg   | 76,3           | -  |
| Berílio                                    | mg/kg   | <1,00 - <1,95  | -  |
| Cádmio                                     | mg/kg   | <1,10          | 0,06 - 1,20                                    |
| Carbono Orgânico Total                     | %(m/m)  | 1,83 - 4,70    | 7,72   |
| Chumbo                                     | mg/kg   | 4,42 - 103,00  | 6,4 - 54                                       |
| Cianeto                                    | mg/kg   | <0,17 - <1,00  | -  |
| Cloretos                                   | mg/kg   | <7,00 - 474,00 | -  |
| Cloro Residual                             | mg/kg   | <0,5           | -  |
| Cobre                                      | mg/kg   | 16,00          | <10,0 - 110                                    |
| <b>Compostos Organo-Halogenados (TOX)</b>  | %       | <0,05          | -  |
| Cromo Hexavalente                          | mg/kg   | <1,00 - 1,11   | -  |
| Cromo Total                                | mg/kg   | 5,88 - 72,50   | <5,8 - 82,3                                    |
| Fenol                                      | mg/kg   | <0,50 - <2,97  | -  |
| Mercúrio                                   | mg/kg   | <0,25 - <1,00  | 0,01 - 0,46                                    |
| Níquel                                     | mg/kg   | <1,99          | 3,4 - 90,0                                     |
| Óleos e Graxas                             | %       | <0,05 - 0,09   | -  |
| Selênio                                    | mg/kg   | <1,00 - <7,75  | -  |
| Surfactantes                               | mg/kg   | <0,50 - 0,96   | -  |
| Vanádio                                    | mg/kg   | 7,49 - <328    | -  |
| Zinco                                      | mg/kg   | 24,50          | 31,5 - 296                                     |
| <b>Hidrocarbonetos Líquidos/Bombeáveis</b> | %       | <0,05          | -  |
| pH   | UpH     | 6,5 - 7,9      | 5,0 - 10,6                                     |
| Umidade                                    | %       | 17,30 - 84,60  | 81,50 - 99,94                                  |
| Líquidos Livres                            | mL/100g | Ausente        | -  |
| <b>Compostos Orgânicos Voláteis</b>        |         |                |  |
| Clorometano                                | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Cloreto de Vinila                          | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Bromometano                                | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,1-Dicloroetano                           | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Cloreto de metileno                        | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Disulfeto de Carbono                       | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Trans-1,2-Dicloroetano                     | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,1-Dicloroetano                           | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 2-Butanona                                 | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Cis-1,2-Dicloroetano                       | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Clorofórmio                                | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,1,1-Tricloroetano                        | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,2-Dicloroetano                           | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Tetracloro de carbono                      | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Benzeno                                    | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Tricloroetano                              | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,2-Dicloropropano                         | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Bromodiclorometano                         | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Cis-1,3-Dicloropropeno                     | mg/kg   | <0,06          | -  |
| Tolueno                                    | mg/kg   | <0,06          | -  |
| 1,1,2-Tricloroetano                        | mg/kg   | <0,06          | -  |

| PARÂMETROS   | UNIDADE | VARIAÇÃO | RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA <sup>(1)</sup> |
|--|---------|----------|--|
| <b>Compostos Orgânicos Voláteis</b>  |         |          |  |
| <b>Tetracloroetano</b>   | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>Dibromoclorometano</b>  | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>Clorobenzeno</b>  | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>Etilbenzeno</b>   | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>m,p-Xilenos</b>   | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>o-Xileno</b>  | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>Estireno</b>  | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>Bromofórmio</b>   | mg/kg   | <0,06    | -  |
| <b>1,1,2,2-Tetracloroetano</b>   | mg/kg   | <0,06    | -  |
| LEGENDA:   |         |          |  |
| <sup>(1)</sup> CORDEIRO; 1993; HORTH <i>et al.</i> ; 1994; BARBOSA; 2000; BARROSO <i>et al.</i> ; 2001; HUANG <i>et al.</i> ; 2001; RICHTER; 2001; PAULSRUD <i>et al.</i> ; 2002; GODBOLD <i>et al.</i> ; 2003 |         |          |  |

Tabela 22: Caracterização microbiológica do lodo desaguado da ETA Cubatão.

| PARÂMETROS                | UNIDADE | VARIAÇÃO |
|---------------------------|---------|----------|
| <b>Coliformes Totais</b>  | NMP/g   | 2 – 372  |
| <b>Coliformes Fecais</b>  | NMP/g   | <1 – 10  |
| <i>Giardia sp</i>         | -       | Negativo |
| <i>Cryptosporidium sp</i> | -       | Negativo |

Comparando os resultados encontrados com os valores pesquisados na revisão bibliográfica (CORDEIRO; 1993; HORTH *et al.*; 1994; BARBOSA; 2000; BARROSO *et al.*; 2001; HUANG *et al.*; 2001; RICHTER; 2001; PAULSRUD *et al.*; 2002; GODBOLD *et al.*; 2003), constatou-se que a maioria dos parâmetros apresentou valores na mesma ordem de grandeza que os constantes nas referências. O COT, o níquel e o zinco foram menores na ETA Cubatão, provavelmente devido à qualidade da água. Este manancial apresenta boa qualidade quando não sofre a interferência da Billings. Com relação ao mercúrio, não foi possível realizar a comparação, pois os limites de detecção foram diferentes.

### 5.3.2. Caracterização mineralógica do lodo desaguado da ETA Cubatão e comparação com as características das argilas

Com o propósito de aplicação do lodo na indústria cerâmica, em substituição à argila, fez-se necessária a caracterização de suas fases cristalinas mais freqüentes e a porcentagem de óxidos. Para isto, foram realizadas cinco determinações por difratometria e duas por fluorescência de raios-x. Além disto, foi determinado o índice de plasticidade do lodo.

Foram caracterizadas, da mesma forma, as diversas argilas que compõem a massa processada para produção dos blocos. A Tabela 23 resume as fases cristalinas mais freqüentes no lodo e nas diversas argilas (os resultados individuais podem ser encontrados no ANEXO IV). As características mineralógicas do lodo não foram comparadas com as das misturas indicadas nas duas últimas colunas da tabela. Estas mostram a composição da massa final utilizada para fabricação dos blocos.

Tabela 23: Resumo das fases cristalinas mais freqüentes do lodo e das diversas argilas e misturas.

| Composto                   | Lodo | Saibro | Argila Amarela | Argila Verde Escuro | Taguá | Mistura Argilas Jazida <sup>(13)</sup> | Mistura Argilas Teste <sup>(14)</sup> | Mistura Argilas Pátio <sup>(15)</sup> |
|----------------------------|------|--------|----------------|---------------------|-------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Quartzo <sup>(1)</sup>     | X    | X      | X              | X                   | X     | X                                      | X                                     | X                                     |
| Goethita <sup>(2)</sup>    | X    |        |                |                     |       |  |                                       |                                       |
| Hematita <sup>(3)</sup>    | X    | X      | X              |                     |       | X                                      | X                                     | X                                     |
| Caulinita <sup>(4)</sup>   | X    | X      | X              | X                   | X     | X                                      | X                                     | X                                     |
| Muscovita <sup>(5)</sup>   | X    |        |                | X                   | X     | X                                      |                                       | X                                     |
| Ilita <sup>(6)</sup>       | X    | X      | X              | X                   | X     | X                                      | X                                     | X                                     |
| Calcita <sup>(7)</sup>     | X    |        |                |                     |       |  |                                       |                                       |
| Gipsita <sup>(8)</sup>     |      | X      |                |                     |       |  |                                       |                                       |
| Rutilo <sup>(9)</sup>      |      |        | X              | X                   | X     |  | X                                     | X                                     |
| Braunita <sup>(10)</sup>   |      |        |                |                     |       |  | X                                     |                                       |
| Clinocloro <sup>(11)</sup> |      |        |                |                     | X     |  |                                       | X                                     |
| Bixbyita <sup>(12)</sup>   |      |        |                |                     |       | X                                      |                                       |                                       |

LEGENDA:  
<sup>(1)</sup> SiO<sub>2</sub>; <sup>(2)</sup> FeO(OH); <sup>(3)</sup> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <sup>(4)</sup> Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>; <sup>(5)</sup> (K,Na)(Al,Mg,Fe)<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>;  
<sup>(6)</sup> (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>; <sup>(7)</sup> CaCO<sub>3</sub>; <sup>(8)</sup> Al(OH)<sub>3</sub>; <sup>(9)</sup> TiO<sub>2</sub>;  
<sup>(10)</sup> (Ca<sub>0,01</sub>Mg<sub>0,13</sub>Mn<sub>0,86</sub>)(Fe<sub>0,03</sub>Mn<sub>0,97</sub>)<sub>6</sub>SiO<sub>12</sub>; <sup>(11)</sup> (Mg<sub>5</sub>Al)(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>; <sup>(12)</sup> Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;  
<sup>(13)</sup> amostra coletada em diversos pontos na jazida, composta de argilas de um horizonte, de três diferentes cores (vermelha, verde, amarela); <sup>(14)</sup> mistura de argilas utilizada nos testes; <sup>(15)</sup> mistura de argilas utilizada na cerâmica.

Da comparação dos resultados obtidos, foi possível perceber que o lodo possui fases cristalinas semelhantes às das argilas, diferindo apenas no que se refere à presença de goethita e calcita.

Os elementos mais abundantes, considerando os três principais picos dos difratogramas, em cada matriz, estão mostrados na Tabela 24. Para o lodo, foram considerados os picos dos 5 difratogramas.

Tabela 24: Elementos mais abundantes no lodo e nas diversas argilas e misturas.

| Composto  | Lodo | Saibro | Argila Amarela | Argila Verde Escuro | Taguá | Mistura Argilas Jazida | Mistura Argilas Teste | Mistura Argilas Pátio |
|-----------|------|--------|----------------|---------------------|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Quartzo   | X    | X      | X              | X                   | X     | X                      | X                     | X                     |
| Goethita  | X    |        |                |                     |       |                        |                       |                       |
| Caulinita | X    | X      | X              |                     |       | X                      | X                     | X                     |
| Ilita     |      |        |                | X                   |       |                        |                       |                       |
| Calcita   | X    |        |                |                     |       |                        |                       |                       |

O lodo apresentou, predominantemente, o quartzo. A caulinita, a goethita e a calcita também foram notadas. Estes resultados são similares aos resultados do lodo analisado por Novaes (2005), que concluiu que: (1) a presença de quartzo nos lodos dos decantadores das ETAs 3 e 4 de Campinas interferiu na detecção de outros componentes pelo difratômetro de raios X; (2) a caulinita conferiu certa plasticidade à massa cerâmica; (3) a goethita e a calcita tiveram como origem a precipitação do ferro e da cal, respectivamente, durante o tratamento da água.

Os resultados das determinações realizadas por fluorescência de raios-X para o lodo e para as argilas são apresentados na Tabela 25. Constam na tabela, também, valores encontrados nos lodos caracterizados por Cosin *et al.* (2002). Novamente, o lodo não foi comparado com as duas últimas colunas, que representam misturas utilizadas para fabricação dos blocos.

Tabela 25: Resumo dos resultados das determinações dos óxidos por fluorescência de raios-X no lodo, nas argilas e nas misturas.

|                                | Lodo<br>(COSIN<br><i>et al.</i> , 2002) | Lodo<br>(%) | Saibro<br>(%) | Argila<br>Amarela<br>(%) | Argila<br>Verde<br>Escuro<br>(%) | Taguá<br>(%) | Mistura<br>Argilas<br>Jazida<br>(%) | Mistura<br>Argilas<br>Teste<br>(%) | Mistura<br>Argilas<br>Pátio<br>(%) |
|--------------------------------|---|-------------|---------------|--------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 0,15                                    | -           | <0,1          | <0,1                     | <0,1                             | <0,1         | <0,1                                | <0,10                              | <0,10                              |
| MgO                            | 0,34                                    | 0,62 - 0,95 | 0,14          | 0,71                     | 1,04                             | 2,44         | 0,25                                | 0,74                               | 0,76                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,93                                    | 7,13 - 11,9 | 20,4          | 18,8                     | 15,4                             | 15,4         | 16,4                                | 18,6                               | 18,1                               |
| SiO <sub>2</sub>               | 8,31                                    | 20,9 - 27,0 | 62,8          | 66,7                     | 71,3                             | 74,9         | 69,7                                | 66,6                               | 67,3                               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,52                                    | 0,28 - 0,35 | <0,1          | <0,1                     | <0,1                             | <0,1         | <0,1                                | <0,1                               | <0,1                               |
| SO <sub>3</sub>                | -                                       | 0,24 - 0,25 | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| Cl                             | -                                       | 0,07 - 0,14 | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,12                                    | 0,92 - 1,18 | 0,34          | 0,58                     | 2,1                              | 2,38         | 0,59                                | 0,82                               | 0,75                               |
| CaO                            | 5,35                                    | 4,47 - 5,66 | <0,1          | <0,1                     | 0,18                             | 0,94         | <0,1                                | 0,16                               | 0,13                               |
| TiO <sub>2</sub>               | -                                       | 0,46 - 0,80 | 0,85          | 0,35                     | 0,45                             | 0,52         | 0,64                                | 0,62                               | 0,56                               |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                                       | 0,01 - 0,03 | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| MnO                            | 0,89                                    | 0,23 - 0,34 | <0,1          | <0,1                     | 0,13                             | 0,09         | 0,96                                | <0,1                               | <0,1                               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 61,18                                   | 52,1 - 63,0 | 6,1           | 4,32                     | 2,64                             | 3,25         | 4,3                                 | 4,66                               | 4,03                               |
| NiO                            | -                                       | -           | -             | -                        | -                                | 0,01         | -                                   | -                                  | -                                  |
| CuO                            | -                                       | <0,01       | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| ZnO                            | -                                       | 0,13 - 0,66 | -             | -                        | -                                | 0,03         | -                                   | -                                  | -                                  |
| Br                             | -                                       | 0,01        | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| Rb <sub>2</sub> O              | -                                       | 0,01        | -             | -                        | -                                | 0,03         | -                                   | -                                  | -                                  |
| SrO                            | -                                       | 0,04 - 0,08 | -             | -                        | -                                | 0,02         | -                                   | -                                  | -                                  |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -                                       | -           | -             | -                        | -                                | 0,01         | -                                   | -                                  | -                                  |
| ZrO <sub>2</sub>               | -                                       | 0,01 - 0,02 | -             | -                        | -                                | 0,04         | -                                   | -                                  | -                                  |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | -                                       | <0,01       | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| BaO                            | -                                       | 0,1         | -             | -                        | -                                | -            | -                                   | -                                  | -                                  |
| PF                             | 19,76                                   | -           | 9,36          | 9,06                     | 7,2                              | -            | 7,78                                | 8,7                                | 9,09                               |

O lodo da ETA Cubatão apresentou, no geral, teores de óxidos maiores que os obtidos por Cosin *et al.* (2002), exceto para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO (menores valores) e CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (valores na mesma ordem de grandeza).

As diferenças de composição mais marcantes entre o lodo da ETA Cubatão e as argilas foram:

- o lodo possui teores de CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cerca de 30 vezes, 12 vezes e 2 vezes, respectivamente, superiores aos apresentados pela maior parte das argilas;
- o teor de SiO<sub>2</sub> no lodo foi cerca de 3 vezes menor que os apresentados pelas diversas argilas utilizadas para comparação;
- como era esperado, o lodo apresentou um teor de fósforo cerca de 3 vezes maior que os teores constatados para as argilas.

Segundo Pracidelli et al. (1997), a sílica livre na argila reduz a plasticidade, diminui a retração, facilita a secagem, reduz a resistência à tração e aumenta a brancura; a alumina livre reduz a plasticidade, o trincamento e a resistência mecânica; os álcalis rebaixam o ponto de fusão, aumentam a porosidade, facilitam a secagem e reduzem a plasticidade; o óxido de ferro diminui as características refratárias e o cálcio clareia a cor da argila.

Embora o lodo da ETA Cubatão contenha teores de cálcio, óxido de ferro e alumina superiores aos das argilas, não foram observados o clareamento da massa, a diminuição da resistência mecânica e o abaixamento do ponto de fusão no processamento industrial.

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg resultaram nos índices de plasticidade indicados na Tabela 26.

Tabela 26: Índices de plasticidade do lodo, das argilas e das diferentes misturas.

|                            | Lodo         | Saibro | Argila Amarela | Argila Verde Escuro | Taguá | Mistura Argilas Jazida | Mistura Argilas Teste | Mistura Argilas Pátio |
|----------------------------|--------------|--------|----------------|---------------------|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Índice de Plasticidade (%) | Não Plástico | 18,7   | 47,1           | 21,8                | 20,9  | 18,9                   | 31,2                  | 27,8                  |

Embora o lodo tenha sido classificado como não plástico, sua presença na massa cerâmica não causou alterações significativas na trabalhabilidade durante o processo industrial. Segundo Novaes (2005), o excesso de água no lodo pode ter amenizado a falta de plasticidade.

Foi, ainda, constatada que a presença de ferro no lodo adicionado à massa colaborou para uma cor mais avermelhada no bloco (Figura 9), contribuindo para uma melhor aceitação no mercado. Os blocos com lodo ficaram cerca de 100 g mais leves que aqueles sem adição do resíduo. Esta característica é favorável para redução do custo de transporte dos blocos da indústria até o consumidor final.

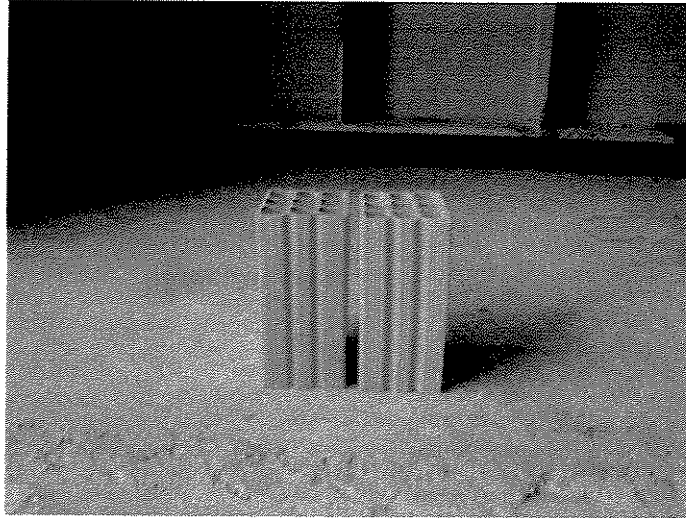


Figura 9 – Bloco com lodo (esquerda) mais avermelhado que o bloco sem lodo (direita).

### 5.3.3. Análise granulométrica do lodo e comparação com as características das argilas

A análise granulométrica do lodo foi realizada para que fosse possível avaliar a viabilidade do uso deste resíduo, em substituição à argila, no processo cerâmico. As curvas granulométricas referentes às amostras de lodo e às diferentes argilas e misturas são mostradas nas Figuras 10 a 15. As Figuras 16 e 17 fornecem a curva granulométrica da massa utilizada na fabricação dos blocos.



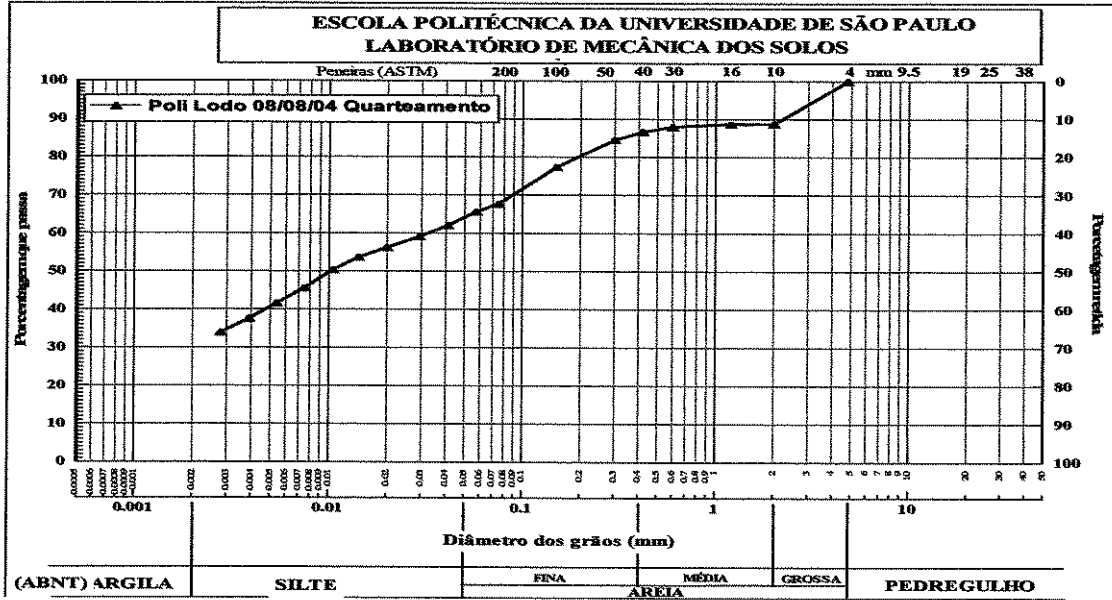


Figura 10 – Curva granulométrica do lodo.

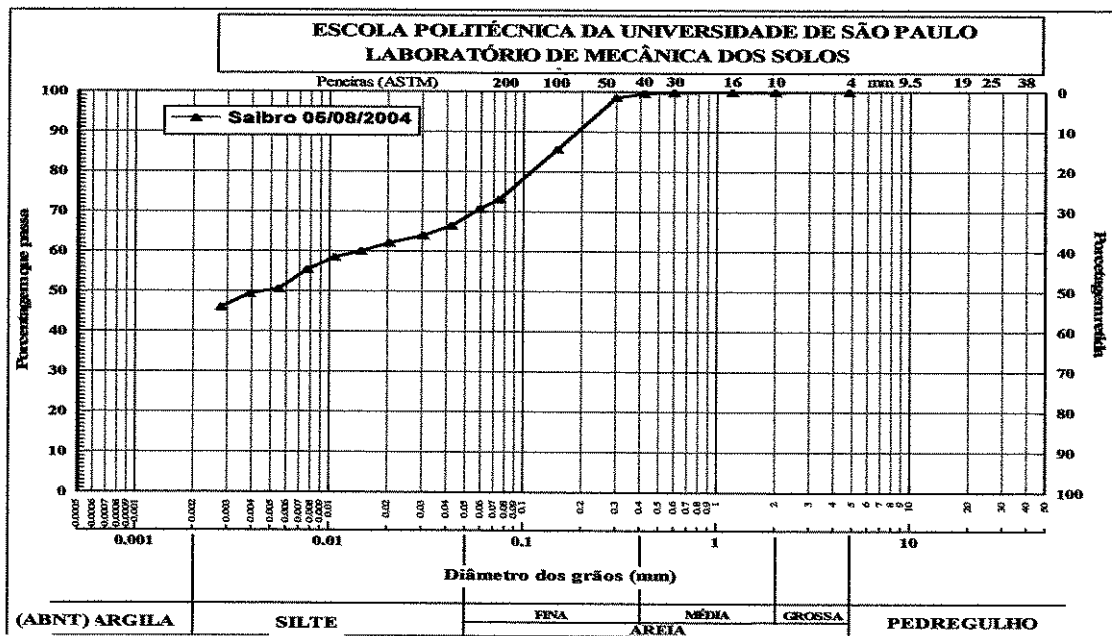


Figura 11 – Curva granulométrica do saibro.

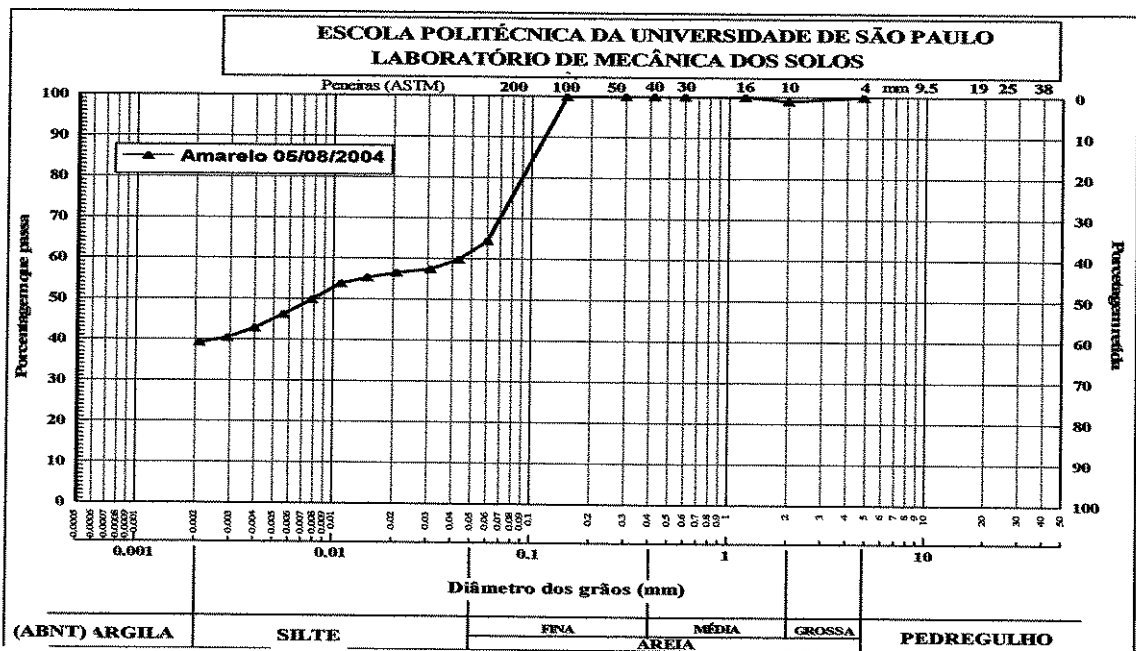


Figura 12 – Curva granulométrica da argila amarela.

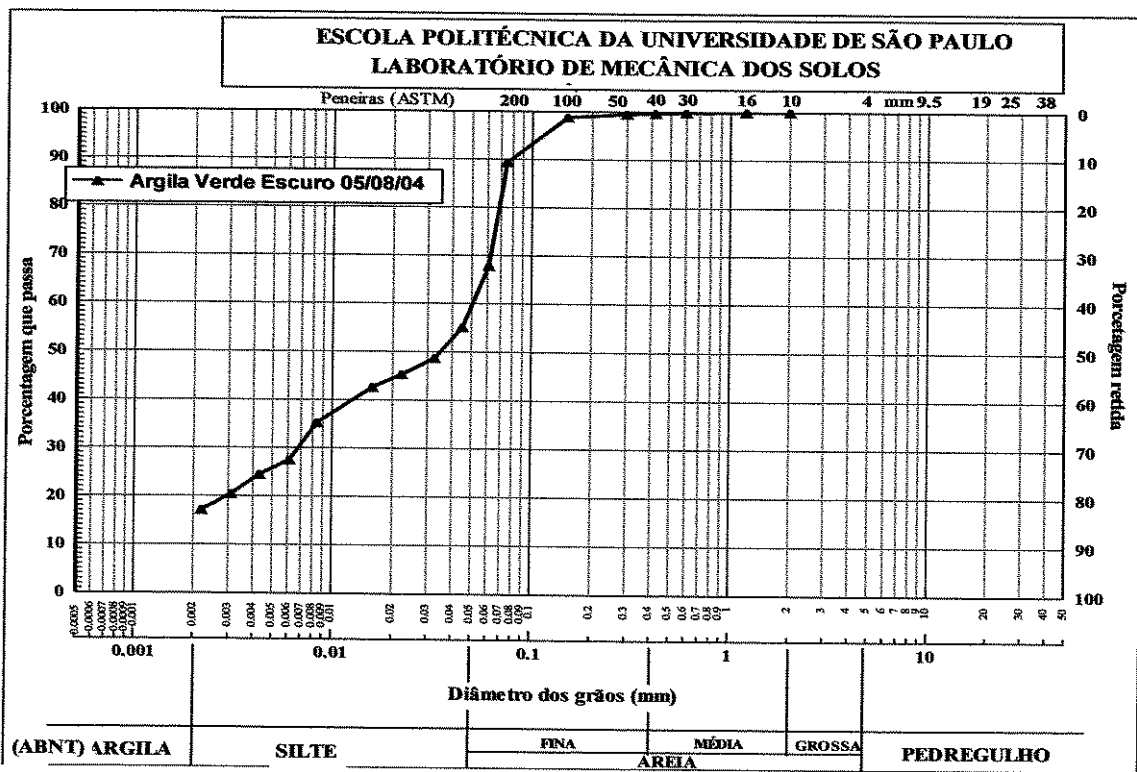


Figura 13 – Curva granulométrica da argila verde escuro.

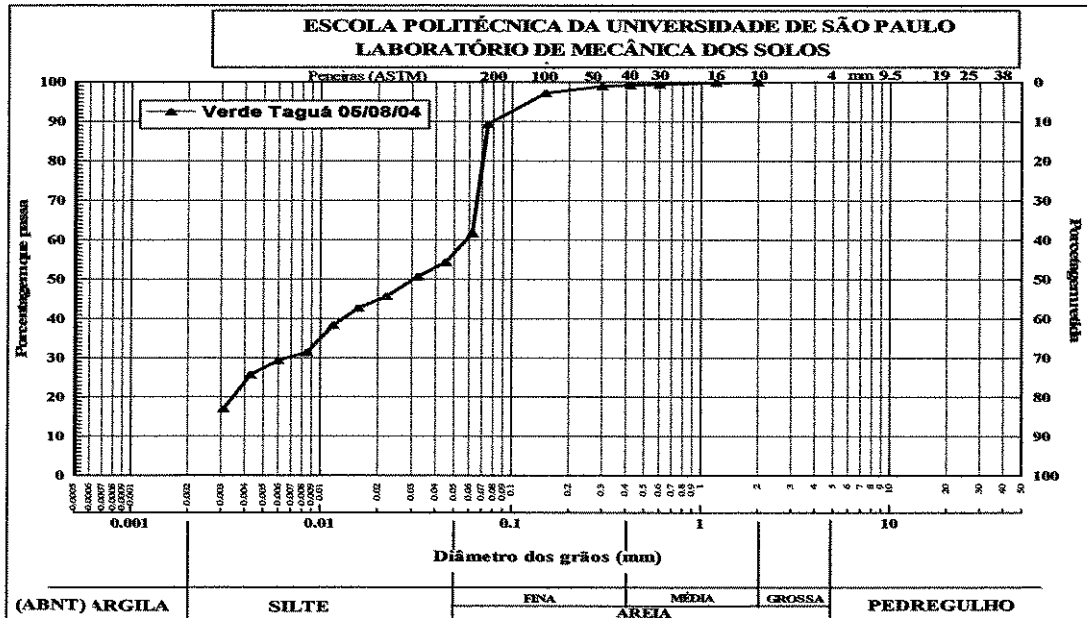


Figura 14 – Curva granulométrica do taguá.

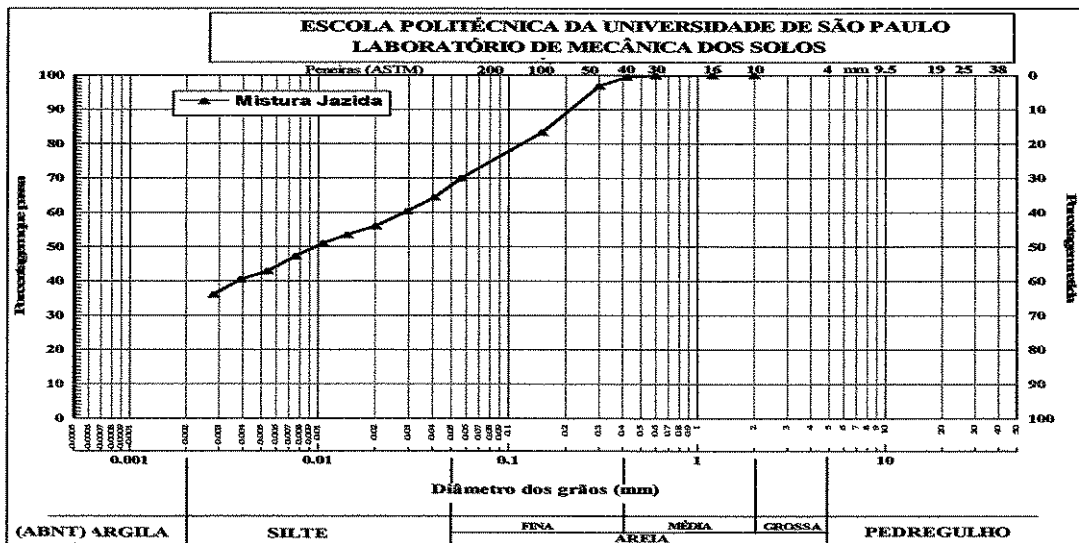


Figura 15 – Curva granulométrica da mistura argilas jazida.

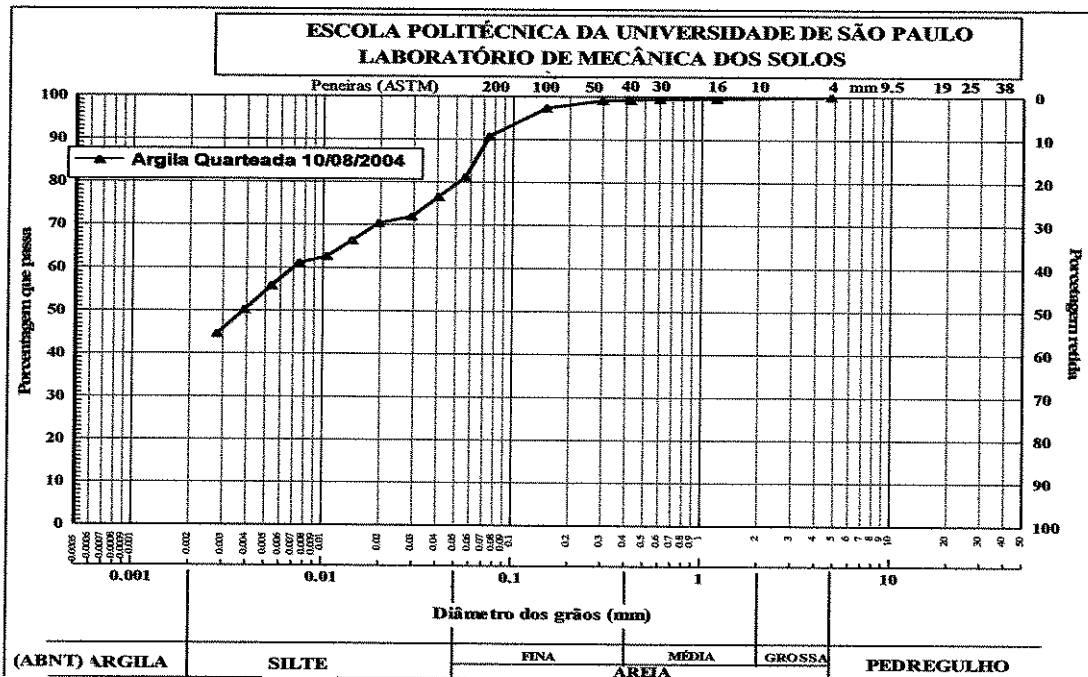


Figura 16 – Curva granulométrica da mistura argilas teste.

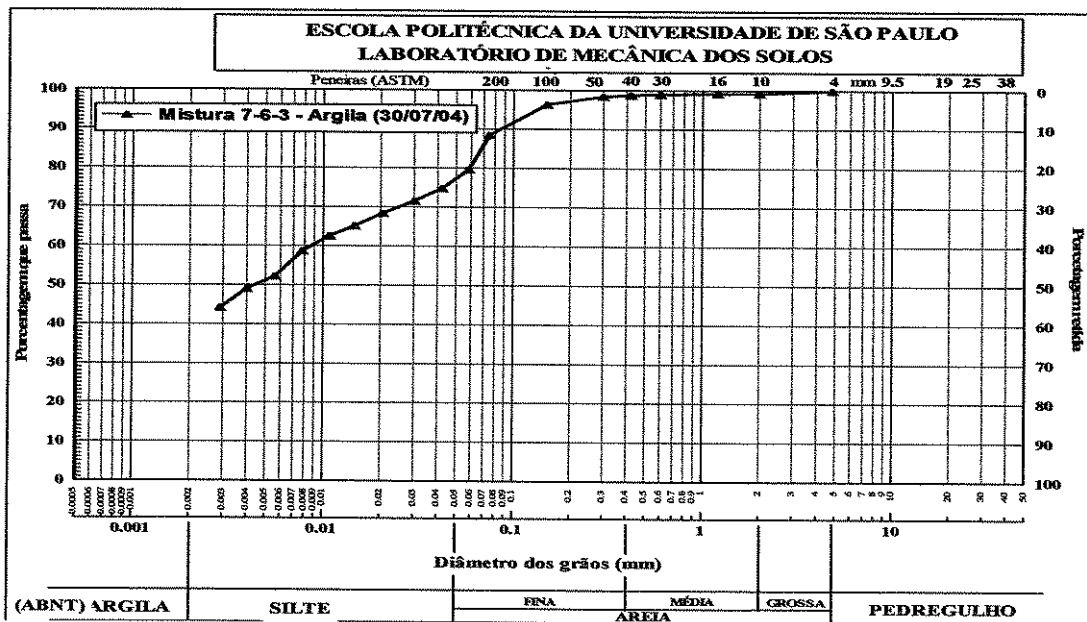


Figura 17 – Curva granulométrica da mistura argilas pátio.

A Tabela 27 indica as composições granulométricas das amostras de lodo, argilas e diferentes misturas.

Tabela 27: Composição granulométrica do lodo da ETA Cubatão, das argilas e misturas estudadas.

|                      | Lodo | Saibro | Argila Amarela | Argila Verde Escuro | Taguá | Mistura Argilas Jazida | Mistura Argilas Teste | Mistura Argilas Pátio |
|----------------------|------|--------|----------------|---------------------|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Pedregulho           | -    | -      | -              | -                   | -     | -                      | -                     | -                     |
| Areia Grossa         | 11,2 | 0,1    | -              | -                   | -     | -                      | 0,4                   | 0,7                   |
| Areia Média          | 2,1  | 1,3    | -              | 0,3                 | 0,7   | 0,5                    | 0,3                   | 0,5                   |
| Areia Fina           | 21,0 | 27,9   | 35,5           | 44,7                | 44,8  | 29,4                   | 18,1                  | 19,1                  |
| Silte Grosso         | 9,5  | 8,5    | 7,9            | 9,7                 | 8,7   | 14,0                   | 10,9                  | 11,3                  |
| Silte Médio          | 14,6 | 11,6   | 10,3           | 17,8                | 16,4  | 13,1                   | 14,6                  | 16,1                  |
| Silte Fino           | 9,9  | 11,3   | 7,0            | 10,4                | 13,0  | 12,2                   | 16,1                  | 13,6                  |
| Argila               | 31,8 | 39,4   | 39,3           | 17,1                | 16,4  | 30,8                   | 39,7                  | 38,7                  |
| Finos <sup>(1)</sup> | 67,7 | 73,1   | 97,4           | 89,4                | 89,4  | 70,2                   | 90,7                  | 88,4                  |

LEGENDA: <sup>(1)</sup> porcentagem que passa pela peneira # 200 – malha com abertura igual a 0,074 mm

Observa-se da Tabela 27, que o lodo poderia substituir a argila amarela ou a mistura de argilas ou o saibro, em termos de granulometria.

Com o objetivo de aplicação no processo cerâmico, é importante classificar as matérias-primas nas frações com diâmetros menores do que 2 $\mu$ m, entre 2 a 20  $\mu$ m e maiores do que 20  $\mu$ m. A Tabela 28 mostra esta classificação para as diferentes massas cerâmicas normalmente utilizadas na indústria estudada, além de mostrar os valores para a mistura ótima.

Tabela 28: Frações granulométricas das misturas de argilas utilizadas normalmente na cerâmica e mistura ótima.

| Diâmetro das partículas | Mistura Argilas Teste | Mistura Argilas Pátio | Mistura Ótima para Tijolos Furados PRACIDELLI <i>et al.</i> (1997) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| < 2 $\mu$ m             | 40                    | 39                    | 20 - 30  |
| >2 a < 20 $\mu$ m       | 31                    | 30                    | 20 - 55  |
| > 20 $\mu$ m            | 30                    | 32                    | 20 - 50  |

Pode-se observar que as massas cerâmicas apresentaram grande quantidade de argila plástica (representada pela porcentagem relativa a diâmetros  $< 2\mu\text{m}$ ), cerca de 10% a mais que a mistura ótima requer. O acréscimo do lodo, com a granulometria indicada, deve atuar positivamente para que a massa atinja a chamada “mistura ótima”. Por possuir granulometria maior, traria aumento na porcentagem total de desplastificantes na massa. Na tentativa de melhorá-la e considerando o acréscimo de lodo, foram propostas as misturas que seguem. Deve-se salientar que estas propostas foram teoricamente elaboradas com base na granulometria de cada material. Não foram realizados testes comprovando que as misturas resultariam nas composições granulométricas destacadas.

### **Proposta para Diferentes Misturas Lodo:Argilas**

Em todas as propostas, a presença do taguá e da argila verde escuro foi mantida, pois, segundo afirmações do ceramista, estas são as argilas mais nobres e importantes para manutenção da resistência e trabalhabilidade da massa.

Para elaboração das propostas A e B, foi levado em consideração que o lodo não deve ser usado na mistura em quantidade superior a 10% (viabilidade técnica) e que o saibro deve ser gasto na maior quantidade possível, pois é um material que existe em abundância na jazida. Na proposta C, aumentou-se a quantidade de saibro e foi fixado o uso de 20 % de taguá e 20 % de argila verde escuro. Na proposta D, aumentou-se novamente a quantidade de saibro e não foram utilizadas a argila amarela e mistura argilas jazida. Devido à plasticidade e às conclusões que serão apresentadas a seguir, foi proposta a mistura E.

As frações granulométricas das argilas e o resultado das misturas propostas estão mostrados na Tabela 29.

**Proposta A:** 10% Lodo + 20% Saibro + 10% Argila Amarela + 20% Argila Verde Escuro + 30% Taguá + 10% Mistura Argilas Jazida

**Proposta B:** 10% Lodo + 20% Saibro + 10% Argila Amarela + 30% Argila Verde Escuro + 20% Taguá + 10% Mistura Argilas Jazida

**Proposta C:** 10% Lodo + 30% Saibro + 10% Argila Amarela + 20% Argila Verde Escuro + 20% Taguá + 10% Mistura Argilas Jazida

**Proposta D:** 10% Lodo + 50% Saibro + 20% Argila Verde Escuro + 20% Taguá

**Proposta E:** 10% Lodo + 30% Saibro + 20% Argila Amarela + 20% Argila Verde Escuro + 20% Taguá

Tabela 29: Frações granulométricas do lodo, das argilas e misturas propostas (%).

| Diâmetro das Partículas | Lodo | Saibro | Argila Amarela | Argila Verde Escuro | Taguá | Mistura Argilas Jazida | A  | B  | C  | D  | E  |
|-------------------------|------|--------|----------------|---------------------|-------|------------------------|----|----|----|----|----|
| < 2µm                   | 32   | 39     | 39             | 17                  | 16    | 31                     | 26 | 26 | 29 | 30 | 30 |
| >2 a < 20 µm            | 24   | 23     | 17             | 28                  | 29    | 25                     | 26 | 26 | 25 | 25 | 24 |
| > 20 µm                 | 44   | 38     | 43             | 55                  | 54    | 44                     | 48 | 48 | 46 | 45 | 46 |

Nota: A, B, C, D e E referem-se, respectivamente, às propostas A, B, C, D e E mencionadas anteriormente

Em todas as propostas, obteve-se composição granulométrica dentro da faixa considerada ótima por PRACIDELLI *et al.* (1997), conforme mostra a Figura 18.

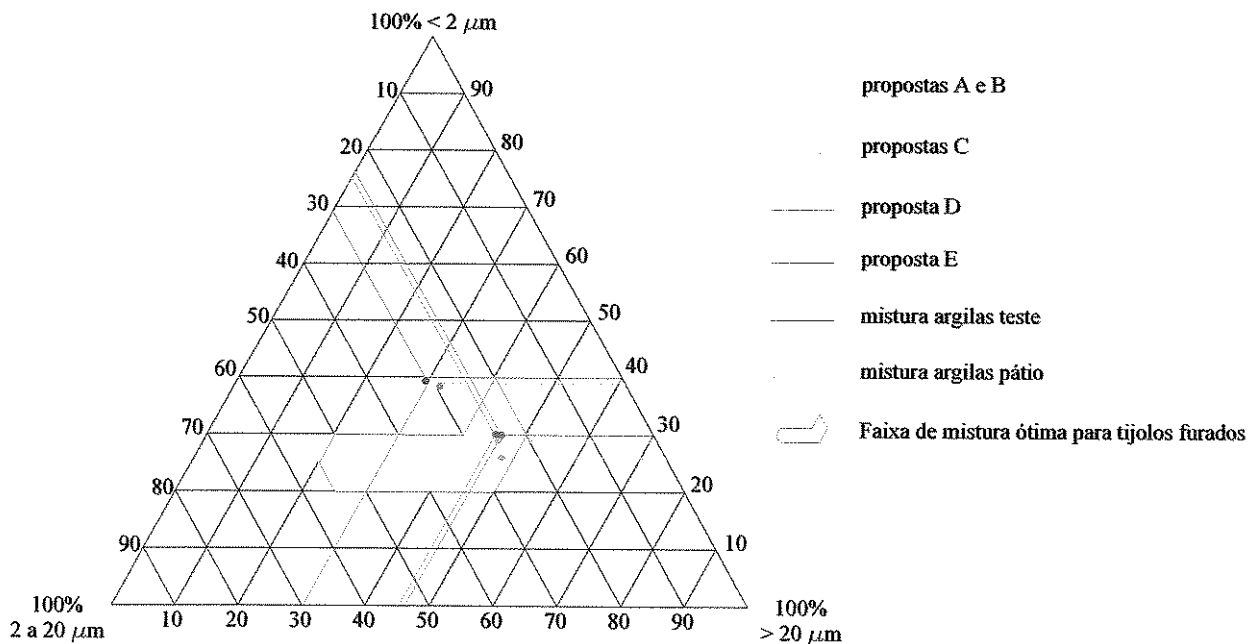


Figura 18 – Diagrama de Winkler – adaptado de PRACIDELLI *et al.* (1997) – e comportamento das massas cerâmicas propostas e daquelas normalmente utilizadas na cerâmica estudada.

#### 5.3.4. Conclusões sobre a potencialidade do lodo de substituir uma das argilas no processo cerâmico

Analisando todos os parâmetros individualmente, concluiu-se que:

- com relação às fases cristalinas mais freqüentes, o lodo apresentou características semelhantes as de todas as argilas analisadas;
- em termos de granulometria, o lodo se aproximou das composições apresentadas pela argila amarela, pela mistura argilas jazida e pelo saibro;
- quanto à plasticidade, o lodo foi classificado como não plástico, enquanto que as argilas saibro e mistura argilas jazida apresentaram os menores valores de índice de plasticidade (18,7 e 18,9%, respectivamente). A maior plasticidade foi a da argila amarela (47,1%).
- analisando as misturas propostas, observou-se que o lodo, embora contenha maior quantidade de areia, se adequou à massa. A mistura argilas jazida e o lodo apresentaram grande quantidade de grãos maiores que 20  $\mu\text{m}$  (44%).

Dos resultados obtidos, pôde-se concluir que, apesar das semelhanças constatadas, o lodo não poderia substituir a argila amarela. Esta é uma argila plástica, que confere trabalhabilidade à massa cerâmica. Embora o saibro e a mistura argilas jazida tenham apresentado os menores índices de plasticidade, ainda são considerados altamente plásticos. Por outro lado, a granulometria do saibro é muito diferente à do lodo. Como a presença da água intimamente ligada ao lodo ameniza a falta de plasticidade, ele atuaria melhor substituindo a mistura de argilas jazida.

#### 5.4. Avaliação da Viabilidade Técnica da Aplicação do Lodo na Cerâmica

A viabilidade técnica da aplicação do lodo da ETA Cubatão na indústria cerâmica já havia sido verificada por Morita *et al.* (2002).

Os autores foram pioneiros, no Brasil, na aplicação do lodo de ETA na cerâmica vermelha em escala industrial. Utilizou-se, para a resolução do problema da disposição inadequada do lodo da



ETA Cubatão, a metodologia de negociação de conflitos com a participação dos setores envolvidos (indústria cerâmica, concessionária de serviços de saneamento básico e universidade). Foram incorporados 25, 20, 12,5 e 10% (v/v) de lodo nos blocos cerâmicos. Os autores chegaram as seguintes conclusões:

- a metodologia de negociação de conflitos com a participação dos setores envolvidos mostrou-se eficaz. A indústria interessou-se em receber o lodo; a concessionária de serviços de saneamento pôde, pela primeira vez no Estado de São Paulo, resolver definitivamente o problema de disposição de um lodo de ETA; a Universidade de São Paulo cumpriu seu papel, pois as pesquisas realizadas resolveram, de fato, um problema ambiental;
- as características geotécnicas e mineralógicas do lodo da ETA Cubatão e das argilas utilizadas na indústria cerâmica permitiram verificar uma compatibilidade entre os dois materiais. Não ocorreram interferências significativas no processo produtivo e nem nas características finais dos blocos cerâmicos processados;
- os estudos de incorporação de lodo de ETA na indústria de bloco cerâmico devem ser feitos caso a caso, de modo a verificar a compatibilidade entre os materiais e os processos de fabricação envolvidos;
- além das características físico-químicas das matérias-primas, verificou-se que a adoção do molde de paredes retas da extrusora permitiu uma resistência à compressão dos blocos superior ao do molde de paredes curvas. A Figura 19 mostra os dois tipos de blocos sendo ensaiados (com molde de paredes curvas e com molde de paredes retas).

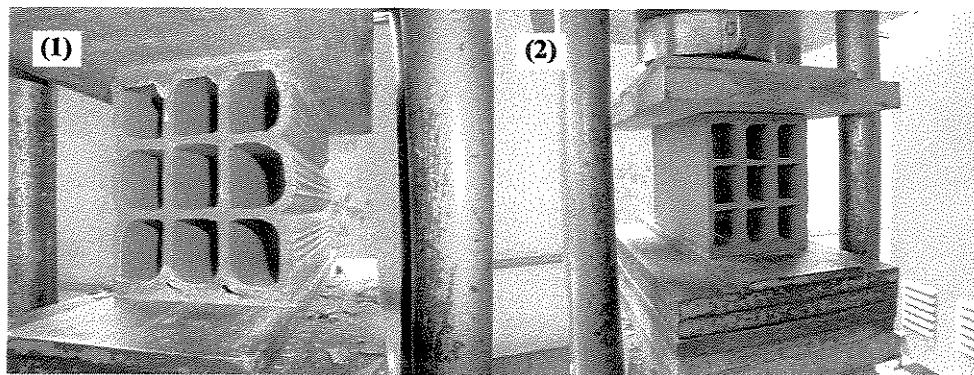


Figura19 – (1) Bloco moldado com paredes curvas; (2) Bloco moldado com paredes retas.

A viabilidade técnica desta aplicação não é o escopo do presente estudo, mas a pesquisadora e sua orientadora complementaram o trabalho realizado por Morita *et al.* (2002), efetuando as análises comparativas citadas nos itens 5.3.2. e 5.3.3. Além disto, foram feitos ensaios mecânicos, aproveitando os blocos produzidos durante os testes de queima. Estes ensaios incluíram: verificação das dimensões, esquadro e planeza das faces; absorção de água e resistência à compressão. Os testes foram realizados tanto para os blocos com 10% de lodo quanto para os blocos sem resíduo e os resultados foram avaliados segundo as normas NBR 7171 (BRASIL, 1992a) e NBR 8042 (BRASIL, 1992b).

#### 5.4.1. Dimensões dos blocos

Os ensaios para dimensionar os blocos foram realizados segundo as normas NBR 7171 (BRASIL, 1992a) e NBR 8042 (BRASIL, 1992b), em triplicata, para cada tipo de bloco (sem lodo e com 10% de lodo), totalizando 6 lotes de blocos ensaiados. Para cada lote, foram separados 24 blocos para a verificação da dimensão real. Destes 24 blocos, 13 foram selecionados para medir largura, altura e comprimento, um a um.

Além destas medidas, foram conferidas também as espessuras das paredes (externas e internas).

As paredes externas e internas foram indicadas por siglas conforme mostra a Figura 20.

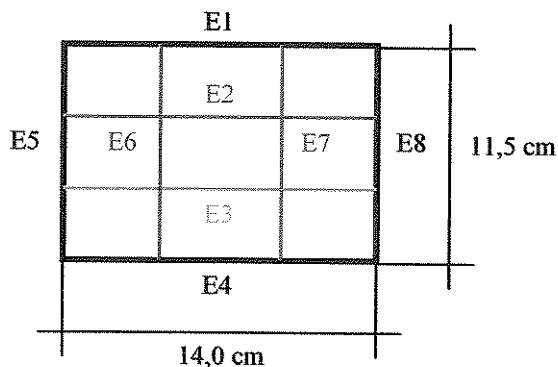


Figura 20 – Siglas para paredes externas e internas dos blocos.

A seguir, são apresentados os resultados.

Tabela 30: Resultados dos ensaios para verificação da dimensão real dos blocos com e sem lodo de ETA – 24 blocos colocados lado a lado.

| <b>1º Lote Bloco Sem Lodo</b>        |            |            |            |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5769       | 3379       | 2768       |
| MT/24                                | 240,38     | 140,79     | 115,33     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | 0,38       | 0,79       | 0,33       |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |
| <b>2º Lote Bloco Sem Lodo</b>        |            |            |            |
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5762       | 3374       | 2767       |
| MT/24                                | 240,08     | 140,58     | 115,29     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | 0,08       | 0,58       | 0,29       |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |
| <b>3º Lote Bloco Sem Lodo</b>        |            |            |            |
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5772       | 3377       | 2759       |
| MT/24                                | 240,50     | 140,71     | 114,96     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | 0,50       | 0,71       | -0,04      |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |
| <b>1º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |            |            |            |
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5748       | 3369       | 2748       |
| MT/24                                | 239,50     | 140,38     | 114,50     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | -0,50      | 0,38       | -0,50      |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |
| <b>2º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |            |            |            |
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5751       | 3380       | 2763       |
| MT/24                                | 239,63     | 140,83     | 115,13     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | -0,38      | 0,83       | 0,13       |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |
| <b>3º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |            |            |            |
|                                      | C (mm)     | H (mm)     | L (mm)     |
| MEDIDA TOTAL (MT)                    | 5757       | 3377       | 2764       |
| MT/24                                | 239,88     | 140,71     | 115,17     |
| PADRÃO                               | 240        | 140        | 115        |
| MT/24 - PADRÃO                       | -0,13      | 0,71       | 0,17       |
| LIMITE                               | 3          | 3          | 3          |
| <b>ADEQUADO</b>                      | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> | <b>SIM</b> |

Tabela 31: Largura, altura e comprimento dos blocos sem lodo de ETA.

| <b>1º Lote Bloco Sem Lodo</b>                           |                              |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Bloco   | C (mm)                       | H (mm)                       | L (mm)                       |
| 30  | 239,4                        | 138,5                        | 112,7                        |
| 33  | 235,8                        | 139,0                        | 112,7                        |
| 18  | 240,7                        | 138,6                        | 116,4                        |
| 76  | 239,1                        | 137,5                        | 115,7                        |
| 16  | 239,8                        | 138,4                        | 116,5                        |
| 22  | 239,9                        | 140,0                        | 114,0                        |
| 80  | 235,2                        | 138,4                        | 112,0                        |
| 57  | 237,0                        | 139,2                        | 112,8                        |
| 58  | 237,5                        | 137,9                        | 117,1                        |
| 61  | 235,2                        | 138,2                        | 116,9                        |
| 62  | 234,8                        | 138,2                        | 112,6                        |
| 63  | 240,7                        | 139,2                        | 113,5                        |
| 60  | 240,8                        | 138,0                        | 113,4                        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b> | 4                            | 0                            | 0                            |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO CONFORMES</b>                        | NÃO                          | SIM                          | SIM                          |
| <b>MENOS QUE 5 NÃO CONFORMES</b>                        | SIM                          |                              |                              |
| <b>RESULTADO</b>  | Necessária segunda medição   | Aprovado na Primeira medição | Aprovado na Primeira medição |
| <b>2º Lote Bloco Sem Lodo</b>                           |                              |                              |                              |
| Bloco   | C (mm)                       | H (mm)                       | L (mm)                       |
| 17  | 238,2                        | 137,9                        | 116,6                        |
| 41  | 237,9                        | 139,0                        | 112,5                        |
| 49  | 237,2                        | 138,0                        | 116,0                        |
| 24  | 241,0                        | 138,1                        | 112,4                        |
| 81  | 239,0                        | 138,4                        | 112,3                        |
| 29  | 241,4                        | 138,5                        | 112,9                        |
| 37  | 241,1                        | 138,3                        | 113,3                        |
| 56  | 238,1                        | 139,1                        | 113,2                        |
| 79  | 238,9                        | 138,1                        | 112,2                        |
| 68  | 238,4                        | 137,7                        | 116,4                        |
| 64  | 237,0                        | 138,2                        | 116,6                        |
| 53  | 237,2                        | 138,0                        | 117,6                        |
| 19  | 235,3                        | 138,8                        | 116,0                        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b> | 1                            | 0                            | 0                            |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO CONFORMES</b>                        | SIM                          | SIM                          | SIM                          |
| <b>RESULTADO</b>  | Aprovado na primeira Medição | Aprovado na primeira Medição | Aprovado na primeira medição |

| <b>3º Lote Blocos Sem Lodo</b>   |                                    |                                    |                                    |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Bloco  | C (mm)                             | H (mm)                             | L (mm)                             |
| 32   | 240,6                              | 139,0                              | 116,2                              |
| 13   | 238,6                              | 138,1                              | 112,2                              |
| 1  | 237,7                              | 138,3                              | 112,3                              |
| 45   | 237,7                              | 138,6                              | 114,2                              |
| 12   | 240,0                              | 139,7                              | 112,8                              |
| 74   | 237,6                              | 137,1                              | 114,1                              |
| 72   | 237,3                              | 137,3                              | 112,4                              |
| 50   | 240,6                              | 138,4                              | 113,2                              |
| 51   | 237,1                              | 137,0                              | 112,0                              |
| 2  | 237,6                              | 138,3                              | 112,3                              |
| 7  | 242,2                              | 138,3                              | 113,5                              |
| 5  | 239,7                              | 138,0                              | 112,6                              |
| 69   | 238,5                              | 138,0                              | 112,3                              |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(<math>X - X_{padr\tilde{a}o} &gt; 3</math> ou <math>&lt; -3</math>)</b>   | 0                                  | 0                                  | 0                                  |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO<br/>CONFORMES</b>   | SIM                                | SIM                                | SIM                                |
| <b>RESULTADO</b>   | Aprovado na<br>primeira<br>Medição | Aprovado na<br>primeira<br>medição | Aprovado na<br>primeira<br>medição |
| <b>LEGENDA:</b><br>$X_{padr\tilde{a}o}$ para Comprimento (C) = 240,0 mm<br>$X_{padr\tilde{a}o}$ para Altura (H) = 140,0 mm<br>$X_{padr\tilde{a}o}$ para Largura (L) = 115,0 mm |                                    |                                    |                                    |

Tabela 32: Segunda medição de comprimento para o 1º Lote de blocos sem lodo de ETA.

| <b>1º Lote Bloco Sem Lodo<br/>(segunda medição)</b>  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Bloco  | C (mm)                          |
| 47   | 242,0                           |
| 78   | 237,9                           |
| 20   | 230,0                           |
| 42   | 234,2                           |
| 71   | 238,5                           |
| 23   | 241,5                           |
| 34   | 237,5                           |
| 38   | 240,7                           |
| 65   | 238,9                           |
| 44   | 234,2                           |
| 75   | 237,4                           |
| 43   | 239,0                           |
| 25   | 236,8                           |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(<math>X - X_{padr\tilde{a}o} &gt; 3</math> ou <math>&lt; -3</math>)</b> | 4                               |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(1a + 2a medições)</b>   | 8                               |
| <b>RESULTADO</b>   | Reprovado na<br>Segunda medição |

Tabela 33: Espessura das paredes externas e internas dos blocos sem lodo de ETA.

| 1º Lote Bloco Sem Lodo                      |  |            |            |            |            |            |            |            |
|---|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Bloco                                       | E1<br>(mm)   | E2<br>(mm) | E3<br>(mm) | E4<br>(mm) | E5<br>(mm) | E6<br>(mm) | E7<br>(mm) | E8<br>(mm) |
| 30  | 6,5  | 5,2        | 5,3        | 6,2        | 6,2        | 5,6        | 5,8        | 8,2        |
| 33  | 6,9  | 5,6        | 5,9        | 6,8        | 8,0        | 5,2        | 5,6        | 7,0        |
| 18  | 7,2  | 6,2        | 5,9        | 7,6        | 7,5        | 5,6        | 5,0        | 7,2        |
| 76  | 7,2  | 6,7        | 6,2        | 7,2        | 7,8        | 6,2        | 6,1        | 7,5        |
| 16  | 6,9  | 7,0        | 6,2        | 7,0        | 7,2        | 5,0        | 5,5        | 7,2        |
| 22  | 7,2  | 6,2        | 6,0        | 7,3        | 7,9        | 5,5        | 5,4        | 7,0        |
| 80  | 7,0  | 5,0        | 5,8        | 6,9        | 7,9        | 5,5        | 5,4        | 6,9        |
| 57  | 7,2  | 5,5        | 5,8        | 6,7        | 7,4        | 5,1        | 5,7        | 8,0        |
| 58  | 7,4  | 6,3        | 6,0        | 7,1        | 7,0        | 6,0        | 5,6        | 8,1        |
| 61  | 7,1  | 6,7        | 6,3        | 7,1        | 7,1        | 5,6        | 5,3        | 7,6        |
| 62  | 6,5  | 5,6        | 5,3        | 7,1        | 8,0        | 5,5        | 5,2        | 7,0        |
| 63  | 6,8  | 5,7        | 6,1        | 7,4        | 7,0        | 5,7        | 5,8        | 7,3        |
| 60  | 7,4  | 5,8        | 5,4        | 7,0        | 6,6        | 5,5        | 5,5        | 6,0        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &lt;0)</b> | 5  | -          | -          | 4          | 2          | -          | -          | 2          |
| <b>RESULTADO</b>                            | Parede externa E4 necessita segunda medição. Paredes externas E5 e E8 estão conformes. Parede externa E1 não está conforme.<br><b>Bloco reprovado para paredes externas em primeira medição.</b> |            |            |            |            |            |            |            |
| 2º Lote Bloco Sem Lodo                      |  |            |            |            |            |            |            |            |
| Bloco                                       | E1<br>(mm)   | E2<br>(mm) | E3<br>(mm) | E4<br>(mm) | E5<br>(mm) | E6<br>(mm) | E7<br>(mm) | E8<br>(mm) |
| 17  | 6,8  | 6,0        | 6,6        | 7,1        | 6,9        | 5,3        | 5,3        | 8,0        |
| 41  | 7,2  | 6,0        | 6,0        | 7,1        | 5,4        | 6,9        | 6,1        | 7,4        |
| 49  | 7,0  | 5,7        | 5,1        | 6,4        | 7,3        | 6,0        | 5,4        | 7,1        |
| 24  | 6,9  | 5,5        | 5,8        | 6,7        | 6,7        | 4,8        | 4,9        | 8,2        |
| 81  | 6,5  | 5,4        | 5,7        | 7,0        | 7,4        | 4,4        | 5,0        | 7,4        |
| 29  | 7,3  | 5,5        | 5,5        | 8,0        | 7,5        | 5,5        | 5,8        | 5,6        |
| 37  | 6,8  | 5,6        | 5,9        | 7,3        | 8,2        | 6,2        | 5,2        | 7,1        |
| 56  | 6,4  | 5,8        | 5,6        | 7,4        | 8,7        | 5,8        | 5,2        | 7,0        |
| 79  | 7,3  | 5,8        | 5,6        | 7,3        | 7,5        | 4,8        | 4,3        | 7,7        |
| 68  | 6,8  | 6,4        | 6,1        | 7,0        | 7,3        | 5,6        | 5,4        | 8,4        |
| 64  | 7,0  | 6,3        | 6,3        | 7,6        | 7,4        | 6,5        | 5,7        | 7,4        |
| 53  | 6,9  | 6,3        | 6,8        | 7,3        | 8,1        | 5,4        | 5,6        | 8,0        |
| 19  | 6,7  | 5,9        | 6,8        | 7,2        | 7,2        | 6,3        | 5,4        | 7,6        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &lt;0)</b> | 8  | -          | -          | 2          | 3          | -          | -          | 1          |
| <b>RESULTADO</b>                            | Parede externa E5 necessita segunda medição. Paredes externas E4 e E8 estão conformes. Parede externa E1 não está conforme.<br><b>Bloco reprovado para paredes externas em primeira medição.</b> |            |            |            |            |            |            |            |

| 3º Lote Bloco Sem Lodo   |   |            |            |            |            |            |            |            |
|--|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Bloco  | E1<br>(mm)  | E2<br>(mm) | E3<br>(mm) | E4<br>(mm) | E5<br>(mm) | E6<br>(mm) | E7<br>(mm) | E8<br>(mm) |
| 32   | 7,9   | 6,2        | 6,2        | 6,8        | 7,2        | 6,7        | 6,0        | 6,5        |
| 13   | 6,8   | 5,4        | 5,5        | 7,3        | 7,5        | 6,0        | 5,5        | 8,1        |
| 1  | 7,0   | 6,4        | 5,6        | 8,1        | 6,1        | 5,9        | 5,4        | 7,4        |
| 45   | 7,0   | 6,4        | 5,6        | 7,5        | 6,5        | 6,1        | 6,1        | 7,9        |
| 12   | 6,9   | 6,2        | 6,6        | 7,3        | 7,2        | 5,4        | 5,6        | 7,3        |
| 74   | 7,3   | 5,2        | 5,7        | 7,5        | 8,0        | 5,3        | 4,8        | 7,5        |
| 72   | 7,0   | 5,4        | 5,8        | 6,7        | 7,0        | 5,3        | 5,0        | 7,3        |
| 50   | 6,7   | 5,5        | 5,4        | 7,5        | 6,6        | 5,3        | 6,6        | 8,6        |
| 51   | 7,0   | 5,8        | 5,8        | 7,9        | 6,2        | 5,6        | 6,1        | 7,3        |
| 2  | 7,3   | 5,6        | 5,4        | 7,1        | 8,3        | 5,8        | 6,0        | 6,9        |
| 7  | 7,3   | 6,0        | 5,8        | 7,8        | 6,8        | 6,4        | 6,0        | 7,7        |
| 5  | 7,2   | 5,3        | 5,8        | 6,7        | 8,2        | 6,0        | 5,6        | 7,3        |
| 69   | 7,9   | 5,3        | 6,0        | 7,4        | 5,4        | 6,0        | 5,5        | 7,6        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &lt;0)</b>                                  | 3   | -          | -          | 3          | 6          | -          | -          | 2          |
| <b>RESULTADO</b>   | Paredes externas E1 e E4 necessitam segunda medição. Parede externa E8 está conforme. Parede externa E5 não está conforme.<br><b>Bloco reprovado para paredes externas em primeira medição.</b> |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>LEGENDA:</b><br>Xpadrão para Espessura Externa (E1, E4, E5 e E8) = 7,0 mm |   |            |            |            |            |            |            |            |

Tabela 34: Largura, altura e comprimento dos blocos com 10% de lodo de ETA.

| 1º Lote Bloco Com 10% de Lodo                           |                            |                              |                            |
|---|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Bloco   | C (mm)                     | H (mm)                       | L (mm)                     |
| 12  | 235,1                      | 135,8                        | 111,4                      |
| 74  | 236,8                      | 140,0                        | 113,2                      |
| 17  | 238,6                      | 137,3                        | 111,5                      |
| 42  | 239,7                      | 138,1                        | 111,0                      |
| 7   | 238,2                      | 136,9                        | 112,0                      |
| 43  | 235,4                      | 138,5                        | 112,9                      |
| 46  | 240,3                      | 138,0                        | 115,2                      |
| 9   | 240,2                      | 139,0                        | 115,8                      |
| 65  | 240,6                      | 138,8                        | 116,9                      |
| 8   | 237,8                      | 137,3                        | 112,4                      |
| 62  | 239,8                      | 137,9                        | 112,2                      |
| 1   | 238,4                      | 139,4                        | 112,6                      |
| 64  | 239,8                      | 139,8                        | 112,6                      |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b> | 3                          | 2                            | 3                          |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO CONFORMES</b>                        | NÃO                        | SIM                          | NÃO                        |
| <b>MENOS QUE 5 NÃO CONFORMES</b>                        | SIM                        |                              | SIM                        |
| <b>RESULTADO</b>  | Necessária segunda medição | Aprovado na primeira medição | Necessária segunda medição |

**BIBLIOTECA CENTRAL**  
**DESENVOLVIMENTO**  
**COLEÇÃO**  
**UNICAMP**

| <b>2º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b>  |                              |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Bloco   | C (mm)                       | H (mm)                       | L (mm)                       |
| 68  | 238,1                        | 139,1                        | 116,8                        |
| 63  | 236,8                        | 139,6                        | 116,7                        |
| 25  | 236,3                        | 137,9                        | 111,6                        |
| 80  | 240,0                        | 137,6                        | 112,0                        |
| 31  | 239,7                        | 138,6                        | 113,1                        |
| 24  | 235,5                        | 139,0                        | 115,5                        |
| 72  | 238,3                        | 139,6                        | 116,7                        |
| 39  | 240,3                        | 138,8                        | 112,6                        |
| 37  | 237,7                        | 137,9                        | 116,5                        |
| 77  | 237,1                        | 138,4                        | 116,3                        |
| 29  | 237,8                        | 138,1                        | 116,1                        |
| 34  | 241,0                        | 140,3                        | 113,3                        |
| 78  | 238,3                        | 139,6                        | 116,0                        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b>   | 3                            | 0                            | 1                            |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO CONFORMES</b>  | NÃO                          | SIM                          | SIM                          |
| <b>MENOS QUE 5 NÃO CONFORMES</b>  | SIM                          |                              |                              |
| <b>RESULTADO</b>  | Necessária segunda medição   | Aprovado na primeira medição | Aprovado na primeira medição |
| <b>3º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b>  |                              |                              |                              |
| Bloco   | C (mm)                       | H (mm)                       | L (mm)                       |
| 50  | 239,4                        | 137,8                        | 112,1                        |
| 61  | 236,4                        | 137,7                        | 116,0                        |
| 70  | 239,0                        | 139,9                        | 113,1                        |
| 40  | 238,1                        | 139,1                        | 112,5                        |
| 76  | 239,1                        | 138,0                        | 116,3                        |
| 67  | 241,1                        | 140,4                        | 113,2                        |
| 69  | 238,2                        | 139,4                        | 116,4                        |
| 53  | 239,3                        | 139,2                        | 112,6                        |
| 58  | 237,1                        | 138,2                        | 113,1                        |
| 45  | 237,5                        | 138,1                        | 116,8                        |
| 49  | 240,0                        | 138,0                        | 112,1                        |
| 56  | 239,2                        | 137,8                        | 112,0                        |
| 14  | 238,0                        | 137,8                        | 112,1                        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b>   | 1                            | 0                            | 0                            |
| <b>MENOS QUE 2 NÃO CONFORMES</b>  | SIM                          | SIM                          | SIM                          |
| <b>RESULTADO</b>  | Aprovado na primeira medição | Aprovado na primeira medição | Aprovado na primeira medição |
| <b>LEGENDA:</b><br>Xpadrão para Comprimento (C) = 240,0 mm<br>Xpadrão para Altura (H) = 140,0 mm<br>Xpadrão para Largura (L) = 115,0 mm |                              |                              |                              |



Tabela 35: Segunda medição de comprimento e largura dos blocos com 10% de lodo de ETA (1º Lote).

| <b>1º Lote Bloco Com 10% de Lodo<br/>(segunda medição)</b> |                                   |                                   |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Bloco  | C (mm)                            | L (mm)                            |
| 16   | 237,3                             | 113,7                             |
| 51   | 238,8                             | 112,5                             |
| 66   | 237,5                             | 113,6                             |
| 2  | 239,1                             | 112,4                             |
| 28   | 239,6                             | 112,1                             |
| 35   | 238,4                             | 112,5                             |
| 4  | 239,0                             | 113,6                             |
| 18   | 237,8                             | 115,1                             |
| 23   | 236,3                             | 115,8                             |
| 26   | 237,1                             | 112,6                             |
| 47   | 237,5                             | 115,2                             |
| 73   | 237,5                             | 112,6                             |
| 13   | 237,6                             | 113,1                             |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b>    | 1                                 | 0                                 |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(1a + 2a medições)</b>                 | 4                                 | 3                                 |
| <b>RESULTADO</b>   | Aprovado<br>na segunda<br>medição | Aprovado<br>na segunda<br>medição |

Tabela 36: Segunda medição de comprimento dos blocos com 10% de lodo de ETA (2º Lote).

| <b>2º Lote Bloco Com 10% de Lodo<br/>(segunda medição)</b> |                                |
|--|--------------------------------|
| Bloco  | C (mm)                         |
| 21   | 235,7                          |
| 33   | 240,1                          |
| 27   | 240,1                          |
| 44   | 238,0                          |
| 71   | 240,2                          |
| 38   | 239,9                          |
| 79   | 237,1                          |
| 57   | 237,1                          |
| 32   | 237,6                          |
| 30   | 238,1                          |
| 11   | 240,7                          |
| 36   | 237,9                          |
| 19   | 235,5                          |
| <b>NÃO CONFORME (X - Xpadrão &gt; 3 ou &lt; -3)</b>        | 2                              |
| <b>NÃO CONFORME (1a + 2a medições)</b>                     | 5                              |
| <b>RESULTADO</b>   | Aprovado na<br>segunda medição |

Tabela 37: Espessuras das paredes externas e internas dos blocos com 10% de lodo de ETA.

| 1º Lote Blocos Com 10% de Lodo              |  |            |            |            |            |            |            |            |
|---|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Bloco                                       | E1<br>(mm)   | E2<br>(mm) | E3<br>(mm) | E4<br>(mm) | E5<br>(mm) | E6<br>(mm) | E7<br>(mm) | E8<br>(mm) |
| 12  | 7,0  | 5,1        | 5,4        | 7,1        | 7,3        | 5,4        | 4,6        | 7,7        |
| 74  | 7,4  | 5,5        | 5,7        | 7,2        | 7,2        | 5,9        | 5,5        | 6,2        |
| 17  | 7,3  | 5,5        | 5,6        | 6,6        | 7,9        | 5,0        | 6,1        | 7,5        |
| 42  | 7,4  | 5,3        | 5,8        | 6,7        | 7,4        | 4,7        | 6,2        | 7,5        |
| 7   | 7,0  | 5,0        | 5,6        | 7,1        | 7,5        | 4,2        | 6,0        | 7,1        |
| 43  | 7,4  | 5,8        | 5,9        | 7,7        | 7,2        | 6,0        | 5,5        | 5,8        |
| 46  | 7,3  | 6,3        | 5,9        | 7,2        | 7,1        | 5,2        | 5,5        | 7,3        |
| 9   | 7,0  | 6,4        | 6,3        | 7,0        | 7,8        | 6,0        | 5,2        | 7,3        |
| 65  | 7,2  | 5,7        | 6,4        | 7,4        | 7,3        | 5,2        | 5,8        | 7,0        |
| 8   | 7,4  | 5,9        | 6,2        | 7,9        | 7,4        | 5,5        | 6,5        | 7,4        |
| 62  | 6,4  | 6,0        | 5,4        | 7,7        | 7,4        | 6,3        | 4,5        | 7,2        |
| 1   | 7,2  | 6,2        | 5,6        | 7,2        | 6,4        | 5,8        | 6,3        | 8,0        |
| 64  | 6,8  | 5,7        | 5,3        | 7,7        | 7,0        | 4,2        | 6,2        | 7,8        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &lt;0)</b> | 2  | -          | -          | 2          | 1          | -          | -          | 2          |
| <b>RESULTADO</b>                            | Paredes externas (E1, E4, E5 e E8) estão conformes.<br><b>Bloco aprovado para paredes externas em primeira medição.</b>                                |            |            |            |            |            |            |            |
| 2º Lote Blocos Com 10% de Lodo              |  |            |            |            |            |            |            |            |
| Bloco                                       | E1<br>(mm)   | E2<br>(mm) | E3<br>(mm) | E4<br>(mm) | E5<br>(mm) | E6<br>(mm) | E7<br>(mm) | E8<br>(mm) |
| 68  | 7,3  | 6,7        | 6,1        | 6,7        | 8,8        | 5,4        | 5,2        | 7,4        |
| 63  | 7,3  | 6,4        | 6,3        | 7,0        | 7,6        | 5,5        | 5,5        | 7,2        |
| 25  | 6,4  | 5,6        | 5,6        | 7,8        | 7,3        | 5,3        | 5,4        | 7,0        |
| 80  | 7,6  | 5,3        | 5,7        | 6,2        | 7,6        | 4,4        | 5,3        | 7,5        |
| 31  | 7,3  | 6,0        | 5,6        | 7,6        | 7,1        | 5,5        | 5,7        | 7,2        |
| 24  | 7,5  | 6,3        | 6,1        | 7,5        | 7,0        | 5,4        | 5,8        | 7,2        |
| 72  | 7,5  | 6,5        | 6,4        | 6,6        | 7,2        | 6,3        | 5,5        | 7,3        |
| 39  | 7,4  | 5,3        | 5,4        | 7,0        | 7,6        | 6,3        | 5,3        | 7,0        |
| 37  | 7,3  | 6,1        | 6,4        | 7,4        | 7,7        | 5,4        | 5,4        | 7,3        |
| 77  | 7,2  | 6,4        | 6,3        | 7,0        | 7,9        | 5,6        | 6,0        | 7,1        |
| 29  | 7,3  | 6,7        | 6,2        | 7,1        | 7,8        | 6,6        | 6,0        | 7,7        |
| 34  | 8,0  | 5,5        | 5,8        | 7,3        | 6,0        | 5,7        | 5,6        | 7,3        |
| 78  | 7,1  | 6,3        | 6,4        | 7,4        | 7,4        | 6,2        | 5,8        | 6,7        |
| <b>NÃO CONFORME<br/>(X - Xpadrão &lt;0)</b> | 1  | -          | -          | 3          | 1          | -          | -          | 1          |
| <b>RESULTADO</b>                            | Parede externa E4 necessita segunda medição. Paredes externas E1, E5 e E8 estão conformes.<br><b>Necessária segunda medição para paredes externas.</b> |            |            |            |            |            |            |            |

| 3º Lote Blocos Com 10% de Lodo   |   |         |         |         |         |         |         |         |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Bloco  | E1 (mm)   | E2 (mm) | E3 (mm) | E4 (mm) | E5 (mm) | E6 (mm) | E7 (mm) | E8 (mm) |
| 50   | 6,9   | 5,8     | 5,3     | 7,4     | 7,4     | 4,4     | 5,5     | 8,9     |
| 61   | 6,9   | 5,8     | 6,5     | 7,6     | 7,3     | 5,3     | 6,1     | 7,8     |
| 70   | 7,4   | 5,8     | 6,1     | 7,9     | 7,1     | 6,3     | 6,2     | 6,6     |
| 40   | 7,4   | 5,6     | 5,7     | 6,9     | 7,1     | 5,3     | 5,7     | 6,1     |
| 76   | 6,6   | 5,7     | 5,5     | 7,0     | 7,1     | 5,2     | 5,5     | 7,6     |
| 67   | 7,5   | 6,0     | 5,3     | 7,8     | 7,2     | 6,0     | 5,5     | 6,0     |
| 69   | 7,3   | 6,0     | 6,0     | 7,6     | 7,6     | 5,8     | 5,6     | 7,2     |
| 53   | 7,4   | 6,0     | 5,8     | 8,0     | 7,1     | 6,2     | 5,4     | 6,0     |
| 58   | 7,7   | 6,1     | 5,9     | 7,0     | 6,8     | 5,2     | 5,6     | 6,6     |
| 45   | 7,0   | 6,0     | 6,5     | 7,2     | 7,2     | 5,3     | 5,5     | 8,2     |
| 49   | 7,9   | 5,4     | 5,8     | 6,6     | 7,1     | 4,2     | 6,4     | 7,6     |
| 56   | 6,7   | 5,8     | 5,7     | 8,0     | 7,0     | 4,7     | 6,9     | 7,8     |
| 14   | 7,1   | 5,6     | 6,1     | 6,6     | 7,2     | 6,0     | 4,4     | 7,6     |
| <b>NÃO CONFORME (X - Xpadrão &lt;0)</b>                                      | 4   | 13      | 13      | 3       | 1       | 13      | 13      | 5       |
| <b>RESULTADO</b>   | Paredes externas E1, E4 necessitam segunda medição. Parede externa E5 está conforme. Parede externa E8 não está conforme. <b>Bloco reprovado para paredes externas em primeira medição.</b> |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>LEGENDA:</b><br>Xpadrão para Espessura Externa (E1, E4, E5 e E8) = 7,0 mm |   |         |         |         |         |         |         |         |

Tabela 38: Segunda medição de espessuras externas dos blocos com 10% de lodo de ETA (2º Lote).

| 2º Lote Bloco Com 10% de Lodo (segunda medição) |  |         |         |         |
|---|--|---------|---------|---------|
| Bloco   | E1 (mm)  | E4 (mm) | E5 (mm) | E8 (mm) |
| 16  | 7,0  | 7,6     | 7,8     | 7,0     |
| 51  | 6,8  | 7,6     | 6,7     | 8,4     |
| 66  | 6,3  | 7,2     | 7,9     | 7,3     |
| 2   | 7,4  | 6,5     | 7,4     | 7,5     |
| 28  | 7,4  | 7,3     | 7,5     | 7,3     |
| 35  | 7,4  | 7,2     | 7,1     | 6,2     |
| 4   | 7,8  | 7,6     | 7,4     | 7,3     |
| 18  | 7,0  | 7,0     | 7,1     | 7,2     |
| 23  | 7,0  | 7,4     | 7,3     | 8,7     |
| 26  | 7,2  | 7,6     | 7,3     | 7,0     |
| 47  | 7,5  | 7,1     | 7,6     | 7,2     |
| 73  | 6,6  | 7,5     | 7,8     | 7,7     |
| 13  | 7,0  | 7,9     | 5,4     | 7,1     |
| <b>NÃO CONFORME (X - Xpadrão &lt;0)</b>         | 3  | 1       | 2       | 1       |
| <b>NÃO CONFORME (1a + 2a medições)</b>          | 4  | 4       | 3       | 2       |
| <b>RESULTADO</b>                                | Bloco aprovado para paredes externas em segunda medição. |         |         |         |

#### 5.4.2. Esquadro e planeza das faces

Os ensaios de esquadro e planeza das faces foram realizados segundo a norma NBR 7171 (BRASIL, 1992a), em triplicata, para cada tipo de bloco: sem lodo e com 10% de lodo, totalizando 6 lotes de blocos ensaiados. Para cada lote, foram separados 13 blocos.

Tabela 39: Esquadro e planeza das faces (Bloco Sem Lodo).

| 1º Lote Bloco Sem Lodo   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Bloco  | 30 | 33 | 18 | 76 | 16 | 22 | 80 | 57 | 58 | 61 | 62 | 63 | 60 |
| Esquadro   | P  | P  | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| Planeza  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| 2º Lote Bloco Sem Lodo   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Bloco  | 17 | 41 | 49 | 24 | 81 | 29 | 37 | 56 | 79 | 68 | 64 | 53 | 19 |
| Esquadro   | P  | P  | P  | P  | P  | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| Planeza  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| 3º Lote Bloco Sem Lodo   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Bloco  | 32 | 13 | 1  | 45 | 12 | 74 | 72 | 50 | 51 | 2  | 7  | 5  | 69 |
| Esquadro   | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| Planeza  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| LEGENDA:   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| P = passou em esquadro ou planeza em todas as faces medidas        |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| NP = não passou em esquadro ou planeza em pelo menos uma das faces |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Tabela 40: Resumo dos resultados de esquadro e planeza das faces (Bloco Sem Lodo).

| Bloco            | Esquadro | Planeza | Conclusão                    |
|------------------|----------|---------|------------------------------|
| Total NP 1º Lote | 1        | 0       | Esquadro e Planeza Aprovados |
| Total NP 2º Lote | 1        | 0       | Esquadro e Planeza Aprovados |
| Total NP 3º Lote | 1        | 0       | Esquadro e Planeza Aprovados |

Tabela 41: Esquadro e planeza das faces (Bloco Com 10% de Lodo).

| 1º Lote Bloco Com 10% de Lodo |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Bloco                         | 1  | 64 | 62 | 8  | 65 | 12 | 9  | 17 | 46 | 43 | 7  | 74 | 42 |
| Esquadro                      | P  | P  | NP | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| Planeza                       | P  | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NP |
| 2º Lote Bloco Com 10% de Lodo |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Bloco                         | 68 | 63 | 25 | 80 | 31 | 24 | 72 | 39 | 37 | 77 | 29 | 34 | 78 |
| Esquadro                      | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NP | P  | P  |
| Planeza                       | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |

| 3º Lote Bloco Com 10% de Lodo |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Bloco                         | 50 | 61 | 70 | 40 | 76 | 67 | 69 | 53 | 58 | 45 | 49 | 56 | 14 |
| Esquadro                      | P  | NP | P  | P  | P  | P  | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  |
| Planeza                       | P  | P  | P  | P  | P  | NP | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  |

LEGENDA:  
P = passou em esquadro ou planeza em todas as faces medidas  
NP = não passou em esquadro ou planeza em pelo menos uma das faces

Tabela 42: Resumo dos resultados de esquadro e planeza das faces (Bloco Com 10% de Lodo).

| Bloco            | Esquadro | Planeza | Conclusão                    |
|------------------|----------|---------|------------------------------|
| Total NP 1º Lote | 2        | 2       | Esquadro e Planeza Aprovados |
| Total NP 2º Lote | 1        | 0       | Esquadro e Planeza Aprovados |
| Total NP 3º Lote | 2        | 1       | Esquadro e Planeza Aprovados |

#### 5.4.3. Absorção de água

Os ensaios de absorção seguiram a metodologia proposta no ANEXO I-1 e os resultados foram comparados com a norma NBR 7171 (BRASIL, 1992a). Foram ensaiados um total de 6 lotes com 13 blocos cada, sendo que 3 lotes foram para os blocos sem lodo e 3 para os blocos com 10% de lodo.

Tabela 43: Absorção (Bloco Sem Lodo).

|                        | Bloco | Peso pós-estufa – PI (g) | Peso pós-mergulho – PF (g) | PF - PI | X (% de absorção) | Adequado (8<X<25) |
|------------------------|-------|--------------------------|----------------------------|---------|-------------------|-------------------|
| 1º Lote Bloco Sem Lodo | 43    | 2133,7                   | 2584,2                     | 450,50  | 21,11             | SIM               |
|                        | 38    | 2182,3                   | 2653,0                     | 470,70  | 21,57             | SIM               |
|                        | 20    | 2119,6                   | 2445,7                     | 326,10  | 15,38             | SIM               |
|                        | 42    | 2110,2                   | 2441,9                     | 331,70  | 15,72             | SIM               |
|                        | 75    | 2083,4                   | 2511,5                     | 428,10  | 20,55             | SIM               |
|                        | 44    | 2015,5                   | 2323,7                     | 308,20  | 15,29             | SIM               |
|                        | 78    | 2008,5                   | 2423,8                     | 415,30  | 20,68             | SIM               |
|                        | 47    | 2023,5                   | 2450,9                     | 427,40  | 21,12             | SIM               |
|                        | 71    | 2038,5                   | 2398,5                     | 360,00  | 17,66             | SIM               |
|                        | 23    | 2092,2                   | 2520,7                     | 428,50  | 20,48             | SIM               |
|                        | 25    | 2074,2                   | 2485,7                     | 411,50  | 19,84             | SIM               |
|                        | 65    | 2009,1                   | 2423,9                     | 414,80  | 20,65             | SIM               |
|                        | 34    | 2113,4                   | 2555,9                     | 442,50  | 20,94             | SIM               |

|                        | Bloco | Peso pós-estufa – PI<br>(g) | Peso pós-mergulho – PF<br>(g) | PF - PI | X (% de<br>absorção) | Adequado<br>(8<X<25) |
|------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|----------------------|----------------------|
| 2° Lote Bloco Sem Lodo | 36    | 2088,9                      | 2530,3                        | 441,40  | 21,13                | SIM                  |
|                        | 52    | 2010,5                      | 2364,0                        | 353,50  | 17,58                | SIM                  |
|                        | 14    | 2091,4                      | 2517,4                        | 426,00  | 20,37                | SIM                  |
|                        | 35    | 2033,8                      | 2464,5                        | 430,70  | 21,18                | SIM                  |
|                        | 66    | 2110,6                      | 2486,6                        | 376,00  | 17,81                | SIM                  |
|                        | 67    | 2026,3                      | 2422,3                        | 396,00  | 19,54                | SIM                  |
|                        | 4     | 2151,7                      | 2523,9                        | 372,20  | 17,30                | SIM                  |
|                        | 31    | 1942,1                      | 2290,3                        | 348,20  | 17,93                | SIM                  |
|                        | 73    | 2077,9                      | 2489,8                        | 411,90  | 19,82                | SIM                  |
|                        | 6     | 2072,6                      | 2392,0                        | 319,40  | 15,41                | SIM                  |
|                        | 15    | 2115,1                      | 2542,9                        | 427,80  | 20,23                | SIM                  |
|                        | 28    | 2126,7                      | 2567,8                        | 441,10  | 20,74                | SIM                  |
|                        | 10    | 2075,8                      | 2445,0                        | 369,20  | 17,79                | SIM                  |
| 3° Lote Bloco Sem Lodo | 9     | 2096,4                      | 2487,9                        | 391,50  | 18,67                | SIM                  |
|                        | 21    | 2089,7                      | 2535,3                        | 445,60  | 21,32                | SIM                  |
|                        | 40    | 2032,9                      | 2454,1                        | 421,20  | 20,72                | SIM                  |
|                        | 59    | 2017,1                      | 2416,3                        | 399,20  | 19,79                | SIM                  |
|                        | 8     | 2111,7                      | 2486,1                        | 374,40  | 17,73                | SIM                  |
|                        | 46    | 2089,0                      | 2528,7                        | 439,70  | 21,05                | SIM                  |
|                        | 77    | 2115,3                      | 2562,2                        | 446,90  | 21,13                | SIM                  |
|                        | 11    | 2079,8                      | 2464,6                        | 384,80  | 18,50                | SIM                  |
|                        | 70    | 2074,5                      | 2485,0                        | 410,50  | 19,79                | SIM                  |
|                        | 54    | 2125,5                      | 2570,4                        | 444,90  | 20,93                | SIM                  |
|                        | 26    | 2083,2                      | 2504,4                        | 421,20  | 20,22                | SIM                  |
|                        | 48    | 2094,0                      | 2524,8                        | 430,80  | 20,57                | SIM                  |
|                        | 39    | 2138,9                      | 2598,2                        | 459,30  | 21,47                | SIM                  |

Tabela 44: Absorção (Bloco Com 10% de Lodo).

|                               | Bloco | Peso pós-estufa – PI<br>(g) | Peso pós-mergulho – PF<br>(g) | PF - PI | X (% de<br>absorção) | Adequado<br>(8<X<25) |
|-------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|----------------------|----------------------|
| 1° Lote Bloco Com 10% de Lodo | 26    | 2020,0                      | 2446,4                        | 426,40  | 21,11                | SIM                  |
|                               | 73    | 1931,8                      | 2366,9                        | 435,10  | 22,52                | SIM                  |
|                               | 23    | 2012,4                      | 2455,8                        | 443,40  | 22,03                | SIM                  |
|                               | 13    | 1986,1                      | 2430,7                        | 444,60  | 22,39                | SIM                  |
|                               | 35    | 1970,2                      | 2395,6                        | 425,40  | 21,59                | SIM                  |
|                               | 66    | 1975,2                      | 2402,8                        | 427,60  | 21,65                | SIM                  |
|                               | 2     | 1928,0                      | 2345,2                        | 417,20  | 21,64                | SIM                  |
|                               | 16    | 2047,2                      | 2473,2                        | 426,00  | 20,81                | SIM                  |
|                               | 18    | 2018,0                      | 2467,0                        | 449,00  | 22,25                | SIM                  |
|                               | 47    | 2046,0                      | 2486,3                        | 440,30  | 21,52                | SIM                  |
|                               | 28    | 1945,9                      | 2357,5                        | 411,60  | 21,15                | SIM                  |
|                               | 51    | 2002,3                      | 2418,2                        | 415,90  | 20,77                | SIM                  |
|                               | 4     | 2013,4                      | 2431,9                        | 418,50  | 20,79                | SIM                  |

|                               | Bloco | Peso pós-estufa – PI<br>(g) | Peso pós-mergulho – PF<br>(g) | PF - PI | X (% de<br>absorção) | Adequado<br>(8<X<25) |
|-------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|----------------------|----------------------|
| 2° Lote Bloco Com 10% de Lodo | 57    | 2086,5                      | 2529,7                        | 443,20  | 21,24                | SIM                  |
|                               | 32    | 1992,8                      | 2419,8                        | 427,00  | 21,43                | SIM                  |
|                               | 11    | 1993,0                      | 2430,9                        | 437,90  | 21,97                | SIM                  |
|                               | 19    | 1976,5                      | 2416,8                        | 440,30  | 22,28                | SIM                  |
|                               | 44    | 1944,4                      | 2342,3                        | 397,90  | 20,46                | SIM                  |
|                               | 71    | 2004,3                      | 2419,6                        | 415,30  | 20,72                | SIM                  |
|                               | 79    | 2009,3                      | 2469,6                        | 460,30  | 22,91                | SIM                  |
|                               | 38    | 1976,7                      | 2388,7                        | 412,00  | 20,84                | SIM                  |
|                               | 36    | 1918,7                      | 2327,5                        | 408,80  | 21,31                | SIM                  |
|                               | 30    | 1991,0                      | 2433,6                        | 442,60  | 22,23                | SIM                  |
|                               | 27    | 1986,9                      | 2393,9                        | 407,00  | 20,48                | SIM                  |
|                               | 21    | 2043,1                      | 2481,6                        | 438,50  | 21,46                | SIM                  |
|                               | 33    | 2003,4                      | 2410,8                        | 407,40  | 20,34                | SIM                  |
| 3° Lote Bloco Com 10% de Lodo | 55    | 2059,3                      | 2500,6                        | 441,30  | 21,43                | SIM                  |
|                               | 6     | 2052,0                      | 2493,4                        | 441,40  | 21,51                | SIM                  |
|                               | 52    | 2028,8                      | 2493,5                        | 464,70  | 22,91                | SIM                  |
|                               | 60    | 2099,3                      | 2535,3                        | 436,00  | 20,77                | SIM                  |
|                               | 59    | 1960,8                      | 2394,7                        | 433,90  | 22,13                | SIM                  |
|                               | 20    | 2021,7                      | 2466,3                        | 444,60  | 21,99                | SIM                  |
|                               | 5     | 2058,0                      | 2483,3                        | 425,30  | 20,67                | SIM                  |
|                               | 48    | 1939,2                      | 2373,6                        | 434,40  | 22,40                | SIM                  |
|                               | 15    | 2028,4                      | 2482,5                        | 454,10  | 22,39                | SIM                  |
|                               | 54    | 2014,9                      | 2430,2                        | 415,30  | 20,61                | SIM                  |
|                               | 75    | 2031,5                      | 2469,2                        | 437,70  | 21,55                | SIM                  |
|                               | 22    | 1932,1                      | 2359,3                        | 427,20  | 22,11                | SIM                  |
|                               | 41    | 1907,7                      | 2328,4                        | 420,70  | 22,05                | SIM                  |

#### 5.4.4. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência foram realizados segundo a norma NBR 6461 (BRASIL, 1983) e os resultados foram comparados com a norma NBR 7171 (BRASIL, 1992a). Foram ensaiados um total de 6 lotes com 13 blocos cada, sendo que 3 lotes foram para os blocos sem lodo e os demais, para os blocos com 10% de lodo.

Tabela 45: Resistência à compressão (Bloco Sem Lodo).

| 1º Lote Bloco Sem Lodo |           |   |           |                  |                            |                  |           |
|------------------------|-----------|---|-----------|------------------|----------------------------|------------------|-----------|
| Bloco                  | C<br>(mm) | H<br>(mm)   | L<br>(mm) | Leitura<br>(kgf) | Área<br>(mm <sup>2</sup> ) | Pressão<br>(MPa) | Adequado  |
| 30                     | 239,4     | 138,5   | 112,7     | 5700             | 26980,38                   | 2,1              | Classe 15 |
| 33                     | 235,8     | 139,0   | 112,7     | 7000             | 26574,66                   | 2,6              | Classe 25 |
| 18                     | 240,7     | 138,6   | 116,4     | 6750             | 28017,48                   | 2,4              | Classe 15 |
| 76                     | 239,1     | 137,5   | 115,7     | 6500             | 27663,87                   | 2,3              | Classe 15 |
| 16                     | 239,8     | 138,4   | 116,5     | 5750             | 27936,70                   | 2,0              | Classe 15 |
| 22                     | 239,9     | 140,0   | 114,0     | 7300             | 27348,60                   | 2,6              | Classe 25 |
| 80                     | 235,2     | 138,4   | 112,0     | 7750             | 26342,40                   | 2,9              | Classe 25 |
| 57                     | 237,0     | 139,2   | 112,8     | 5000             | 26733,60                   | 1,8              | Classe 15 |
| 58                     | 237,5     | 137,9   | 117,1     | 6350             | 27811,25                   | 2,2              | Classe 15 |
| 61                     | 235,2     | 138,2   | 116,9     | 6100             | 27494,88                   | 2,2              | Classe 15 |
| 62                     | 234,8     | 138,2   | 112,6     | 7600             | 26438,48                   | 2,8              | Classe 25 |
| 63                     | 240,7     | 139,2   | 113,5     | 4500             | 27319,45                   | 1,6              | Classe 15 |
| 60                     | 240,8     | 138,0   | 113,4     | 5000             | 27306,72                   | 1,8              | Classe 15 |
| NÃO CONFORMES          | 0         | APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 15. |           |                  |                            |                  |           |
| CLASSE 10              | 0         |   |           |                  |                            |                  |           |
| CLASSE 15              | 9         |   |           |                  |                            |                  |           |
| CLASSE 25              | 4         |   |           |                  |                            |                  |           |
| 2º Lote Bloco Sem Lodo |           |   |           |                  |                            |                  |           |
| Bloco                  | C<br>(mm) | H<br>(mm)   | L<br>(mm) | Leitura<br>(kgf) | Área<br>(mm <sup>2</sup> ) | Pressão<br>(MPa) | Adequado  |
| 17                     | 238,2     | 137,9   | 116,6     | 5900             | 27774,12                   | 2,1              | Classe 15 |
| 41                     | 237,9     | 139,0   | 112,5     | 4900             | 26763,75                   | 1,8              | Classe 15 |
| 49                     | 237,2     | 138,0   | 116,0     | 7400             | 27515,20                   | 2,6              | Classe 25 |
| 24                     | 241,0     | 138,1   | 112,4     | 6300             | 27088,40                   | 2,3              | Classe 15 |
| 81                     | 239,0     | 138,4   | 112,3     | 7000             | 26839,70                   | 2,6              | Classe 25 |
| 29                     | 241,4     | 138,5   | 112,9     | 5800             | 27254,06                   | 2,1              | Classe 15 |
| 37                     | 241,1     | 138,3   | 113,3     | 6000             | 27318,90                   | 2,2              | Classe 15 |
| 56                     | 238,1     | 139,1   | 113,2     | 6250             | 26952,92                   | 2,3              | Classe 15 |
| 79                     | 238,9     | 138,1   | 112,2     | 9500             | 26804,58                   | 3,5              | Classe 25 |
| 68                     | 238,4     | 137,7   | 116,4     | 4500             | 27749,76                   | 1,6              | Classe 15 |
| 64                     | 237,0     | 138,2   | 116,6     | 6200             | 27634,20                   | 2,2              | Classe 15 |
| 53                     | 237,2     | 138,0   | 117,6     | 6250             | 27894,72                   | 2,2              | Classe 15 |
| 19                     | 235,3     | 138,8   | 116,0     | 7600             | 27294,80                   | 2,7              | Classe 25 |
| NÃO CONFORMES          | 0         | APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 15. |           |                  |                            |                  |           |
| Classe 10              | 0         |   |           |                  |                            |                  |           |
| Classe 15              | 9         |   |           |                  |                            |                  |           |
| Classe 25              | 4         |   |           |                  |                            |                  |           |



| <b>3º Lote Bloco Sem Lodo</b> |        |        |  |               |                         |               |           |
|-------------------------------|--------|--------|--|---------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Bloco                         | C (mm) | H (mm) | L (mm)   | Leitura (kgf) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Pressão (MPa) | Adequado  |
| 32                            | 240,6  | 139,0  | 116,2  | 4050          | 27957,72                | 1,4           | Classe 10 |
| 13                            | 238,6  | 138,1  | 112,2  | 4000          | 26770,92                | 1,5           | Classe 15 |
| 1                             | 237,7  | 138,3  | 112,3  | 6500          | 26693,71                | 2,4           | Classe 15 |
| 45                            | 237,7  | 138,6  | 114,2  | 11000         | 27145,34                | 4,0           | Classe 25 |
| 12                            | 240,0  | 139,7  | 112,8  | 4850          | 27072,00                | 1,8           | Classe 15 |
| 74                            | 237,6  | 137,1  | 114,1  | 9250          | 27110,16                | 3,3           | Classe 25 |
| 72                            | 237,3  | 137,3  | 112,4  | 9750          | 26672,52                | 3,6           | Classe 25 |
| 50                            | 240,6  | 138,4  | 113,2  | 7000          | 27235,92                | 2,5           | Classe 25 |
| 51                            | 237,1  | 137,0  | 112,0  | 7550          | 26555,20                | 2,8           | Classe 25 |
| 2                             | 237,6  | 138,3  | 112,3  | 5950          | 26682,48                | 2,2           | Classe 15 |
| 7                             | 242,2  | 138,3  | 113,5  | 4000          | 27489,70                | 1,4           | Classe 10 |
| 5                             | 239,7  | 138,0  | 112,6  | 8500          | 26990,22                | 3,1           | Classe 25 |
| 69                            | 238,5  | 138,0  | 112,3  | 6250          | 26783,55                | 2,3           | Classe 15 |
| <b>NÃO CONFORMES</b>          | 0      |        | <b>APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 25.</b> |               |                         |               |           |
| Classe 10                     | 2      |        |  |               |                         |               |           |
| Classe 15                     | 5      |        |  |               |                         |               |           |
| Classe 25                     | 6      |        |  |               |                         |               |           |

Tabela 46: Resistência à compressão (Bloco Com 10% de Lodo).

| <b>1º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |        |        |  |               |                         |               |           |
|--------------------------------------|--------|--------|--|---------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Bloco                                | C (mm) | H (mm) | L (mm)   | Leitura (kgf) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Pressão (MPa) | Adequado  |
| 12                                   | 235,1  | 135,8  | 111,4  | 7350          | 26190,14                | 2,8           | Classe 25 |
| 74                                   | 236,8  | 140,0  | 113,2  | 5750          | 26805,76                | 2,1           | Classe 15 |
| 17                                   | 238,6  | 137,3  | 111,5  | 6300          | 26603,90                | 2,3           | Classe 15 |
| 42                                   | 239,7  | 138,1  | 111,0  | 6000          | 26606,70                | 2,2           | Classe 15 |
| 7                                    | 238,2  | 136,9  | 112,0  | 6500          | 26678,40                | 2,4           | Classe 15 |
| 43                                   | 235,4  | 138,5  | 112,9  | 8100          | 26576,66                | 3,0           | Classe 25 |
| 46                                   | 240,3  | 138,0  | 115,2  | 6750          | 27682,56                | 2,4           | Classe 15 |
| 9                                    | 240,2  | 139,0  | 115,8  | 7250          | 27815,16                | 2,6           | Classe 25 |
| 65                                   | 240,6  | 138,8  | 116,9  | 6500          | 28126,14                | 2,3           | Classe 15 |
| 8                                    | 237,8  | 137,3  | 112,4  | 4100          | 26728,72                | 1,5           | Classe 15 |
| 62                                   | 239,8  | 137,9  | 112,2  | 7100          | 26905,56                | 2,6           | Classe 25 |
| 1                                    | 238,4  | 139,4  | 112,6  | 7300          | 26843,84                | 2,7           | Classe 25 |
| 64                                   | 239,8  | 139,8  | 112,6  | 6000          | 27001,48                | 2,2           | Classe 15 |
| <b>NÃO CONFORMES</b>                 | 0      |        | <b>APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 15.</b> |               |                         |               |           |
| CLASSE 10                            | 0      |        |  |               |                         |               |           |
| CLASSE 15                            | 8      |        |  |               |                         |               |           |
| CLASSE 25                            | 5      |        |  |               |                         |               |           |

| <b>2º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |          |  |        |               |                         |               |           |
|--------------------------------------|----------|--|--------|---------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Bloco                                | C (mm)   | H (mm)   | L (mm) | Leitura (kgf) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Pressão (MPa) | Adequado  |
| 68                                   | 238,1    | 139,1  | 116,8  | 4900          | 27810,08                | 1,7           | Classe 15 |
| 63                                   | 236,8    | 139,6  | 116,7  | 3750          | 27634,56                | 1,3           | Classe 10 |
| 25                                   | 236,3    | 137,9  | 111,6  | 5400          | 26371,08                | 2,0           | Classe 15 |
| 80                                   | 240,0    | 137,6  | 112,0  | 7500          | 26880,00                | 2,7           | Classe 25 |
| 31                                   | 239,7    | 138,6  | 113,1  | 5700          | 27110,07                | 2,1           | Classe 15 |
| 24                                   | 235,5    | 139,0  | 115,5  | 6000          | 27200,25                | 2,2           | Classe 15 |
| 72                                   | 238,3    | 139,6  | 116,7  | 6500          | 27809,61                | 2,3           | Classe 15 |
| 39                                   | 240,3    | 138,8  | 112,6  | 5500          | 27057,78                | 2,0           | Classe 15 |
| 37                                   | 237,7    | 137,9  | 116,5  | 6900          | 27692,05                | 2,4           | Classe 15 |
| 77                                   | 237,1    | 138,4  | 116,3  | 5200          | 27574,73                | 1,8           | Classe 15 |
| 29                                   | 237,8    | 138,1  | 116,1  | 5250          | 27608,58                | 1,9           | Classe 15 |
| 34                                   | 241,0    | 140,3  | 113,3  | 8400          | 27305,30                | 3,0           | Classe 25 |
| 78                                   | 238,3    | 139,6  | 116,0  | 6000          | 27642,80                | 2,1           | Classe 15 |
| <b>NÃO CONFORMES</b>                 | <b>0</b> | <b>APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 15.</b> |        |               |                         |               |           |
| Classe 10                            | 1        |  |        |               |                         |               |           |
| Classe 15                            | 10       |  |        |               |                         |               |           |
| Classe 25                            | 2        |  |        |               |                         |               |           |
| <b>3º Lote Bloco Com 10% de Lodo</b> |          |  |        |               |                         |               |           |
| Bloco                                | C (mm)   | H (mm)   | L (mm) | Leitura (kgf) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Pressão (MPa) | Adequado  |
| 50                                   | 239,4    | 137,8  | 112,1  | 4550          | 26836,74                | 1,7           | Classe 15 |
| 61                                   | 236,4    | 137,7  | 116,0  | 7250          | 27422,40                | 2,6           | Classe 25 |
| 70                                   | 239,0    | 139,9  | 113,1  | 6300          | 27030,90                | 2,3           | Classe 15 |
| 40                                   | 238,1    | 139,1  | 112,5  | 4975          | 26786,25                | 1,8           | Classe 15 |
| 76                                   | 239,1    | 138,0  | 116,3  | 4950          | 27807,33                | 1,7           | Classe 15 |
| 67                                   | 241,1    | 140,4  | 113,2  | 4700          | 27292,52                | 1,7           | Classe 15 |
| 69                                   | 238,2    | 139,4  | 116,4  | 7050          | 27726,48                | 2,5           | Classe 25 |
| 53                                   | 239,3    | 139,2  | 112,6  | 6750          | 26945,18                | 2,5           | Classe 25 |
| 58                                   | 237,1    | 138,2  | 113,1  | 6275          | 26816,01                | 2,3           | Classe 15 |
| 45                                   | 237,5    | 138,1  | 116,8  | 5250          | 27740,00                | 1,9           | Classe 15 |
| 49                                   | 240,0    | 138,0  | 112,1  | 6225          | 26904,00                | 2,3           | Classe 15 |
| 56                                   | 239,2    | 137,8  | 112,0  | 5050          | 26790,40                | 1,8           | Classe 15 |
| 14                                   | 238,0    | 137,8  | 112,1  | 7750          | 26679,80                | 2,8           | Classe 25 |
| <b>NÃO CONFORMES</b>                 | <b>0</b> | <b>APROVADO NO PRIMEIRO LOTE. PREDOMINÂNCIA DE BLOCOS CLASSE 15.</b> |        |               |                         |               |           |
| Classe 10                            | 0        |  |        |               |                         |               |           |
| Classe 15                            | 9        |  |        |               |                         |               |           |
| Classe 25                            | 4        |  |        |               |                         |               |           |

#### 5.4.5. Análise comparativa dos ensaios mecânicos com os dois tipos de blocos (sem lodo e com 10% de lodo)

Comparando os resultados obtidos com os dois blocos, percebeu-se que a adição de lodo não trouxe variações significativas em nenhum dos parâmetros estudados. A única alteração que pode ser considerada como resultante da adição do lodo foi o aumento da absorção de água. Isto era esperado uma vez que o acréscimo de lodo na massa cerâmica implica num maior acréscimo de água e conseqüentemente maior formação de vazios durante a queima.

As demais mudanças na qualidade dos blocos, medidas nestes ensaios, certamente são conseqüência de alterações nas diversas etapas do processo. Problemas na extrusão são os principais responsáveis por variações na largura e espessura das paredes externas dos blocos. O corte pode ser responsabilizado por variações no comprimento. Enquanto que a resistência varia em função da qualidade de secagem e queima dos blocos.

Comparando os resultados anteriormente listados, para os blocos com acréscimo de 10% de lodo, com aqueles encontrados por Morita et al. (2002), pôde-se constatar que:

- os valores de absorção de água e resistência aqui relatados foram próximos daqueles encontrados pelos pesquisadores (19,1% e 2,3 MPa, respectivamente);
- todas as dimensões (comprimento, altura, largura e espessura das paredes) medidas neste trabalho foram, em média, mais próximas do ideal que àquelas apresentadas por MORITA et al. (2002).

Estudo realizado por NOVAES (2005) indicou que o acréscimo de até 25% de lodo, com 57,3% de sólidos (relação mássica de 17,8%) não afetou significativamente as dimensões da peça, o esquadro, a planeza e a absorção de água. Porém, apenas o acréscimo de 10% (relação mássica de 7%) de lodo resultou em boas características de resistência.

#### 5.4.6. Determinação da relação mássica lodo:argila

Para determinar a relação mássica foram calculadas as massas específicas do Lodo e da Mistura Argilas Teste. Além disto, foram determinadas as umidades destes dois materiais no ato da mistura. Com a umidade, foi possível determinar as densidades dos materiais no instante em que foram misturados. Sabendo que a relação entre volumes de lodo e argila é 10%, determinou-se a relação mássica.

Os valores e as equações utilizados na determinação da relação mássica estão mostrados na Tabela 47. Considerou-se a densidade da água igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 47: Valores e equações utilizados nos cálculos para determinação da relação mássica lodo:argila.

|  | Lodo   | Mistura Argilas Teste                                  |
|--|--|--|
| Massa Específica dos Grãos<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 3072   | 2758   |
| Umidade<br>(%)                                     | 61   | 20   |
| Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> )                  | $\frac{100}{\frac{39}{3072} + \frac{61}{1000}} = 1357^{(1)}$ | $\frac{100}{\frac{80}{2758} + \frac{20}{1000}} = 2040$ |
| LEGENDA:   |  |  |
| (1) CORNWELL <i>et al.</i> , 1990                  |  |  |

Sendo a densidade do lodo = massa do lodo/volume do lodo e volume de lodo = 0,1 x volume de argila, tem-se:

Massa de lodo = 1357 x 0,1 x volume de argila = 135,7 x massa de argila/2040 = 0,07 x massa de argila

Portanto, a relação mássica lodo:argila foi de 7%.

## **5.5. Avaliação do Impacto Ambiental da Incorporação do Lodo Desaguado da ETA Cubatão em Blocos Cerâmicos**

Como dito anteriormente, um dos objetivos do trabalho foi propor uma metodologia para avaliação do impacto da incorporação do lodo no processo produtivo. Para rastrear os efeitos e definir possíveis focos e tipos de poluição, aplicou-se o Método *Ad-hoc* de avaliação de impacto ambiental (SÃO PAULO, 1992; BRAGA *et al.*, 2002).

Cerca de 50 profissionais da área de poluição ambiental foram consultados. Estes pesquisadores e especialistas foram escolhidos através de seu Currículo Lattes do CNPq ou por indicação (ANEXO V). Foram enviados a estes profissionais, as características do lodo da ETA Cubatão e um fluxograma detalhado do processo industrial. Foi solicitada a indicação de possíveis impactos ambientais decorrentes da incorporação do resíduo nos blocos cerâmicos nas diversas etapas da produção, sob o ponto de vista de sua área de atuação.

As respostas dos especialistas consultados são mostradas no ANEXO V.

## **5.6. Definição dos Impactos Ambientais Potenciais Decorrentes da Incorporação do Lodo da ETA Cubatão no Processo Cerâmico**

Da análise das entrevistas e da revisão de literatura, concluiu-se que os impactos ambientais potenciais decorrentes da incorporação do lodo da ETA Cubatão no processo cerâmico eram:

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Lodo no Pátio da Indústria | { - contaminação do solo<br>- contaminação da água subterrânea<br>- contaminação dos operários da indústria  |
| No Interior da Indústria   | { - contaminação dos operários da indústria<br>- emissões atmosféricas   |
| Blocos Pós Consumo         | { - contaminação do solo e da água subterrânea (disposição inadequada)<br>- contaminação da população que vive no local da disposição e entorno<br>- contaminação do funcionário da usina de reciclagem de entulho ou da população que vive no entorno |

5.6.1. Contaminação da água subterrânea devido ao armazenamento do lodo no pátio da indústria

Um resumo dos resultados dos sete testes de lixiviação e solubilização do lodo está mostrado nas Tabelas 48 e 49, respectivamente. Os resultados podem ser encontrados no ANEXO III.

Tabela 48: Resumo dos resultados dos testes de lixiviação do lodo da ETA Cubatão.

| PARÂMETROS                    | V.M.P. | VARIAÇÃO (mg/L) |
|-------------------------------|--------|-----------------|
| Arsênio                       | 5,0    | <0,05           |
| Bário                         | 100,0  | <0,10 - 0,60    |
| Cádmio                        | 0,5    | <0,05           |
| Chumbo                        | 5,0    | <0,05 - 1,45    |
| Cobre                         | -      | <0,01           |
| Cromo Total                   | 5,0    | <0,05           |
| Fluoreto                      | 150,0  | 0,40 - 1,71     |
| Mercurio                      | 0,1    | <0,05           |
| Níquel                        | -      | <0,01           |
| Prata                         | 5,0    | <0,05           |
| Selênio                       | 1,0    | <0,05           |
| Vanádio                       | -      | <1,70           |
| Zinco                         | -      | 0,05            |
| Fenóis                        | -      | <0,001          |
| Aldrin                        | 0,003  | <0,003          |
| Clordano                      | 0,03   | <0,03           |
| DDT                           | 0,1    | <0,10           |
| Dieldrin                      | 0,003  | <0,003          |
| Endrin                        | 0,02   | <0,02           |
| Epóxi – Heptacloro            | 0,01   | <0,01           |
| Heptacloro                    | 0,01   | <0,01           |
| Hexaclorobenzeno              | 0,001  | <0,001          |
| Lindano                       | 0,3    | <0,30           |
| Metoxicloro                   | 3,0    | <3,00           |
| Pentaclorofenol               | 1,0    | <1,00           |
| Toxafeno                      | 0,5    | <0,50           |
| 2,4 – D                       | 10,0   | <10,00          |
| 2,4,5 – T                     | 0,2    | <0,20           |
| 2,4,5 – TP                    | 3,0    | <3,00           |
| Organofosforados e Carbamatos | 10,0   | <10,00          |

LEGENDA: V.M.P.: Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (BRASIL, 1987a)

Tabela 49: Resumo dos resultados dos testes de solubilização do lodo da ETA Cubatão.

| PARÂMETROS                    | V.M.P.               | VARIAÇÃO (mg/L) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|
| Alumínio                      | 0,20                 | <0,05 - 1,06    |
| Arsênio                       | 0,05                 | <0,05           |
| Bário                         | 1,00                 | <0,10           |
| Berílio                       | -                    | <0,10           |
| Cádmio                        | 0,005                | <0,005          |
| Chumbo                        | 0,05                 | <0,05 - 0,42    |
| Cianeto                       | 0,10                 | <0,10           |
| Cloretos                      | 250                  | <5 - 265        |
| Cobre                         | 1,00                 | <0,005 - 0,08   |
| Cromo Total                   | 0,05                 | <0,05           |
| Dureza Total                  | 500                  | 45 - 160        |
| Fenol                         | 0,001                | <0,001          |
| Ferro                         | 0,30                 | <0,03 - 2,59    |
| Fluoreto                      | 1,50                 | 0,37 - 2,60     |
| Manganês                      | 0,10                 | <0,05 - 0,12    |
| Mercúrio                      | 0,001                | <0,001          |
| Níquel                        | -                    | <0,005          |
| Nitrogênio Nitrato            | 10,00                | 0,10 - 25       |
| Prata                         | 0,05                 | <0,05           |
| Selênio                       | 0,01                 | <0,01           |
| Sódio                         | 200                  | 1,13 - 64       |
| Sulfatos                      | 400                  | <5 - 51         |
| Surfactantes                  | 0,20                 | <0,04 - 0,23    |
| Vanádio                       | -                    | <0,85           |
| Zinco                         | 5,00                 | 0,02 - 0,22     |
| Aldrin                        | -                    | <0,001          |
| Clordano                      | $3,0 \times 10^{-4}$ | <0,0003         |
| DDT                           | $1,0 \times 10^{-3}$ | <0,001          |
| Dieldrin                      | $3,0 \times 10^{-5}$ | <0,00003        |
| Endrin                        | $2,0 \times 10^{-4}$ | <0,0002         |
| Epóxi Heptacloro              | $1,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001         |
| Heptacloro                    | $1,0 \times 10^{-4}$ | <0,0001         |
| Hexaclorobenzeno              | $1,0 \times 10^{-5}$ | <0,00001        |
| Lindano                       | $3,0 \times 10^{-3}$ | <0,003          |
| Metoxicloro                   | 0,03                 | <0,03           |
| Pentaclorofenol               | 0,01                 | <0,01           |
| Toxafeno                      | $5,0 \times 10^{-3}$ | <0,005          |
| 2,4 - D                       | 0,1                  | <0,1            |
| 2,4,5 - T                     | $2,0 \times 10^{-3}$ | <0,002          |
| 2,4,5 - TP                    | 0,03                 | <0,03           |
| Organofosforados e Carbamatos | 0,1                  | <0,1            |

LEGENDA:  
V.M.P.: Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (BRASIL, 1987a)

Nos testes de lixiviação realizados, nenhum parâmetro superou os Valores Máximos Permitidos pela norma NBR 10004 (BRASIL, 1987a). Entre os parâmetros medidos no teste de solubilização, oito superaram o V.M.P., pelo menos uma vez, nos sete testes realizados. A Tabela 50 indica estes parâmetros e a frequência em que os mesmos ultrapassaram o valor máximo permitido.

Tabela 50: Frequência em que os parâmetros de solubilização medidos superaram o limite estipulado pela NBR 10004 (BRASIL, 1987a).

|           |     |          |              |
|-----------|-----|----------|--------------|
| Al        | Pb  | Cloretos | Fe           |
| 2/7       | 2/7 | 1/7      | 5/7          |
| Fluoretos | Mn  | Nitratos | Surfactantes |
| 2/7       | 1/7 | 1/7      | 1/7          |

Aqueles elementos que apresentaram apenas uma não conformidade não foram levados em consideração, pois os valores encontrados poderiam ter ocorrido devido a erros analíticos ou à alguma anormalidade no manancial ou no funcionamento da estação. Portanto, os poluentes avaliados na análise de risco, para ingestão de água contaminada, foram: Alumínio, Chumbo, Ferro e Fluoreto. Estes elementos estão presentes na água subterrânea da região de Tatuí nas concentrações mostradas na Tabela 51. Estas concentrações foram determinadas pela CETESB (SÃO PAULO, 2004b). A tabela mostra, também, os valores máximos encontrados no solubilizado e o padrão de potabilidade (BRASIL, 2004a).

Tabela 51: Concentrações dos elementos alumínio, chumbo, ferro e fluoreto na água subterrânea da região de Tatuí (2004b).

|   | Al<br>(mg/L) | Pb<br>(mg/L)   | Fe<br>(mg/L) | Fluoretos<br>(mg/L) |
|---|--------------|----------------|--------------|---------------------|
| Concentração na água subterrânea de Tatuí<br>(SÃO PAULO, 2004b) | <0,01 - 0,04 | <0,002 - 0,003 | <0,01 - 0,08 | 0,18 - 0,31         |
| Valores máximos encontrados no solubilizado                     | 1,06         | 0,42           | 2,59         | 2,60                |
| Padrão de Potabilidade<br>(BRASIL, 2004a)                       | 0,2          | 0,01           | 0,3          | 1,5                 |



As águas subterrâneas de Tatuí apresentaram qualidade adequada ao consumo humano, com relação aos parâmetros avaliados. É possível que o solubilizado não altere esta qualidade, uma vez que as águas possuem concentrações bem inferiores aos indicados pelo padrão de potabilidade.

#### 5.6.2. Análises de risco à saúde da população exposta, devido ao armazenamento do lodo no pátio da indústria

##### 5.6.2.1. Determinação da população de risco

A cerâmica fica à margem de uma rodovia e se estende por uma área total de 48000 m<sup>2</sup>. A área construída é de 10000 m<sup>2</sup>. Em seu entorno, o uso do solo preponderante é o industrial. Ela está cercada por outras duas indústrias cerâmicas, um galpão da CEAGESP (Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo) e uma fábrica da Cargill (produtora de farinhas e pré-misturas de trigo). Fica próxima, também, a um terminal intermodal.

Dentro de seu terreno, moram duas famílias de funcionários da empresa, totalizando 2 casais e uma adolescente. Suas casas estão situadas em local mais alto, próximas à rodovia. Circulam diariamente, pela indústria, cerca de 40 funcionários, que trabalham em turnos de 8 horas.

Portanto, conclui-se do exposto, que a população de risco é composta apenas por adultos.

##### 5.6.2.2. Determinação das vias de exposição

Os funcionários da cerâmica poderiam se contaminar pelas seguintes vias de exposição:

- Ingestão de água subterrânea contaminada;
- Inalação de compostos voláteis presentes no lodo ou de partículas suspensas pela ação do vento e pela movimentação de máquinas e veículos;
- Contato dérmico – banho utilizando água subterrânea contaminada e manuseio do lodo.

### ***A) Ingestão de água subterrânea contaminada***

A indústria é abastecida com água tratada pela concessionária local. A água é utilizada preferencialmente para o banho e para beber. No escritório administrativo, consome-se água mineral. Os funcionários não preparam seus alimentos na indústria, com exceção das famílias que habitam no seu terreno. Existe um poço de coleta de água subterrânea no local, mas este não é utilizado por não existir água. O rio mais próximo da cerâmica encontra-se a aproximadamente 3 km de distância.

Com os dados mencionados anteriormente, é possível concluir que o risco de contaminação, pela ingestão de água subterrânea contaminada, pela disposição inadequada do lodo no pátio da indústria, é insignificante. De qualquer forma, foi realizada a análise de risco, considerando as seguintes condições:

- maior concentração encontrada no solubilizado para cada um dos elementos considerados;
- ingestão de 2 litros diários de água contaminada. Foi considerado que, com a contaminação do lençol freático, a água a ser consumida passaria a possuir as características do solubilizado;
- a população possivelmente impactada seria composta por adultos com peso médio igual a 60 kg (peso médio para indivíduos residentes no estado de São Paulo – BRASIL, 1977 – dado mais recente);
- comparação com os MRL (Minimal Risk Level – teor para o risco mínimo) indicados pela U.S. DHHS (ESTADOS UNIDOS, 1999c, 1999d, 2003). O MRL é utilizado para indicar um limite para a exposição diária do homem à uma substância perigosa. Para o ferro, foram utilizados dados da EGVM (INGLATERRA, 2003) para envenenamento de adultos. Além disto, considerou-se o consumo destas substâncias na dieta normal de um adulto, estipulados pela WHO (1977).

### **Alumínio**

Máxima concentração de alumínio no solubilizado = 1,06 mg/L

Consumo diário de alumínio por um adulto = 2,12 mg/dia

Massa de alumínio ingerida por dia por peso corpóreo =  $2,12/60 = 0,035$  mg/kg/dia

MRL (ESTADOS UNIDOS, 1999c) = 2,00 mg/kg/dia.

### **Chumbo**

Máxima concentração de chumbo no solubilizado = 0,42 mg/L

Consumo diário de chumbo por um adulto = 0,84 mg/dia

Massa de chumbo ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,84/60 = 0,014$  mg/kg/dia

A ATSDR (ESTADOS UNIDOS, 1999d) não definiu um valor de MRL para o chumbo. Segundo esta referência, a EPA decidiu que é inapropriado definir dosagens de referência para o chumbo, porque alguns efeitos à saúde estão associados com quantidades muito baixas deste elemento no sangue.

Segundo a WHO (1977), um adulto consome, em média, 0,218 mg de chumbo por dia, através de alimentos e bebidas. Em um adulto de 60 kg, isto corresponde a 0,0036 mg/kg/dia.

### **Ferro**

Máxima concentração de ferro no solubilizado = 2,59 mg/L

Consumo diário de ferro por um adulto = 5,18 mg/dia

Massa de ferro ingerida por dia por peso corpóreo =  $5,18/60 = 0,086$  mg/kg/dia

Segundo a EGVM (INGLATERRA, 2003), o envenenamento por ferro em adultos é raro. Casos individuais sugeriram que doses de aproximadamente 1400 mg/kg eram letais, mas o adulto podia sobreviver com tratamento. Esta mesma fonte sugere que um adulto necessita, diariamente, de dosagens entre 6,7 e 11,4 mg, o equivalente, em um indivíduo de 60 kg, a doses entre 0,11 e 0,19 mg/kg/dia.

### **Fluoretos**

Máxima concentração de fluoreto no solubilizado = 2,60 mg/L

Consumo diário de fluoreto por um adulto = 5,20 mg/dia

Massa de fluoreto ingerida por dia por peso corpóreo =  $5,20/60 = 0,086$  mg/kg/dia

MRL (ESTADOS UNIDOS, 2003) = 0,05 mg/kg/dia.

Este MRL foi baseado no NOAEL (No-Observed-Adverse-Effect Level – teor para o qual não se observou efeitos adversos) de 0,15 mg/kg/dia e um LOAEL (Lowest-Observed-Adverse-Effect Level – dose na qual se observou o menor efeito adverso) de 0,25 mg/kg/dia (aumento da chance de fratura). O MRL foi encontrado com a divisão do NOAEL por um fator de incerteza igual a 3 para considerar a variabilidade humana.

O solo é argiloso no local onde a indústria está implantada. Este fato dificulta a percolação da água e arraste de contaminantes. O escoamento superficial deste material não acarretaria problemas aos corpos d'água, pois eles não existem nas proximidades da cerâmica.

Mesmo com todas as extrapolações, a ingestão das quantidades avaliadas de alumínio, ferro e fluoreto, que poderão estar presentes, ocasionalmente, na água subterrânea, não afetará a saúde de um adulto de 60 kg.

Com relação ao chumbo, entre as 7 análises realizadas, duas apresentaram concentrações superiores aos limites de detecção no solubilizado. As amostras que apresentaram problemas foram coletadas consecutivamente nos meses de janeiro e fevereiro, época de chuvas na RMSP (Região Metropolitana de São Paulo) e na baixada Santista. Neste período, normalmente, as comportas da Billings são abertas, o que afeta significativamente a qualidade das águas e consequentemente do lodo.

Portanto, à título de prevenção, deve-se monitorar cada lote de lodo enviado à Cerâmica, quanto à presença de chumbo no solubilizado. Além disto, deve-se investigar possíveis fontes de contaminação da água por chumbo (indústrias, áreas agrícolas, etc.) e realizar o controle das mesmas. Monitorar, também, os produtos químicos, no tocante aos parâmetros não conformes encontrados no lodo. Outra medida preventiva seria não consumir água subterrânea ou se isto for imprescindível, tratá-la para remoção de chumbo, se esta apresentar concentrações superiores ao padrão de potabilidade.

### ***B) Inalação de compostos voláteis presentes no lodo ou de partículas suspensas pela ação do vento e pela movimentação de máquinas e veículos***

Os teores de compostos orgânicos voláteis encontrados no lodo estiveram abaixo do limite de detecção do método, não representando risco para os funcionários da indústria.

A Figura 21 mostra o lodo após 3 meses de armazenamento no pátio. Pôde-se perceber que, mesmo após todo este tempo, ele não fica na forma de pó. Isto se deve, principalmente, à água quimicamente ligada em sua composição. Não há, portanto, risco de suspensão e inalação.



Figura 21 – Aspecto do lodo da ETA Cubatão após 3 meses estocado no pátio da cerâmica.

### ***C) Contato dérmico***

Constatou-se a presença de pequenas quantidades de coliformes e não foram detectados oocistos e cistos, respectivamente, de *Cryptosporidium sp.* e *Giardia sp.* no lodo. Para disposição agrícola de lodo de esgoto sem nenhuma restrição (classe A), a CETESB (SÃO PAULO, 1999a) determinou que a densidade de coliformes fecais presentes no resíduo deve ser inferior a  $10^3$  NMP/g. Nos ensaios realizados no presente estudo, detectou-se uma densidade máxima igual a 10 NMP/g de coliformes fecais, bem inferior ao proposto pela CETESB. Isto leva a crer que o manuseio do resíduo na indústria e na ETA não trará danos à saúde dos operários, no que diz respeito aos contaminantes biológicos.

Com relação aos outros parâmetros, segundo a CETESB (SÃO PAULO, 2001b), “realiza-se, apenas a quantificação da exposição aos contaminantes orgânicos, absorvidos através da pele.

Para os contaminantes inorgânicos, o contato dérmico não é uma via importante de exposição”. Como nenhum contaminante orgânico apresentou valores significativos na massa bruta ou no solubilizado do lodo, não foi necessária a realização da análise de risco.

O contato dérmico com o lodo ou com a água subterrânea possivelmente contaminada não acarretará riscos à saúde dos funcionários.

### 5.6.3. Contaminação do solo onde o lodo ficou estocado no pátio da indústria

Foram coletadas amostras de dois tipos de solo. O primeiro esteve em contato com o lodo por três meses e o segundo não sofreu influência do mesmo. Estas amostras foram analisadas quanto à sua composição química e os resultados encontrados estão mostrados na Tabela 52. Além disto, estão indicados na tabela, os valores de intervenção para solos em áreas industriais, definidos pela CETESB (SÃO PAULO, 2001b).

Tabela 52: Análise química do solo sem e em contato com o lodo e valores de intervenção definidos pela CETESB.

| Elementos                  | DESIGNAÇÃO DOS MATERIAS      |                             | CETESB (SÃO PAULO, 2001b)                                 |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
|                            | Sem contato com o lodo - (%) | Em contato com o lodo - (%) | Valores de Intervenção (Solos em Áreas Industriais) - (%) |
| Alumínio (Al)              | 11,8 ± 0,3                   | 12,4 ± 0,1                  | -   |
| Arsênio (As)               | <0,004                       | <0,004                      | 0,01  |
| Bário (Ba)                 | 0,0024 ± 0,0001              | 0,0025 ± 0,0001             | 0,07  |
| Cádmio (Cd)                | <0,0001                      | <0,0001                     | 0,004   |
| Chumbo (Pb)                | 0,018 ± 0,002                | 0,021 ± 0,003               | 0,12  |
| Cromo total (Cr)           | 0,005 ± 0,001                | 0,005 ± 0,001               | 0,1   |
| Cobre (Cu)                 | <0,003                       | <0,003                      | 0,07  |
| Mercúrio (Hg)              | <0,004                       | <0,004                      | 0,0025  |
| Níquel (Ni)                | 0,0014 ± 0,0003              | 0,0014 ± 0,0002             | 0,03  |
| Selênio (Se)               | <0,004                       | <0,004                      | -   |
| Ferro (Fe)                 | 4,2 ± 0,3                    | 4,2 ± 0,9                   | -   |
| Manganês (Mn)              | 0,015 ± 0,001                | 0,016 ± 0,001               | -   |
| Sódio (Na)                 | 0,4 ± 0,2                    | 0,4 ± 0,1                   | -   |
| Fluoreto (F <sup>-</sup> ) | 0,50 ± 0,03                  | 0,33 ± 0,02                 | -   |
| Zinco (Zn)                 | 0,005 ± 0,001                | 0,005 ± 0,001               | 0,15  |
| Prata (Ag)                 | <0,0005                      | <0,0005                     | 0,01  |

Para o mercúrio, o limite de detecção do método foi superior ao valor de intervenção da CETESB (SÃO PAULO, 2001b), impossibilitando a comparação. Para os demais poluentes, nenhum valor superou àqueles denominados como valores de intervenção para solos em áreas industriais.

Embora não tenha sido possível comparar os teores de determinados elementos no solo que teve contato com o lodo (Al, Se, Fe, Mn, Na, F<sup>-</sup> e Hg), com os valores de intervenção da CETESB, esses não foram significativamente diferentes daqueles verificados no solo sem influência do resíduo. Na maioria dos casos, estas diferenças ficaram embutidas no desvio padrão.

Enfim, constatou-se que, o contato com o lodo não trouxe alteração significativa à qualidade do solo.

#### 5.6.4. Teste de queima dos blocos com e sem lodo

A Figura 22 mostra o perfil de temperatura no topo e na base do forno ao longo do tempo de queima dos blocos.

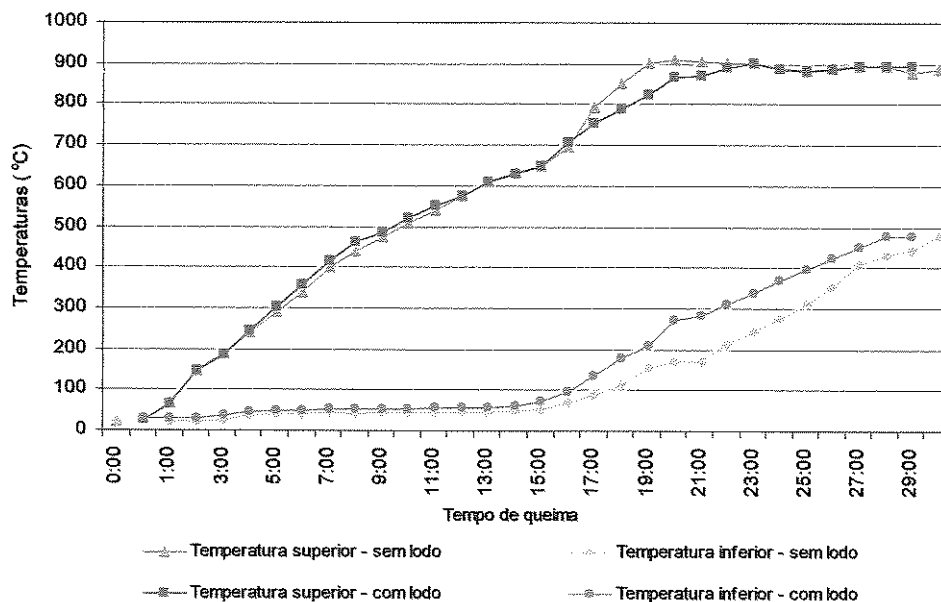


Figura 22 – Perfil de temperatura no topo e na base do forno ao longo do tempo de queima dos blocos.

Da Figura 22, percebe-se que as temperaturas no topo do forno foram praticamente as mesmas nos dois testes até 700°C. A partir daí, as temperaturas na abóbada do forno foram superiores no teste em branco em relação ao com lodo, até atingir 900°C, permanecendo constantes até o final da queima.

A Figura 23 mostra como o forno foi operado nos dois testes. O funcionário da indústria diminuiu o número de pontos da polia, que regula a vazão dos alimentadores de cavaco, após 19 horas no teste em branco, para controlar a temperatura na abóbada do forno, que havia atingido 900°C. No teste com lodo, esta operação só foi realizada após 24 horas.

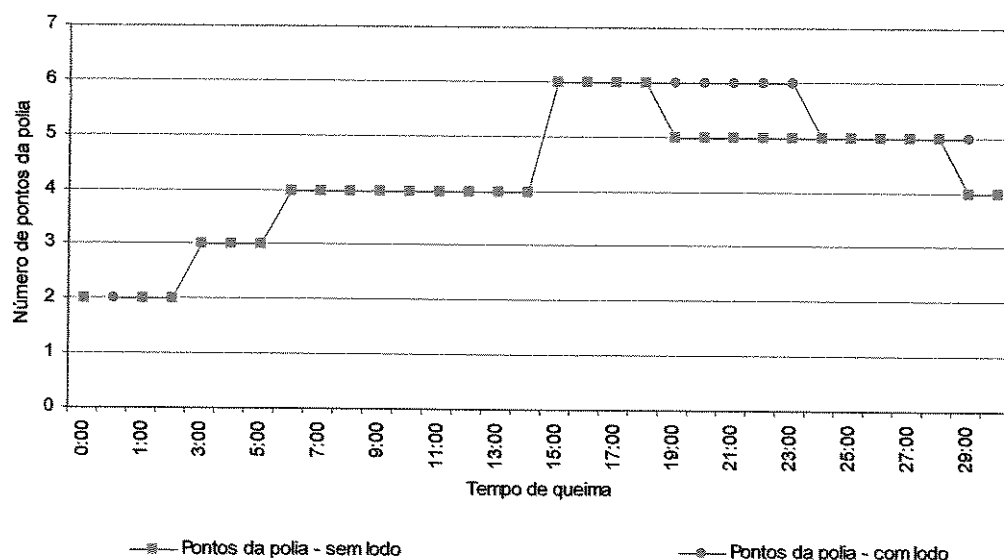


Figura 23 – Posição da coroa de regulagem de vazão dos alimentadores de cavaco ao longo da queima.

Das Figuras 22 e 23, conclui-se que, durante as 14 primeiras horas, a velocidade de elevação de temperatura no forno no teste em branco foi praticamente a mesma que a obtida no teste com lodo. Após este período, esta última foi inferior à primeira. Por esta razão, o teste com lodo consumiu mais cavaco que o teste em branco (dados mostrados na seqüência), alterando significativamente as emissões.

Segundo Campante e Seabra (2002), as principais reações físicas e químicas que ocorrem durante a combustão são as indicadas na Tabela 53.



Tabela 53: Principais reações físicas e químicas tipicamente envolvidas no tratamento térmico de produtos cerâmicos.

| Temperatura (°C) | Reações   |
|------------------|---|
| 100              | Secagem final do material ou evaporação da água residual (água higroscópica)                        |
| 110 – 200        | Separação da água (zeolítica) que acompanha alguns minerais argilosos                               |
| 350 – 600        | Decomposição da matéria orgânica ou componentes carbônicos do corpo (liberação de CO <sub>2</sub> ) |
| ≈ 500            | Separação da água de cristalização  |
| 573              | Transformação alotrópica do quartzo ( $\alpha - \beta$ ) com variação de volume                     |
| > 600            | Liberação de flúor (dependendo da composição mineralógica da pasta)                                 |
| 700 – 800        | Decomposição e separação dos minerais micáceos  |
| 800– 950         | Decomposição dos carbonatos (liberação de CO <sub>2</sub> )   |
| 800 – 1100       | Decomposição dos sulfetos e sulfatos  |

Fonte: CAMPANTE; SEABRA (2002).

Portanto, a causa deste retardamento para atingir a temperatura de 900°C pode ser devido à presença de calcita (carbonato de cálcio) no lodo, que não foi detectada nas demais argilas utilizadas pela indústria cerâmica.

Na Tabela 54, são apresentados os valores de umidade, velocidade e vazões de gases secos. Estes valores foram medidos durante as coletas para a determinação da concentração de material particulado.

Tabela 54: Valores de velocidade, umidade e vazões de gases em base seca obtidos durante a queima dos blocos com e sem lodo.

| TESTE                    | COLETA | UMIDADE (%) | VELOCIDADE (m/s) | VAZÃO DE GÁS SECO (Nm <sup>3</sup> /h) |
|--------------------------|--------|-------------|------------------|--|
| Sem Incorporação de lodo | 1a     | 21.2        | 2.1              | 3604                                   |
|                          | 2a     | 19.8        | 2.4              | 3646                                   |
|                          | 3a     | 18.1        | 2.9              | 4149                                   |
| Com Incorporação de lodo | 1b     | 20.5        | 2.4              | 4195                                   |
|                          | 2b     | 19.3        | 2.8              | 4414                                   |
|                          | 3b     | 18.0        | 2.9              | 4127                                   |
|                          | 4b     | 17.4        | 3.3              | 4502                                   |

LEGENDA:  
 COLETA 1a – 19 horas de queima      COLETA 1b – 17 horas de queima  
 COLETA 2a – 22 horas de queima      COLETA 2b – 20 horas de queima  
 COLETA 3a – 24 horas de queima      COLETA 3b – 22 horas de queima  
 COLETA 4b – 24 horas de queima

Observando a Tabela 54, conclui-se que a umidade dos gases emitidos não variou muito nos dois ensaios. No entanto, a umidade inicial dos gases foi maior no teste sem incorporação do lodo. Provavelmente, isto se deve à dificuldade em remover água quimicamente ligada do lodo presente nos blocos. A água ligada quimicamente à superfície da partícula coloidal é removível apenas pelo aumento da energia térmica, necessitando de temperaturas entre 400 e 600°C (MAGALHÃES, 2003). Segundo Oliveira *et al.* (2004b), o sulfato de alumínio, por exemplo, perde água quimicamente ligada por volta de 300°C.

A Tabela 55 mostra o consumo total de cavaco nos dois testes. O consumo de cavaco no teste com incorporação de lodo foi superior à do teste em branco, provavelmente, devido à maior umidade do bloco, mas também e principalmente, devido à maior dificuldade de remover a água e a dificuldade em alcançar a temperatura de 900°C na abóbada do forno. A maior vazão de gás seco no teste com lodo ocorreu como consequência do maior consumo de combustível (PINHEIRO; VALLE, 1995).

Tabela 55: Consumo total de cavaco por teste realizado (sem incorporação e com incorporação de lodo).

|       | Sem incorporação de lodo<br>base seca<br>(kg) | Com incorporação de lodo<br>base seca<br>(kg) |
|-------|---|---|
| TOTAL | 13421   | 14778   |

A seguir, é apresentada, em forma de gráfico, a concentração, em base seca, de O<sub>2</sub> (Figura 24) em função do tempo de queima, para os testes realizados com blocos sem e com lodo.

Da Figura 24, nota-se que as concentrações de oxigênio nas emissões gasosas variaram de um teste para outro. Desta forma, para permitir a comparação dos demais poluentes, suas concentrações foram padronizadas a 7% de oxigênio (Figuras 25 a 27).

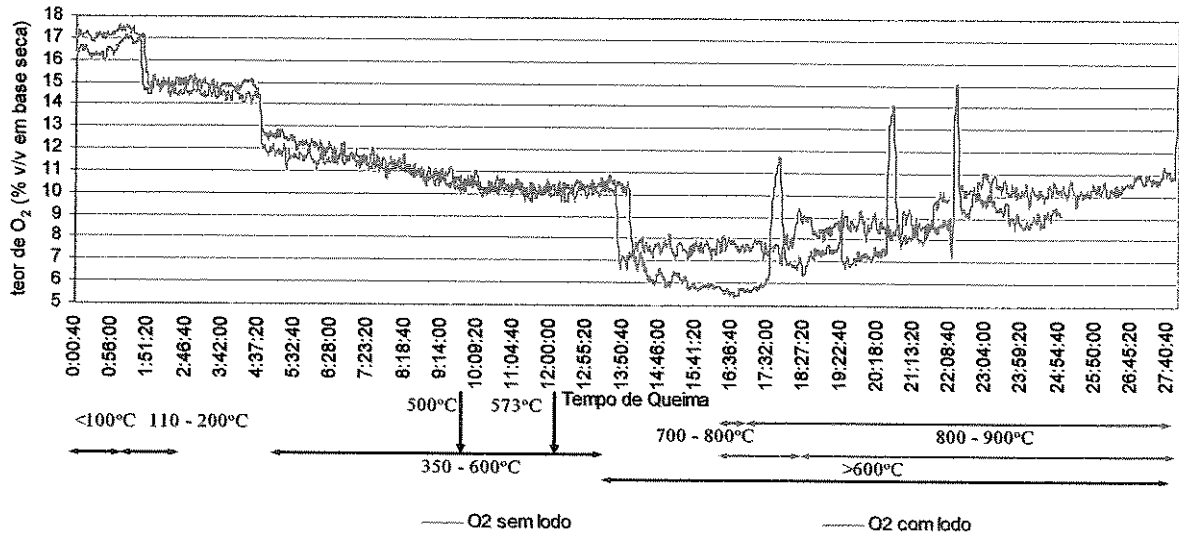


Figura 24 – Variação dos teores de O<sub>2</sub> ao longo do tempo durante a combustão dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.

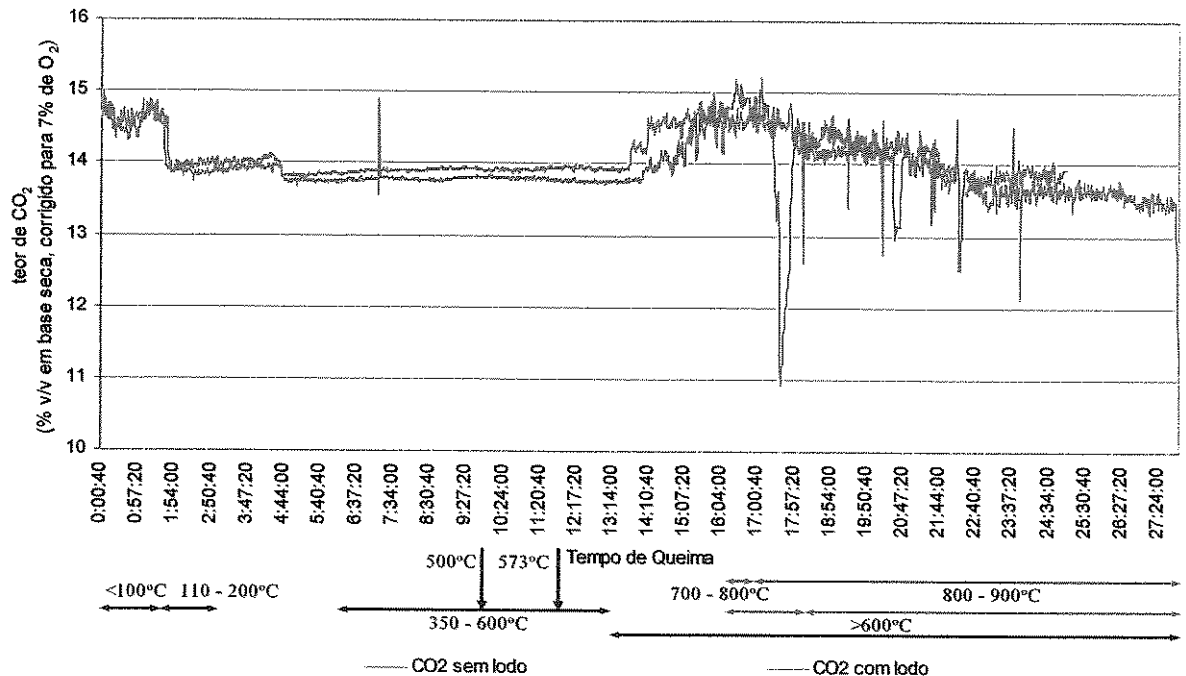


Figura 25 – Variação dos teores de CO<sub>2</sub>, corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.

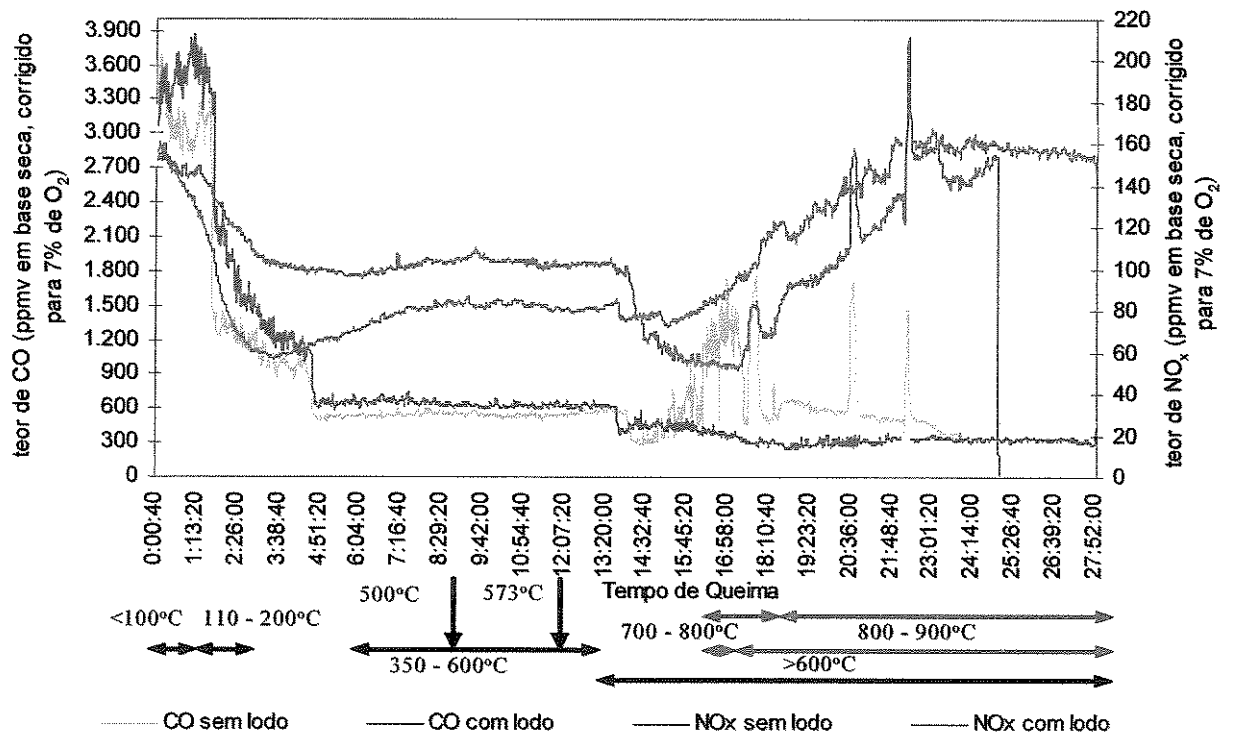


Figura 26 – Variação dos teores de CO e NO<sub>x</sub>, corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.

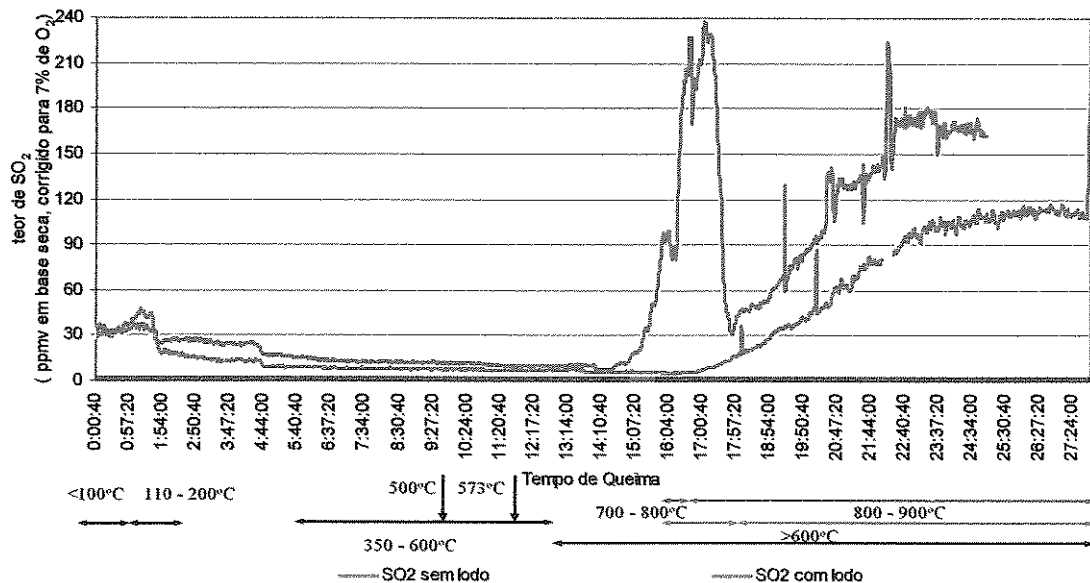


Figura 27 – Variação dos teores de SO<sub>2</sub>, corrigidos para 7% de oxigênio, emitidos no forno, ao longo do tempo de queima dos blocos com e sem incorporação do lodo da ETA Cubatão.

Da análise destas figuras, conclui-se que:

- Nas primeiras 14 horas:
  - as temperaturas na base e na abóbada do forno estiveram bem próximas nos dois testes (com e sem lodo), não influenciando, neste caso, nas taxas de emissão dos poluentes;
  - durante as 6 primeiras horas, exceto nas duas iniciais, os teores de oxigênio no teste em branco foram superiores ao do teste com o lodo; após este período, os dois testes apresentaram o mesmo teor de oxigênio;
  - os teores de CO<sub>2</sub> no teste com lodo estiveram muito próximos ao do teste em branco nas quatro primeiras horas. Após este período, as emissões decorrentes da incorporação do lodo nos blocos foram superiores ao do teste sem lodo. Provavelmente, a maior emissão do poluente no teste com lodo seja devido ao maior consumo de cavaco;
  - os teores de SO<sub>2</sub> medidos no teste sem lodo foram superiores ao do teste com lodo. Uma provável explicação é o maior teor de oxigênio no teste em branco, outra é a redução do teor de enxofre na massa cerâmica devido à incorporação do lodo;
  - os teores de NO<sub>x</sub> nos gases provenientes da queima dos blocos com o lodo foram inferiores aos obtidos no teste em branco, ao contrário do que ocorreu com os teores de CO. Os resultados obtidos no presente trabalho corroboram com os encontrados por Pinheiro e Valle (1995) e Budapest Power Plant Ltd (2005), que indicaram que a temperatura e os teores de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> eram os principais fatores que influenciavam na produção de NO<sub>x</sub> e CO. Quanto maior fosse a temperatura e o teor de O<sub>2</sub>, maior seria a produção de NO<sub>x</sub> e menor a de CO.
- Após as 14 horas de queima:
  - durante este período, a emissão de O<sub>2</sub> no teste com resíduo foi superior à do teste em branco. Em alguns momentos (entre 17 e 23 horas), no entanto, foram observados picos de O<sub>2</sub> no teste sem lodo. A maior quantidade de oxigênio é provavelmente resultante de um maior excesso de ar. Este excesso é indesejável, porque diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência térmica (PINHEIRO; VALLE, 1995);

- as temperaturas foram maiores na base e menores na abóbada do forno no teste com lodo em relação ao branco;
- embora as emissões de CO<sub>2</sub> ainda estivessem bem próximas, após 15 horas de queima, foram constatadas grandes flutuações neste parâmetro em ambos os testes;
- a emissão de CO no teste em branco superou a do teste com resíduo e assim permaneceu até o fim do ensaio. Foram observados picos significativos de CO, que atingiram cerca de 1800 ppmv entre 16 e 22 horas. Este comportamento mostrou-se bastante diferente daquele apresentado pelo teste com lodo (teor de CO inferior a 500 ppmv) no mesmo período. Foi possível perceber, em toda a queima, que os maiores teores de CO acompanharam os menores valores de O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e vice versa. Novamente, os resultados obtidos no presente trabalho estão de acordo com a literatura (PINHEIRO; VALLE, 1995; BUDAPEST POWER PLANT LTD, 2005);
- o SO<sub>2</sub> emitido no teste em branco foi superior àquele medido para o teste com resíduo. Os picos de SO<sub>2</sub>, para o teste sem resíduo, apareceram após 14 horas de queima, principalmente entre 15 e 22 horas, quando as temperaturas neste teste foram mais altas que as apresentadas na queima com lodo. Provavelmente, o aumento da temperatura propiciou uma liberação aguda de SO<sub>2</sub>;
- o teste com resíduo apresentou emissões de NO<sub>x</sub> superiores às medidas no teste em branco, sendo que a maior diferença foi de 50 ppm. Provavelmente, isto se deve à maior temperatura e ao maior teor de oxigênio (PINHEIRO; VALLE, 1995 ). O teste sem lodo apresentou, em alguns momentos (entre 22 e 25 horas de queima), picos que superaram os valores medidos no teste com resíduo. Estes picos coincidem com os do oxigênio.

Concluindo, verificou-se que a adição de resíduo alterou as emissões normalmente ocorridas no forno da cerâmica. As principais diferenças, entre os dois testes, foram conseqüências da dificuldade de se atingir a temperatura igual a 900°C na abóbada no teste com lodo. Esta dificuldade pode ter acontecido em decorrência de um dos três fatores mencionados a seguir, ou da combinação dos mesmos: (1) presença de carbonato de cálcio no lodo; (2) água ligada quimicamente no lodo; (3) maior excesso de ar.

Foi possível constatar, também, que a queima com lodo apresentou teores de CO e CO<sub>2</sub> mais constantes, sem aparecimento de picos significativos, após os 600°C – a partir das 14 horas de

queima até o fim do processo. A presença da calcita foi possivelmente determinante para este comportamento. A síntese do carbonato de cálcio demandou energia e retardou a formação brusca deste outros elementos. As reações de formação de SO<sub>2</sub>, por sua vez, ocorrem em temperaturas um pouco mais altas (>800°C). Como no teste com lodo estas temperaturas foram alcançadas mais tarde, os teores apresentados no gráfico (Figura 27) são justificados. Com relação ao NO<sub>x</sub>, pode-se afirmar que a emissão foi mais alta no teste com lodo como consequência da maior alimentação de cavaco (0,2% de Nitrogênio) e maior disponibilidade de O<sub>2</sub>.

#### 5.6.4.1. Comparação com limites e padrões de emissão

Para análise das emissões encontradas nos testes, foram utilizados, para comparação, os limites de COT e HCl estipulados pela Diretiva europeia 2000/76/EC (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2000). Esta tem como principal objetivo prevenir ou limitar, na medida do possível, os efeitos negativos ao ambiente e à saúde humana, resultantes da incineração ou co-incineração de resíduos. Fez-se uso dos limites máximos para emissões ocasionadas pela co-incineração de resíduos em fornos de cimento, uma vez que eles são mais restritivos do que para os demais fornos e, portanto, a análise estaria sendo feita a favor da segurança.

##### *A) Para COT:*

- COT do lodo utilizado no teste de queima = 32200 mg/kg;
- 37000 blocos entraram no forno, cada um apresentando uma massa seca média de 1,99 kg (obtida pela média de 10 medições de massa úmida, descontando a umidade dos blocos pós-secagem). Portanto, a massa total de blocos que entrou no forno foi de 73926 kg. Desta massa, 7% era lodo, ou seja, 5174,8 kg;
- se existiam 3,2 % de COT no lodo, entraram no forno 166,6 kg de COT. Na composição da massa cerâmica, 2,0% era carvão e deste material, 21% do carvão era carbono. Portanto, devido à presença de carvão, entraram 310,5 kg de COT no forno;

- segundo Morita *et al.* (2002), o teor de COT das argilas utilizadas na cerâmica estudada varia entre 0,15 e 0,18%. Adotou-se a média igual a 0,17%. Em 67272,7 kg de argila contidas na massa cerâmica, 111,0 kg era COT;
- a massa total de COT que entrou no forno foi de 588,1 kg;
- cada bloco queimado tinha massa igual a 1,99 kg (média obtida de 39 medições realizadas com blocos secos em estufa para os testes de absorção), ou seja, a massa total retirada do forno foi igual a 73926 kg. Desta massa, 0,4% (média dos 3 valores medidos), isto é, 325,3 kg era COT;
- Portanto, 262,8 kg de COT foram convertidos em CO, CO<sub>2</sub> e Material Particulado.

#### ***B) COT sem lodo***

- 37000 blocos entraram no forno, cada um apresentando uma massa seca média de 2,09 kg (média de 10 medições). Portanto, a massa total de blocos que entrou no forno foi de 77330 kg;
- na composição da massa cerâmica, 2,0% era carvão e deste material 21% do carvão era carbono. Portanto, devido à presença de carvão, entraram 324,8 kg de COT no forno;
- Adotou-se a média de COT para as argilas, igual a 0,17%. Em 75783,4 kg de argila contidas na massa cerâmica, 125,0 kg era COT;
- a massa total de COT que entrou no forno foi de 449,8 kg;
- cada bloco queimado tinha massa igual a 2,08 kg (média obtida de 39 medições realizadas com blocos secos em estufa para os testes de absorção), ou seja, a massa total retirada do forno foi igual a 76960 kg. Desta massa, 0,2% (média dos 3 valores medidos), 177,0 kg, era COT;
- portanto, durante a queima dos blocos sem lodo, 272,8 kg de COT foram convertidos em CO, CO<sub>2</sub> e Material Particulado.

Comparando os valores de COT nos testes com e sem lodo, observou-se que a maior contribuição de carbono era originário do carvão e que a presença de lodo no bloco não alterava as emissões.



### **C) COT no Material Particulado**

Considerou-se que a emissão de carbono orgânico total era devido ao carbono contido no material particulado (2,1%). Com este dado, foram realizados os seguintes cálculos:

- Foram utilizadas as 4 medições realizadas para material particulado. Estes valores foram corrigidos para teor de oxigênio igual a 10%. Portanto a emissão de COT foi de:

$$0 \text{ à } 18 \text{ horas de queima} - 182 \text{mg} / \text{Nm}^3 \times \frac{21-10}{21-8,7} \times 0,021 = 3,42 \text{mg} / \text{Nm}^3$$

$$18 \text{ à } 21 \text{ horas} - 390 \text{mg} / \text{Nm}^3 \times \frac{21-10}{21-8,7} \times 0,021 = 7,32 \text{mg} / \text{Nm}^3$$

$$21 \text{ à } 23 \text{ horas} - 332 \text{mg} / \text{Nm}^3 \times \frac{21-10}{21-10,5} \times 0,021 = 7,30 \text{mg} / \text{Nm}^3$$

$$23 \text{ à } 28 \text{ horas} - 396 \text{mg} / \text{Nm}^3 \times \frac{21-10}{21-10,2} \times 0,021 = 8,47 \text{mg} / \text{Nm}^3$$

Assim, constatou-se que a emissão de COT variou de 3,42 à 8,47mg/Nm<sup>3</sup> (valores corrigidos para 10% de oxigênio) e que, portanto, mostrou-se de acordo com a Diretiva Eutopéia.

### **D) Para HCl:**

Com relação ao HCl, constatou-se que, embora ele estivesse presente no lodo, sua concentração no bloco pós-secagem era inferior ao limite de detecção do método analítico (<0,001%). Na madeira, o teor de cloro também estava abaixo deste limite. Conclui-se, portanto, que não houve emissão de cloretos durante a queima.

A Tabela 56 mostra os valores obtidos no presente trabalho, bem como os limites máximos permitidos pela Diretiva Européia.

Tabela 56: Limites máximos de HCl e COT permitidos pela Diretiva Européia 2000/76/EC para co-processamento em fornos de cimento e concentrações calculadas destes parâmetros para os testes realizados.

| Poluente                         | Valore limites para emissão – Corrigidos para 10% de oxigênio (mg/m <sup>3</sup> ) | Emissão máxima na queima do bloco com lodo – Corrigida para 10% de oxigênio (mg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|--|--|
| HCl                              | 10,0   | ne   |
| COT                              | 10,0   | 3,4 - 8,5  |
| LEGENDA:<br>ne – nenhuma emissão |  |  |

Ainda com relação ao HCl, a mesma diretiva (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2000) indica que, caso o material a ser incinerado possua teor de substâncias organocloradas superior a 1%, na forma de cloretos, a temperatura de queima deve ser de 1100°C. Como o bloco pós-secagem apresentou teor de cloretos inferior a 0,001%, não é necessário o aumento da temperatura no forno.

Adicionalmente, foram realizados ensaios na cinza para verificação do teor de COT. Segundo a diretiva européia, ela deve possuir um teor máximo de COT igual a 3%. Constatou-se que a cinza, obtida na queima do bloco com lodo, apresentou teor de carbono orgânico total igual a 2,1 ± 0,1%. Este valor está de acordo com o proposto pela diretiva.

As emissões também foram comparadas com os fatores médios e máximos de emissão em fornos de cerâmicas medidos em 39 indústrias pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997).

Para o cálculo dos fatores de emissão dos poluentes na indústria investigada, procedeu-se da seguinte forma:

➤ Cálculo da % (m/m) a partir da emissão em ppmv (partes por milhão volumétricas) – CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>:

◆ determinação da massa do poluente emitido (em kg):

$$\sum_{i=1}^{i=3ou4} \left( \frac{\sum ppmv(j) \times 12,187 \times MMP \times Vazão(i) \times 40s \times 10^{-6}}{273,15 + T} \right) = massapoluente \quad (1)$$

Sendo:

- (i) – períodos de queima com diferentes vazões:

TESTE COM LODO: 1 (0-18 horas de queima); 2 (18-21 horas de queima); 3 (21-23 horas de queima); 4 (23-28 horas de queima);

TESTE SEM LODO: 1 (0-20 horas de queima); 2 (20-23 horas de queima); 3 (23-25 horas de queima).

- (j) – diferentes teores medidos a cada 40s

- MMP – massa molar do poluente (g):

do CO = 28,01; do NO<sub>2</sub> = 46,005 e do SO<sub>2</sub> = 64,059

- Vazão(i) – vazão do gás seco (Nm<sup>3</sup>/s) – Tabela 53

- T – temperatura em °C. Adotou-se T = 0°C (condições normais de temperatura e pressão)

- massapoluente – massa de poluente emitida (kg)

♦ determinação da % (m/m) a partir da massa de poluente emitida (em kg):

$$\frac{\text{massapoluente} \times 100}{\text{Massaprodutofinal}} = \% (m / m) \quad (2)$$

Sendo:

- Massaprodutofinal – massa de todos os blocos queimados no forno (kg)

Massaprodutofinal no teste com lodo = 37000 × 1,999 = 73963kg

Massaprodutofinal no teste sem lodo = 37000 × 2,099 = 77663kg

➤ Cálculo da % (m/m) a partir da emissão em (% v/v) – CO<sub>2</sub>:

Para este cálculo foram realizadas as seguintes determinações:

♦ volume de gás emitido (em L):

$$\sum_{i=1}^{i=3ou4} \left( \frac{\sum \%v / v(j) \times Vazão(i) \times 40s \times 10^3}{100} \right) = \text{volumegásemitido} \quad (3)$$

Sendo:

- Vazão(i) – Nm<sup>3</sup>/s

- ♦ determinação da massa do poluente emitido (em kg):

$$\frac{P \times \text{volumegásemitido} \times MMP \times 10^{-3}}{R \times T} = \text{massapoluente} \quad (4)$$

Sendo:

- P – pressão = 1 atm

- MMP – massa molar do CO<sub>2</sub> = 44,01g

- R – constante universal dos gases = 0,0821  $\frac{L \cdot atm}{mol \cdot K}$

- T – temperatura em Kelvin (K). Temperatura igual à 0°C ou 273 K.

- ♦ determinação da % (m/m) a partir da massa de poluente emitida (em kg) através da equação (2)
- Cálculo da % (m/m) a partir da emissão em mg/Nm<sup>3</sup> – SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> e Material Particulado.

Para este cálculo foram realizadas as seguintes determinações:

- ♦ determinação da massa do poluente emitido a cada hora (em kg/h):

$$\text{emissão}(mg / Nm^3)_{real(i)} \times \text{Vazão}(i) \times 10^{-6} = \text{massapoluente} / h(i) \quad (5)$$

Sendo:

- emissão(mg/NM<sup>3</sup>)<sub>real(i)</sub> – emissão sem correção de O<sub>2</sub> nos diversos períodos com diferentes vazões

- Vazão(i) – Nm<sup>3</sup>/h

- massapoluente/h(i) - massa de poluente emitida por hora com diferentes vazões

- ♦ determinação da massa do poluente emitida (em kg):

$$\sum \text{massapoluente} / h(i) \times \text{tqp}(i) = \text{massapoluente} \quad (6)$$

Sendo:

- tqp – tempo de queima por período

TESTE COM LODO: tqp(1) = 18 horas; tqp(2) = 3 horas de queima; tqp(3) = 2 horas; tqp(4) = 5 horas;

TESTE SEM LODO: tqp(1) = 20 horas; tqp(2) = 3 horas; tqp(3) = 2 horas.

- ♦ determinação da % (m/m) a partir da massa de poluente emitida (em kg) através da equação (2).

Comparando os valores obtidos nos cálculos e mostrados na Tabela 57 (dados brutos na Tabela AVI-1 do Anexo VI) com os fatores da EPA, constatou-se que as emissões nos testes realizados apresentaram-se na mesma ordem de grandeza das emissões das cerâmicas norte-americanas.

Estes valores calculados são certamente superiores aos realmente emitidos durante a queima devido às considerações de vazão. No início da queima ainda não ocorreu o chamado “efeito chaminé” no forno e não há praticamente vazão de gases.

Foram constatados três motivos que contribuíram para que a queima sem resíduo apresentasse, nos cálculos, emissões menores do que aquelas com o lodo: tempo de queima e vazão menores e a massa do produto final maior.

Tabela 57: Emissões máximas encontradas nos ensaios com lodo e sem lodo e máximos e médios fatores de emissão indicados pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997) para indústrias cerâmicas.

|  | CO <sub>2</sub> | CO    | NO <sub>x</sub> | SO <sub>2</sub> ' | SO <sub>2</sub> '' | SO <sub>3</sub> | Material Particulado |
|--|-----------------|-------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Máximo Fator de Emissão (% m/m) (ESTADOS UNIDOS, 1997)                   | 33,5            | 0,175 | 0,022           | 0,028             |                    | 0,0032          | 0,06                 |
| Fator de Emissão Médio (% m/m) (ESTADOS UNIDOS, 1997)                    | 28,5            | 0,16  | 0,020           | 0,027             |                    | 0,0026          | 0,055                |
| Emissão total - ensaio com lodo (% m/m)                                  | 32,56           | 0,086 | 0,026           | 0,013             | 0,004              | 0,0001          | 0,04                 |
| Emissão total - ensaio sem lodo (% m/m)                                  | 24,45           | 0,077 | 0,019           | 0,017             | 0,011              | 0,0016          | 0,08                 |
| LEGENDA:   |                 |       |                 |                   |                    |                 |                      |
| SO <sub>2</sub> ' – calculado a partir da emissão em ppmv                |                 |       |                 |                   |                    |                 |                      |
| SO <sub>2</sub> '' – calculado a partir da emissão em mg/Nm <sup>3</sup> |                 |       |                 |                   |                    |                 |                      |

Outra ferramenta utilizada para a análise dos resultados foi a aplicação do modelo de dispersão de CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> - SCREEN3 da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1995; 1996c). Os dados de entrada no programa estão relacionados no ANEXO VI (Tabela AVI-2). Com a aplicação do modelo, obtiveram-se as curvas indicadas nas Figuras 28 a 30. Nestas, estão indicadas as maiores concentrações de poluentes encontradas e os valores das mesmas a 200 metros da indústria. Estes últimos foram considerados para as sobreposições de plumas e comparações com os padrões de qualidade do ar (Tabela 58), propostos pelas referências: Brasil (1990) e São Paulo (1976).

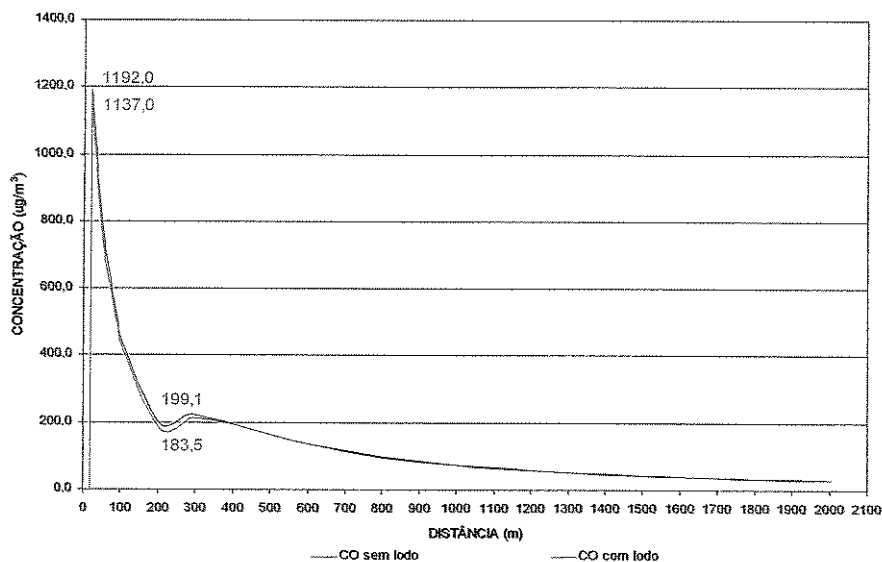


Figura 28 – Resultados do modelo de dispersão aplicado para CO (queima sem e com lodo).

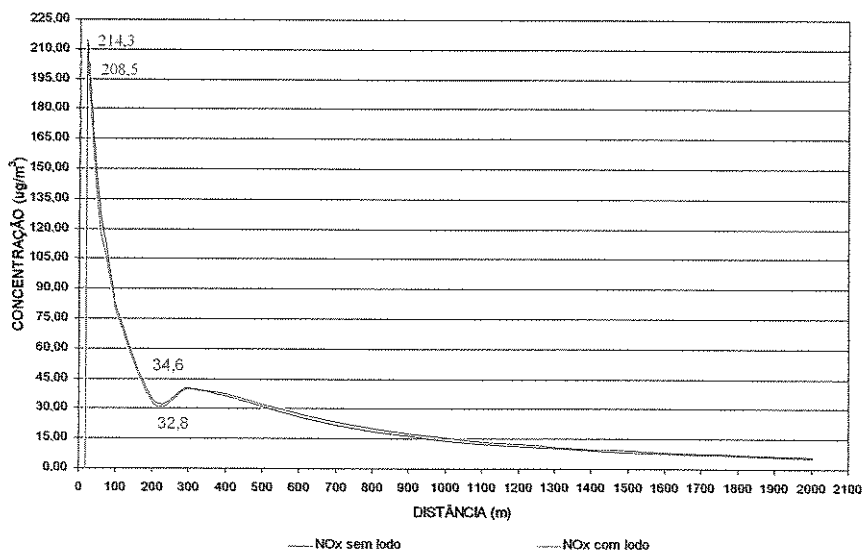


Figura 29 – Resultados do modelo de dispersão aplicado para NO<sub>x</sub> (queima sem e com lodo).

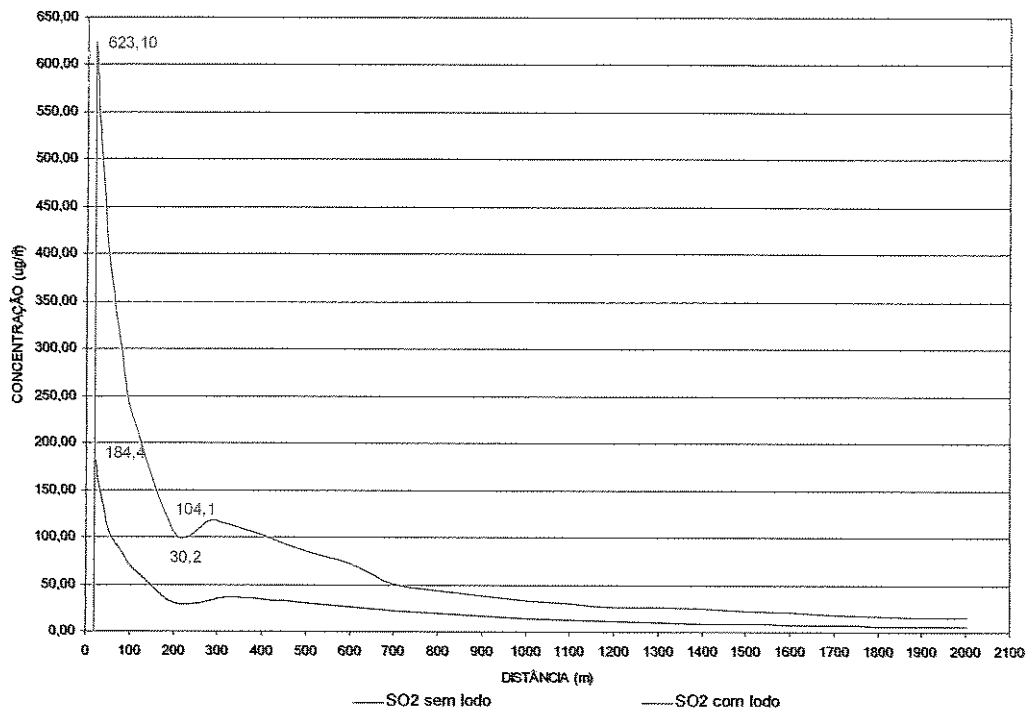


Figura 30 – Resultados do modelo de dispersão aplicado para SO<sub>2</sub> (queima sem e com lodo).

Tabela 58: Padrões de qualidade do ar.

| Padrões de Qualidade do Ar |                                      |  |                      |
|----------------------------|--------------------------------------|--|----------------------|
| Poluente                   | BRASIL (1990)                        |  | SÃO PAULO (1976)     |
|                            | Padrão Primário (µg/m <sup>3</sup> ) | Padrão Secundário (µg/m <sup>3</sup> ) | (µg/m <sup>3</sup> ) |
| CO                         | 40000 <sup>(1)</sup>                 |  | 40000 <sup>(1)</sup> |
| NO <sub>2</sub>            | 320 <sup>(1)</sup>                   | 190 <sup>(1)</sup>                     | -                    |
| SO <sub>2</sub>            | 365 <sup>(2)</sup>                   | 100 <sup>(2)</sup>                     | 365 <sup>(2)</sup>   |

LEGENDA:  
<sup>(1)</sup> concentração média de uma hora; <sup>(2)</sup> concentração média de vinte e quatro horas.

Fonte: BRASIL (1990) e SÃO PAULO (1976).

O programa fornece, para cada distância, um valor em y (“largura da pluma”) e em z (“altura da pluma”) a cada metro, correspondentes aos alcances das plumas nas direções perpendiculares à distância analisada. As seis chaminés da indústria estão dispostas, lado a lado, na direção do maior comprimento do prédio e estão distantes cerca de 6 metros uma da outra. A Figura 31 mostra o esquema da distribuição das chaminés e a sobreposição das plumas, para o CO (teste

com lodo), caso todos os fornos estivessem funcionando ao mesmo tempo, emitindo as concentrações de poluentes calculadas no programa.

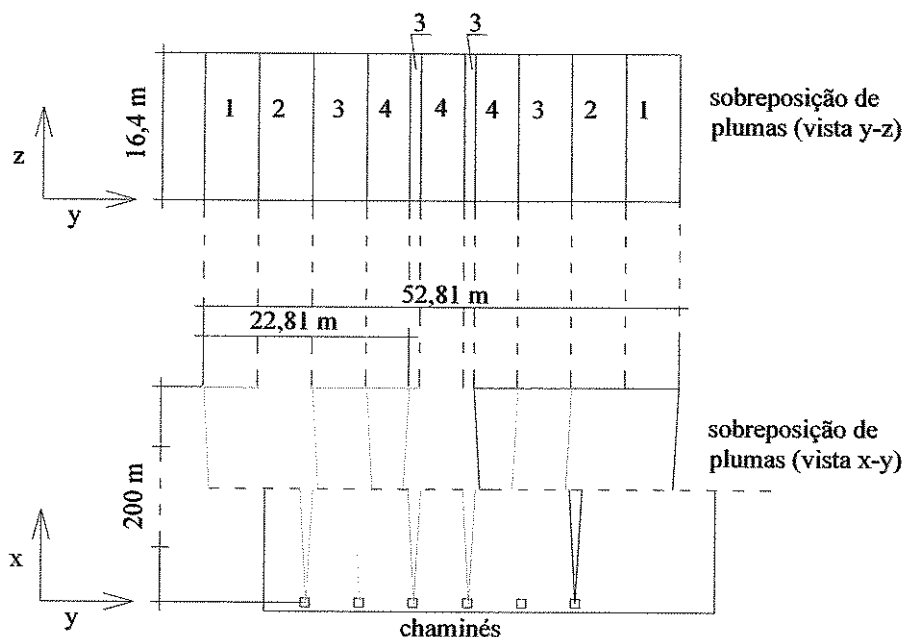


Figura 31 – Distribuição das chaminés e sobreposição de plumas para o CO (teste com lodo).

Os números 1, 2, 3 ou 4 indicam o número de plumas sobrepostas naquele espaço. A “largura da pluma” ( $y$ ) para o CO (teste com lodo) foi de 22,81 m. Como as apresentadas pelos outros poluentes foram próximas a esta (menor = 21,17 m e maior = 22,81), considerou-se o maior número de sobreposições igual a 4 para todos os poluentes. O programa SCREEN3 fornece os resultados em concentrações máximas de 1 hora. Para comparar com os padrões da legislação (BRASIL, 1990; SÃO PAULO, 1976), os valores dos gráficos foram multiplicados por 4, considerando a sobreposição, apesar de ser considerada uma assumida muito conservadora. Além disto, as concentrações de  $\text{SO}_2$  foram corrigidas de 1 hora para 24 horas, segundo equação (7) proposta por Turner (1994). A Tabela 59 fornece as concentrações finais dos poluentes.



$$C(24h) = C(1h) \times \left(\frac{1}{24}\right)^p \quad (7)$$

Sendo:

- C(24h) – concentração para 24 horas em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- C(1h) – concentração para 1 hora em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- p – expoente que varia entre 0,17 a 0,20. Para os cálculos utilizou-se a média, ou seja, 0,185.

Tabela 59: Concentrações encontradas para os parâmetros CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>, considerando sobreposição de plumas.

|  | Ensaio com lodo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |                 |                 | Ensaio sem lodo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |                 |                 |
|--|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|
|  | CO  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>2</sub> | CO  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>2</sub> |
| Concentrações máximas de 1 hora – 200 metros<br>(sobreposição de plumas) | 734,00  | 131,36          | 120,84          | 796,40  | 138,32          | 416,40          |
| Correção de 1 hora para 24 horas   | -   | -               | 67,123          | -   | -               | 231,3           |
| Concentrações finais<br>(sobreposição e correção quando necessária)      | 734   | 131             | 67              | 796   | 138             | 231             |

Comparando os dados da Tabela 58 àqueles da Tabela 59, concluiu-se que:

- caso todos os fornos da fábrica estivessem funcionando ao mesmo tempo e ocorressem as mesmas condições avaliadas pelo modelo; a partir de 200 metros das chaminés, fora dos limites da indústria, as emissões dos poluentes não afetariam a qualidade do ar.

Todos os cálculos foram realizados com os maiores teores encontrados durante os testes. Apenas o SO<sub>2</sub>, no ensaio sem lodo, superou o padrão secundário proposto pela legislação federal (BRASIL, 1990).

#### 5.6.4.2. Análise química do material particulado

Foram coletadas três amostras do material particulado (MP) durante o teste de queima sem incorporação de lodo e quatro durante o teste com a incorporação do resíduo. Cada coleta teve

duração de uma hora. Foram avaliados, também, nove filtros que serviram de branco. A Tabela 60 fornece a massa total dos elementos pesquisados no MP coletado, em períodos de uma hora, durante os testes. As Tabelas VI-3, VI-4 e VI-5 (ANEXO VI) fornecem todos os dados coletados.

Tabela 60: Análise do material particulado emitido no forno, devido à produção de blocos com e sem a incorporação de lodo.

| Elementos   | Massa total no material particulado <sup>(1)</sup> |            |            |                 |            |            |            |
|-------------|--|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------|
|             | Ensaio sem lodo                                    |            |            | Ensaio com lodo |            |            |            |
|             | 1a<br>(mg)   | 2a<br>(mg) | 3a<br>(mg) | 1b<br>(mg)      | 2b<br>(mg) | 3b<br>(mg) | 4b<br>(mg) |
| Alumínio    | 24,25  | 20,45      | 16,99      | 2,59            | 3,05       | 9,99       | 10,08      |
| Arsênio     | -  | -          | -          | -               | -          | -          | -          |
| Bário       | 33,94  | 24,69      | 17,47      | 13,98           | 20,29      | 12,26      | 7,45       |
| Cádmio      | -  | -          | -          | -               | -          | -          | -          |
| Chumbo      | 0,0071   | 0,0064     | 0,0056     | 0,0031          | 0,0044     | 0,0044     | 0,0042     |
| Cobre       | 0,0074   | 0,0082     | 0,0108     | 0,0088          | 0,0084     | 0,0061     | 0,0072     |
| Cromo total | 0,0112   | 0,0101     | 0,0087     | 0,0049          | 0,0069     | 0,0062     | 0,0075     |
| Mercúrio    | 0,1131   | 0,0356     | 0,0297     | 0,0311          | 0,0840     | 0,0232     | 0,0265     |
| Níquel      | 0,0188   | 0,0170     | 0,0142     | 0,0082          | 0,0119     | 0,0109     | 0,0126     |
| Selênio     | 0,0383   | 0,0350     | 0,0291     | 0,0171          | 0,0245     | 0,0226     | 0,0259     |
| Ferro       | 0,424  | 0,383      | 0,315      | 0,208           | 0,285      | 0,226      | 0,323      |
| Manganês    | 0,180  | 0,569      | 0,114      | 0,081           | 0,091      | 0,083      | 0,084      |
| Sódio       | 52,69  | -          | -          | -               | -          | -          | -          |
| Prata       | -  | -          | -          | -               | -          | -          | -          |
| Zinco       | 33,03  | -          | -          | -               | -          | -          | -          |

<sup>(1)</sup> massa total = massa coletada no filtro + massa da água de lavagem da sonda - média da massa do branco  
 Coletas com duração de 1 hora:  
 1a – entre 19 e 20 horas de queima  
 2a – entre 22 e 23 horas de queima  
 3a – entre 24 e 25 horas de queima  
 1b – entre 17 e 18 horas de queima  
 2b – entre 20 e 21 horas de queima  
 3b – entre 22 e 23 horas de queima  
 4b – entre 24 e 25 horas de queima

De posse destes dados, foram realizados os seguintes cálculos, com os elementos que foram detectados:

➤ cálculo da massa emitida de cada elemento (em kg):

$$\sum_{i=1a \text{ ou } 2a}^{i=1b \text{ ou } 2b} \text{massatotal}(i) \times t(i) \times 10^{-6} = \text{massapoluente} \quad (8)$$

Sendo:

- massatotal(i) (mg/h) – massa emitida de cada elemento no período de uma hora

- t(i) – duração da emissão:

t(1a) = 20 horas; t(1b) = 3 horas; t(1c) = 2 horas

t(1b) = 18 horas; t(2b) = 3 horas; t(2c) = 2 horas; t(2d) = 5 horas

➤ determinação da % (m/m) a partir da massa de poluente emitida (em kg) através da equação (2).

Os resultados destes cálculos estão mostrados na Tabela 61. Encontram-se, também, os fatores de emissão indicados na referência Estados Unidos (1997) – para cerâmicas norte-americanas que utilizam cavaco na queima.

Tabela 61: Emissão dos poluentes no material particulado e fatores de emissão da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1997).

|                  | Ensaio sem lodo (%m/m) | Ensaio com lodo (%m/m) | Máximo Fator de Emissão (% m/m) (ESTADOS UNIDOS, 1997) | Fator de Emissão Médio (% m/m) (ESTADOS UNIDOS, 1997) |
|------------------|------------------------|------------------------|--|---|
| Alumínio (Al)    | 7,47E-09               | 1,70E-09               | -  | -   |
| Bário (Ba)       | 1,01E-08               | 5,06E-09               | -  | -   |
| Chumbo (Pb)      | 2,21E-12               | 1,32E-12               | 2,40E-05   | 1,65E-05  |
| Cobre (Cu)       | 2,49E-12               | 3,12E-12               | -  | -   |
| Cromo total (Cr) | 3,49E-12               | 2,13E-12               | 3,55E-06   | 2,65E-06  |
| Mercúrio (Hg)    | 3,13E-11               | 1,34E-11               | 7,50E-07   | 4,95E-07  |
| Níquel (Ni)      | 5,86E-12               | 3,62E-12               | 2,35E-06   | 1,70E-06  |
| Selênio (Se)     | 1,20E-11               | 7,52E-12               | 6,00E-06   | 2,80E-06  |
| Ferro (Fe)       | 1,32E-10               | 9,02E-11               | -  | -   |
| Manganês (Mn)    | 7,12E-11               | 3,14E-11               | 1,80E-03   | 6,50E-04  |
| Sódio (Na)       | 1,36E-08               | 0                      | -  | -   |
| Zinco (Zn)       | 8,51E-09               | 0                      | -  | -   |

Observa-se que as emissões nos dois testes apresentaram-se inferiores aos fatores indicados pela EPA como comuns em cerâmicas americanas.

De um modo geral, as emissões medidas no teste com lodo mostraram-se na mesma ordem de grandeza àquelas obtidas no teste sem lodo.

### 5.6.4.3. Balanço de massa de carbono

Para avaliar o teste de queima, foi realizado um balanço de massa para o carbono. Para tanto, avaliou-se a quantidade de carbono que entrou no processo através dos insumos (lodo, argila, carvão e cavaco) e aquela que estava presente nos produtos da queima (blocos queimados, cinza, material particulado, emissões de CO e CO<sub>2</sub>). Todos os materiais foram considerados em base seca. Os dados desta análise estão mostrados na Tabela 62.

Tabela 62: Balanço de massa de carbono no forno.

|  | Teor de carbono (%) | Quantidade de material (kg) | Carbono (kg)  |
|--|---------------------|-----------------------------|---------------|
| <b>INSUMOS</b>                                     |                     |                             |               |
| Lodo   | 3,22                | 5175                        | 166,6         |
| Argila   | 0,17                | 66977                       | 110,5         |
| Carvão   | 21,0                | 1479                        | 310,5         |
| Cavaco   | 51,9                | 14778                       | 7669,8        |
| <b>PRODUTOS</b>                                    |                     |                             |               |
| Blocos queimados                                   | 0,44                | 73926                       | 325,3         |
| Cinza  | 2,1                 | 163                         | 3,4           |
| Material Particulado                               | 2,1                 | 31                          | 0,6           |
| Carbono na forma de CO                             | -                   | -                           | 27,3          |
| Carbono na forma de CO <sub>2</sub>                | -                   | -                           | 6571,6        |
| <b>BALANÇO DO CARBONO<br/>(INSUMOS - PRODUTOS)</b> | -                   | -                           | <b>1329,2</b> |

Provavelmente, a diferença constatada no balanço de massa deve-se à forma como foi medida a quantidade de cavaco. Para determinar a quantidade de combustível, os técnicos do IPT pesaram alguns recipientes preenchidos com cavaco durante a queima e obtiveram uma média destes valores. Durante o processo de queima, eles contaram quantos recipientes com cavaco foram utilizados. Com a multiplicação destes dois valores, obteve-se o total de combustível consumido. Este cálculo é bastante impreciso, uma vez que um recipiente pode estar mais cheio e outro mais vazio. Para o balanço de massa de carbono, a massa excedente representou 16,1% do total que entrou no processo.

## 5.6.5. Análises químicas dos blocos

### 5.6.5.1. Análise química dos blocos pós-extrusão, pós-secagem e pós-queima

Durante o processo cerâmico, o bloco passa por três estágios. O primeiro, quando é produzido na extrusora e segue para as estufas de secagem, foi chamado de pós-extrusora. O segundo, quando após a secagem, segue para o forno onde será queimado, foi denominado pós-secagem. O terceiro, quando deixa o forno e está pronto para ser vendido, foi definido como pós-queima.

Em todos estes estágios, a composição química dos blocos sem e com lodo foi determinada. Os resultados estão representados na Tabela 63.

Tabela 63: Composição química dos blocos nas diversas fases

| ELEMENTOS        | BLOCOS SEM LODO   |                 |                 |                   | BLOCOS COM LODO |                 |                 |                 |
|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                  | Pós-extrusora (%) | Pós-secagem (%) | Pós-queima (%)  | Pós-extrusora (%) | Pós-secagem (%) | Pós-queima (%)  | Pós-secagem (%) | Pós-queima (%)  |
| Carbono (C)      | 1,0 ± 0,1         | 0,9 ± 0,1       | <0,1            | 1,1 ± 0,1         | 1,1 ± 0,1       | <0,1            | 1,1 ± 0,1       | <0,1            |
| Alumínio (Al)    | 8,6 ± 0,1         | 8,8 ± 0,3       | 9,6 ± 0,4       | 8,8 ± 0,1         | 8,9 ± 0,1       | 9,9 ± 0,2       | 8,9 ± 0,1       | 9,9 ± 0,2       |
| Arsênio (As)     | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004          | <0,004          |
| Bário (Ba)       | 0,019 ± 0,001     | 0,019 ± 0,001   | 0,022 ± 0,001   | 0,023 ± 0,003     | 0,021 ± 0,001   | 0,026 ± 0,001   | 0,021 ± 0,001   | 0,026 ± 0,001   |
| Cádmio (Cd)      | <0,0001           | <0,0001         | <0,0001         | <0,0001           | <0,0001         | <0,0001         | <0,0001         | <0,0001         |
| Chumbo (Pb)      | 0,024 ± 0,005     | 0,022 ± 0,002   | 0,027 ± 0,003   | 0,027 ± 0,002     | 0,026 ± 0,002   | 0,029 ± 0,003   | 0,026 ± 0,002   | 0,029 ± 0,003   |
| Cromo total (Cr) | 0,0036 ± 0,0004   | 0,0038 ± 0,0002 | 0,0050 ± 0,0002 | 0,0041 ± 0,0003   | 0,0035 ± 0,0003 | 0,0057 ± 0,0001 | 0,0035 ± 0,0003 | 0,0057 ± 0,0001 |
| Cobre (Cu)       | <0,003            | <0,003          | <0,003          | <0,003            | <0,003          | <0,003          | <0,003          | <0,003          |
| Mercurio (Hg)    | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004          | <0,004          |
| Níquel (Ni)      | <0,001            | <0,001          | 0,0013 ± 0,0002 | <0,001            | <0,001          | <0,001          | <0,001          | <0,001          |
| Selênio (Se)     | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004            | <0,004          | <0,004          | <0,004          | <0,004          |
| Ferro (Fe)       | 3,8 ± 0,1         | 3,7 ± 0,1       | 4,2 ± 0,1       | 4,3 ± 0,1         | 4,3 ± 0,2       | 4,8 ± 0,3       | 4,3 ± 0,2       | 4,8 ± 0,3       |
| Manganês (Mn)    | 0,05 ± 0,01       | 0,05 ± 0,001    | 0,08 ± 0,02     | 0,06 ± 0,02       | 0,05 ± 0,01     | 0,06 ± 0,02     | 0,05 ± 0,01     | 0,06 ± 0,02     |
| Sódio (Na)       | 0,4 ± 0,1         | 0,3 ± 0,1       | 0,6 ± 0,1       | 0,4 ± 0,1         | 0,8 ± 0,3       | 0,9 ± 0,2       | 0,8 ± 0,3       | 0,9 ± 0,2       |
| Prata (Ag)       | <0,0005           | <0,0005         | <0,0005         | <0,0005           | <0,0005         | <0,0005         | <0,0005         | <0,0005         |
| Zinco (Zn)       | 0,027 ± 0,002     | 0,020 ± 0,002   | 0,030 ± 0,007   | 0,028 ± 0,005     | 0,028 ± 0,003   | 0,030 ± 0,001   | 0,028 ± 0,003   | 0,030 ± 0,001   |
| Cloro (Cl)       | <0,001            | <0,001          | <0,001          | <0,001            | <0,001          | <0,001          | <0,001          | <0,001          |
| Fluoreto (F)     | 0,18 ± 0,01       | 0,54 ± 0,01     | 0,21 ± 0,01     | 0,18 ± 0,01       | 0,29 ± 0,01     | 0,31 ± 0,01     | 0,29 ± 0,01     | 0,31 ± 0,01     |

Comparando os valores, foi possível constatar que, em nenhum dos estágios, o bloco com lodo apresentou teores de elementos e compostos químicos muito distantes daqueles apresentados pelo bloco sem lodo.

#### 5.6.5.2. Contaminação da água subterrânea devido à disposição inadequada dos blocos pós-consumo

Para garantir que a presença do lodo não causaria impacto ambiental após o uso na construção civil, foram realizados ensaios de solubilização, lixiviação e determinados os teores dos poluentes presentes na massa bruta do bloco pós queima (ANEXO VII). Para efeito de comparação, estes ensaios foram realizados nos blocos sem e com lodo. A Tabela 64 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 64: Resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação com os blocos pós-consumo sem e com lodo.

| PARÂMETROS       | UNIDADE | SOLUBILIZAÇÃO          |                |                | LIXIVIAÇÃO |                |                |
|------------------|---------|------------------------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|
|                  |         | V.M.P.                 | BLOCO SEM LODO | BLOCO COM LODO | V.M.P.     | BLOCO SEM LODO | BLOCO COM LODO |
| Arsênio          | mg/L    | 0,05                   | <0,05 - 0,19   | <0,05          | 5          | <0,05          | <0,05          |
| Berílio          | mg/L    | -                      | <0,01          | <0,1           | -          | -              | -              |
| Bário            | mg/L    | 1                      | <0,1           | <0,1           | 100        | 0,22 - 3,18    | 0,21 - 0,22    |
| Cádmio           | mg/L    | 0,005                  | <0,005         | <0,005         | 0,5        | <0,05          | <0,05          |
| Chumbo           | mg/L    | 0,05                   | <0,05          | <0,05          | 5          | <0,05          | <0,05          |
| Cianetos         | mg/L    | 0,1                    | <0,1           | <0,1           | -          | -              | -              |
| Cromo Total      | mg/L    | 0,05                   | <0,05          | <0,05          | 5          | <0,05          | <0,05          |
| Fenóis           | mg/L    | 0,001                  | <0,01          | <0,01          | -          | <0,001         | <0,001         |
| Fluoretos        | mg/L    | 1,5                    | 0,21 - 0,23    | <0,1 - 0,28    | 150        | <1,0           | <1,0           |
| Mercurio         | mg/L    | 0,001                  | <0,001         | <0,001         | 0,1        | <0,05          | <0,05          |
| Nitratos         | mg/L    | 10                     | <0,1 - 0,15    | <0,1           | -          | -              | -              |
| Prata            | mg/L    | 0,05                   | <0,05          | <0,05          | 5          | <0,05          | <0,05          |
| Selênio          | mg/L    | 0,01                   | <0,01          | <0,01          | 1          | <0,05          | <0,05          |
| Alumínio         | mg/L    | 0,2                    | <0,05          | <0,05 - 1,00   | -          | -              | -              |
| Cloretos         | mg/L    | 250                    | <5             | <5             | -          | -              | -              |
| Cobre            | mg/L    | 1                      | <0,05          | <0,05          | -          | -              | -              |
| Dureza           | mg/L    | 500                    | <5             | 19,7           | -          | -              | -              |
| Ferro            | mg/L    | 0,3                    | <0,05          | <0,05 - 0,09   | -          | -              | -              |
| Manganês         | mg/L    | 0,1                    | <0,05 - 0,15   | <0,05 - 0,30   | -          | -              | -              |
| Sódio            | mg/L    | 200                    | 2,46 - 4,9     | 1,60 - 4,9     | -          | -              | -              |
| Surfactantes     | mg/L    | 0,2                    | <0,1           | <0,1           | -          | -              | -              |
| Sulfatos         | mg/L    | 400                    | 7,4 - 8,87     | 15,6 - 70,3    | -          | -              | -              |
| Vanádio          | mg/L    | -                      | 7,26           | 1,1            | -          | -              | -              |
| Zinco            | mg/L    | 5                      | <0,05          | <0,05 - 0,18   | -          | -              | -              |
| Aldrin           | mg/L    | 3,0 x 10 <sup>-5</sup> | <0,00003       | <0,00003       | 0,003      | <0,003         | <0,003         |
| Clordano         | mg/L    | 3,0 x 10 <sup>-4</sup> | <0,0003        | <0,0003        | 0,03       | <0,03          | <0,03          |
| DDT              | mg/L    | 1,0 x 10 <sup>-3</sup> | <0,001         | <0,001         | 0,1        | <0,1           | <0,1           |
| Dieldrin         | mg/L    | 3,0 x 10 <sup>-5</sup> | <0,00003       | <0,00003       | 0,003      | <0,003         | <0,003         |
| Endrin           | mg/L    | 2,0 x 10 <sup>-4</sup> | <0,0002        | <0,0002        | 0,02       | <0,02          | <0,02          |
| Epoxi Heptacloro | mg/L    | 1,0 x 10 <sup>-4</sup> | <0,0001        | <0,0001        | 0,01       | <0,01          | <0,01          |
| Heptacloro       | mg/L    | 1,0 x 10 <sup>-4</sup> | <0,0001        | <0,0001        | 0,01       | <0,01          | <0,01          |
| Hexaclorobenzeno | mg/L    | 1,0 x 10 <sup>-5</sup> | <0,001         | <0,001         | 0,001      | <0,01          | <0,01          |
| Lindano          | mg/L    | 3,0 x 10 <sup>-3</sup> | <0,003         | <0,003         | 0,3        | <0,3           | <0,3           |



| PARÂMETROS                  | UNIDADE | SOLUBILIZAÇÃO          |                |                | LIXIVIAÇÃO |                |                |
|-----------------------------|---------|------------------------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|
|                             |         | V.M.P.                 | BLOCO SEM LODO | BLOCO COM LODO | V.M.P.     | BLOCO SEM LODO | BLOCO COM LODO |
| Metoxicloro                 | mg/L    | 0,03                   | < 0,03         | < 0,03         | 3          | < 3,0          | < 3,0          |
| Pentaclorofenol             | mg/L    | 0,01                   | < 0,01         | < 0,01         | 1          | < 1,0          | < 1,0          |
| Toxafeno                    | mg/L    | 5,0 x 10 <sup>-3</sup> | < 0,005        | < 0,005        | 0,5        | < 0,5          | < 0,5          |
| 2,4 - D                     | mg/L    | 0,1                    | < 0,1          | < 0,1          | 10         | < 10,0         | < 10,0         |
| 2,4,5 - T                   | mg/L    | 2,0 x 10 <sup>-3</sup> | < 0,002        | < 0,002        | 0,2        | < 0,2          | < 0,2          |
| 2,4,5 - TP                  | mg/L    | 0,03                   | < 0,03         | < 0,03         | 3          | < 3,0          | < 3,0          |
| Organofosf. E<br>Carbamatos | mg/L    | 0,1                    | < 1            | < 1            | 10         | < 10           | < 10           |

Com relação à lixiviação, não foram constatadas alterações nos parâmetros que poderiam ser decorrentes da adição do lodo.

Dois metais apresentaram resultados não conformes no teste de solubilização do bloco com lodo: Alumínio e Manganês. O último também se mostrou acima do limite nos testes realizados com o bloco sem adição de lodo.

Com relação às análises da massa bruta, foram obtidos os seguintes resultados (Tabela 65). Os resultados obtidos para cada um dos ensaios estão no ANEXO VII.

Tabela 65: Teores de poluentes no bloco pós-consumo com e sem adição de lodo.

| PARÂMETROS                              | UNIDADE | MASSA BRUTA |                |                |
|---|---------|-------------|----------------|----------------|
|   |         | V.M.P.      | BLOCO SEM LODO | BLOCO COM LODO |
| Umidade                                 | %       | -           | 0,32 - 1,07    | 0,35 - 0,9     |
| Ponto de Fulgor                         | °C      | -           | > 60           | >60            |
| pH                                      | -       | > 2 < 12,5  | 6,7 - 7,4      | 6,7 - 7,5      |
| Berílio                                 | mg/kg   | 100         | < 1            | < 1            |
| Cromo VI                                | mg/kg   | 100         | < 1            | < 1            |
| Mercúrio                                | mg/kg   | 100         | < 1            | < 1            |
| Vanádio                                 | mg/kg   | 1000        | 17,5 - 33,6    | 23,0 - 30,7    |
| Chumbo                                  | mg/kg   | 1000        | < 1 - 52,5     | 3,31 - 44,4    |
| Selênio                                 | mg/kg   | 100         | < 1            | < 1            |
| Arsênio                                 | mg/kg   | 1000        | < 1 - 1,82     | < 1 - 1,57     |
| Cianetos                                | mg/kg   | 250         | < 10           | < 10           |
| Sulfetos                                | mg/kg   | 500         | < 10           | <10            |
| Fenóis                                  | mg/kg   | 10          | < 0,5          | < 0,5          |
| Hidrocarb.Líquidos/<br>Bombeáveis       | %       | 5           | < 0,05         | < 0,05         |
| Óleos e Graxas                          | %       | 1           | < 0,05         | < 0,05 - 0,12  |
| Líquidos Livres                         |         | Ausente     | Ausente        | Ausente        |
| Surfactantes                            | mg/kg   | -           | < 0,5          | < 0,5          |
| COT                                     | % (p/p) | -           | 0,08 - 0,50    | 0,05 - 0,86    |
| Cloretos                                | mg/kg   | -           | 11,3 - 16,3    | 9,3 - 16,7     |
| Cromo Total                             | mg/kg   | -           | 4,89 - 8,46    | 6,22 - 17,7    |
| Cloro Residual                          | mg/kg   | -           | < 0,5          | < 0,5          |
| Sólidos Voláteis                        | % (p/p) | -           | 0,9 - 0,20     | 0,1 - 1,54     |
| Coliformes Fecais                       | NMP/g   | -           | < 1            | < 1            |
| Giárdia sp                              |         | -           | Ausentes       | Ausentes       |
| Todos os COV e<br>Solventes Halogenados | mg/kg   | -           | <0,05          | <0,05          |

Nos testes com a massa bruta, os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos permitidos pela norma NBR 10004 (listagem no. 9), e por terem apresentado concentrações no lixiviado

abaixo dos limites, os dois tipos de bloco devem ser considerados como resíduos Classe II – Não Inertes, ou seja, não são perigosos, mas podem apresentar solubilidade em água.

Era esperado que na massa bruta dos blocos não fossem detectados compostos orgânicos voláteis (COV). A concentração de COV já se encontrava abaixo dos limites de detecção no lodo, no bloco não seria diferente. O mesmo foi constatado para os pesticidas.

#### 5.6.5.3. Análises de risco à saúde da população que vive na área de disposição dos blocos pós-consumo ou em seu entorno

Na maioria das vezes, os blocos pós-consumo seguem para lixões. Neste caso, eles ficam em contato direto com o solo, podendo contaminar o mesmo e o lençol freático. Ao ficarem expostos, também, podem ser acidentalmente consumidos por crianças. Por outro lado, os blocos pós-consumo podem ter uma destinação mais adequada, isto é, podem ser encaminhados para usinas de reciclagem de entulho.

Desta forma, foi feita uma análise de risco, levando em consideração as seguintes vias de exposição:

- Ingestão da água contaminada por adultos e crianças;
- Ingestão de fragmentos dos blocos por crianças;
- Inalação de fragmentos dos blocos em usinas de reciclagem de entulho por adultos;
- Contato dérmico – banho com água contaminada e manuseio dos blocos.

#### ***A) Ingestão de água contaminada***

Para esta avaliação, foram consideradas as mesmas condições do item 5.6.2.2. deste texto, incluindo a contaminação em crianças. Elas consomem 1 litro de água por dia e tem aproximadamente 15 kg (SÃO PAULO, 2001b). Foram avaliadas a contaminação por alumínio e manganês. Os resultados foram comparados com os limites indicados pela referência ESTADOS UNIDOS (1999c, 2000b).

## **Alumínio**

Máxima concentração de alumínio no solubilizado = 1,00 mg/L

Adulto:

Consumo diário de alumínio por um adulto = 2,00 mg/dia

Massa de alumínio ingerida por dia por peso corpóreo =  $2,00/60 = 0,03$  mg/kg/dia

Criança:

Consumo diário de alumínio por uma criança = 1,00 mg/dia

Massa de alumínio ingerida por dia por peso corpóreo =  $1,00/15 = 0,07$  mg/kg/dia

MRL (ESTADOS UNIDOS, 1999c) = 2,00 mg/kg/dia

## **Manganês**

Máxima concentração de manganês no solubilizado = 0,22 mg/L

Adulto:

Consumo diário de manganês por um adulto = 0,44 mg/dia

Massa de manganês ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,44/60 = 0,007$  mg/kg/dia

Criança:

Consumo diário de manganês por uma criança = 0,22 mg/dia

Massa de manganês ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,22/15 = 0,015$  mg/kg/dia

RfD (ESTADOS UNIDOS, 2000b) = 0,14 mg/kg/dia. O RfD ou reference dose (dose de referência) é uma estimativa da dosagem diária de determinado elemento, potencialmente perigoso, que não causa efeito deletério no homem.

A ingestão de água subterrânea contaminada com alumínio e manganês em dosagens iguais às concentrações do solubilizado não afetará a saúde de um adulto de 60 kg ou de uma criança com 15 kg.

### ***B) Ingestão de fragmentos dos blocos pelas crianças***

Para a simulação do risco à saúde devido a ingestão de blocos com lodo, foram feitas as seguintes considerações:

- apenas os poluentes que representam riscos à saúde e que se encontravam acima do limite de detecção na massa bruta foram avaliados - o vanádio, o chumbo, o arsênio e o cromo total;
- uma criança pesa 15 kg e consome 200 mg de bloco triturado por dia (ESTADOS UNIDOS, 1989);
- os resultados foram comparados e analisados com as referências: AWWA (1990), WHO (1977, 1988), Estados Unidos (1992, 2000a, 2000c) e Paoliello et al. (2001).

#### **Vanádio**

Teor de vanádio na massa bruta = 30,7 mg/kg

Consumo diário de vanádio por uma criança = 0,006 mg/dia

Massa de vanádio ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,006/15 = 4,1 \cdot 10^{-4}$  mg/kg/dia

Devido à baixa absorção no trato gastro-intestinal, o vanádio não é muito tóxico para os humanos quando ingerido (WHO, 1988). O consumo de até 1,3 mg/kg/dia por 68 dias de um composto contendo vanádio resultou em cólica e diarreia. Não existem estudos indicando morte após consumo de vanádio por humanos (ESTADOS UNIDOS, 1992). Segundo a AWWA (1990), não há evidências de toxicidade oral crônica associada ao vanádio.

#### **Chumbo**

Teor de chumbo na massa bruta = 44,4 mg/kg

Consumo diário de chumbo por uma criança = 0,009 mg/dia

Massa de chumbo ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,009/15 = 5,9 \cdot 10^{-4}$  mg/kg/dia

Segundo Paoliello et al. (2001), foi recomendada uma ingestão tolerável semanal provisória de 25 µg/kg de peso corporal para uma criança de 2 anos com 10 kg. Isto corresponde a 0,0036 mg/kg/dia.

A WHO (1977) indicou que uma criança de cerca de 8 anos consome em sua dieta uma média de 0,21 mg de chumbo por dia. Numa criança de 15 quilos, ter-se-ia uma dose de 0,014 mg/kg/dia.

### **Arsênio**

Teor de arsênio na massa bruta = 1,57 mg/kg

Consumo diário de arsênio por uma criança = 0,0003 mg/dia

Massa de arsênio ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,0003/15 = 2,1 \cdot 10^{-5}$  mg/kg/dia

Segundo a ATSDR (ESTADOS UNIDOS, 2000c) afirmou que 5 crianças entre 2 e 7 anos morreram com seqüelas tardias da ingestão de água contaminada com arsênio, tendo ingerido quantidades entre 0,05 e 0,1 mg/kg/dia. A mesma fonte indicou um MRL igual a 0,005 mg/kg/dia para exposição por, no máximo, 14 dias e outro, igual a 0,0003 mg/kg/dia, para exposições por períodos superiores a 365 dias. Além disto, indicou RfD igual a 0,0003 mg/kg/dia e um fator para o surgimento do câncer igual a 1,5 mg/kg/dia.

### **Cromo Total**

Teor de cromo total na massa bruta = 17,7 mg/kg

Consumo diário de cromo total por uma criança = 0,004 mg/dia

Massa de cromo total ingerida por dia por peso corpóreo =  $0,004/15 = 2,4 \cdot 10^{-4}$  mg/kg/dia

A AWWA (1990) afirmou que pequenas doses de cromo são essenciais para a nutrição humana, no entanto doses superiores demonstram efeitos adversos à saúde.

Segundo Estados Unidos (2000a), poucos estudos foram realizados avaliando os efeitos do cromo na saúde das crianças. Sabe-se que elas necessitam de pequenas doses de cromo (III) para o crescimento e desenvolvimento normais. É provável que as crianças sofram os mesmos efeitos que os adultos quando expostas a grandes quantidades deste elemento.

A mesma referência indicou um RfD para o cromo VI igual a 0,003 mg/kg/dia e um RfD para o cromo III de 1,5 mg/kg/dia. Citou ainda um valor potencialmente cancerígeno para o cromo VI igual 0,42 mg/kg/dia.

O consumo do vanádio, chumbo, arsênio e cromo contidos nos blocos não trará problemas à saúde das crianças.

### ***C) Inalação de fragmentos dos blocos em usinas de reciclagem de entulho por adultos***

Para a simulação do risco à saúde dos adultos, devido a inalação dos fragmentos dos blocos em usinas de entulho, foram feitas as seguintes considerações:

- apenas os poluentes que representam riscos à saúde e que se encontravam acima do limite de detecção na massa bruta foram avaliados - o vanádio, o chumbo, o arsênio e o cromo total;
- foram utilizados dados da estação de reciclagem Estoril de Belo Horizonte, que tem capacidade de processar 119 toneladas de entulho por dia e opera ao ar livre. Ali, a geração de material particulado é de cerca de  $58,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (PINTO, 1999).
- considerou-se que todo o resíduo processado na usina de reciclagem de entulho era constituído somente por blocos produzidos com lodo de ETA.
- os resultados foram comparados e analisados com as referências: ESTADOS UNIDOS (1992, 1999d, 2000a, 2000c).

### **Vanádio**

Teor de vanádio na massa bruta = 30,7 mg/kg

Quantidade de vanádio no ar =  $0,0018 \mu\text{g}/\text{m}^3$

O limite permissível de exposição a compostos de vanádio é igual a  $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$  (ESTADOS UNIDOS, 1992).

## **Chumbo**

Teor de chumbo na massa bruta = 44,4 mg/kg

Quantidade de chumbo no ar = 0,0026  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A exposição ao chumbo no ambiente de trabalho deve ser no máximo igual a 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para trabalhadores cumprindo carga de 8 horas diárias (ESTADOS UNIDOS, 1999d).

## **Arsênio**

Teor de arsênio na massa bruta = 1,57 mg/kg

Quantidade de cromo total no ar = 0,00009  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A ATSDR (ESTADOS UNIDOS, 2000c), informou que a OSHA – Occupational Safety and Health Administration – indicou o valor 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (compostos inorgânicos de arsênio) como limite de exposição permitida para um trabalhador com carga horária de 8 horas por dia. A mesma fonte indicou que 0,0043  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de arsênio representa risco para o surgimento de câncer.

## **Cromo Total**

Teor de cromo total na massa bruta = 17,7 mg/kg

Quantidade de cromo total no ar = 0,0010  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Segundo a referência Estados Unidos (2000a), a OSHA – Occupational Safety and Health Administration – indicou que um indivíduo trabalhando 8 horas por dia pode ficar exposto a 0,5  $\text{mg}/\text{m}^3$  de cromo (III) e 1,0  $\text{mg}/\text{m}^3$  de metais e sais insolúveis de cromo. A mesma fonte citou um RfC – inhalation reference concentration (concentração de referência para inalação) para o cromo hexavalente igual a 0,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e um limite de concentração no ar para o cromo igual a 0,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A inalação das quantidades avaliadas de vanádio, chumbo, arsênio e cromo total no bloco pós-consumo não afetará a saúde de um adulto que trabalha 8 horas por dia em uma usina de reciclagem de entulhos com o porte da Usina Estoril.



#### ***D) Contato dérmico - banho e manuseio***

Conforme indicações da CETESB (SÃO PAULO, 2001b), não é necessária a análise de risco para o manuseio dos blocos ou banho com a água contaminada pelos mesmos. Nenhum contaminante orgânico se apresentou em valores superiores ao limite de detecção, tanto na massa bruta quanto no solubilizado e o contato dérmico não é uma via importante de contaminação por elementos inorgânicos.

*Giardia sp.* e coliformes fecais não foram detectados.

## 6. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

a) o lodo da Estação de Tratamento de Água de Cubatão (ETA Cubatão) pode substituir, em termos de composição mineralógica, granulometria e plasticidade, a mistura de argilas jazida da cerâmica de Tatuí;

b) a adição de 7% em massa do lodo da ETA Cubatão na massa cerâmica da indústria estudada não alterou significativamente as características de resistência, as dimensões, o esquadro e a planeza dos blocos, nem a absorção de água.

c) realizando análises de risco, devido à disposição do lodo diretamente sobre o solo no pátio da indústria, concluiu-se que:

- com relação a ingestão da água subterrânea contaminada: à título de prevenção, deve-se monitorar cada lote de lodo enviado à cerâmica, quanto à presença de chumbo no solubilizado. Investigar e controlar possíveis fontes de contaminação da água e monitorar os produtos químicos, no tocante a este parâmetro;
- com relação à inalação de compostos voláteis presentes no lodo ou de partículas suspensas pela ação do vento e pela movimentação de máquinas e veículos: não se caracterizou como via importante de contaminação do operador;
- com relação ao contato dérmico (banho utilizando água subterrânea contaminada e manuseio do lodo): não se caracterizou como via importante de contaminação do operador.

d) a disposição do lodo da ETA Cubatão diretamente sobre o solo, no pátio da indústria, antes de sua utilização no processo produtivo, não alterou, significativamente, a qualidade do solo e nem causou risco à saúde do operador;

e) a adição de lodo no bloco alterou as emissões no forno da cerâmica e resultou num maior consumo de combustível. As principais diferenças entre os testes de queima com e sem lodo foram conseqüências da dificuldade de se atingir temperatura igual a 900°C na abóbada do forno no teste com lodo. Esta dificuldade pode ter acontecido em decorrência de um dos três fatores

seguintes ou da combinação dos mesmos: presença de calcita no lodo; água ligada quimicamente no lodo; maior excesso de ar;

f) a queima dos blocos com lodo resultou em emissões de CO, SO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> mais estáveis, após os 600°C. A presença da calcita foi possivelmente determinante para este comportamento. A síntese do carbonato de cálcio demandou energia e retardou a formação brusca destes elementos;

g) não houve emissões de cloreto durante a queima e a emissão de carbono orgânico total variou entre 3,4 e 8,5 mg/Nm<sup>3</sup> (corrigidas para 10% de oxigênio), inferior ao limite máximo indicado pela diretiva europeia (10 mg/Nm<sup>3</sup> a 10% de O<sub>2</sub>);

h) o bloco pós-secagem, no teste com lodo, apresentou teor de cloretos inferior a 0,001%, não sendo, portanto, necessário o aumento da temperatura no forno para evitar a formação de dioxinas e furanos;

i) o teor de COT nas cinzas provenientes da queima do bloco com lodo foi igual a 2,1 ± 0,1% e atende o estipulado pela diretiva europeia para co-processamento de resíduos;

g) os fatores de emissão de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> e Material Particulado, obtidos dos resultados dos testes de queima realizados com e sem lodo, apresentaram a mesma ordem de grandeza dos fatores de cerâmicas norte-americanas;

h) após aplicação de modelo matemático de dispersão de poluentes, observou-se que caso todos os fornos da fábrica estivessem funcionando ao mesmo tempo, as emissões dos poluentes não afetariam a qualidade do ar fora dos limites da fábrica;

i) com relação aos metais presentes no material particulado, observou-se que as emissões nos testes com e sem lodo apresentaram-se inferiores aos fatores de emissão de cerâmicas norte-americanas. As taxas de emissão de metais presentes no material particulado nos testes com lodo foram, em sua maioria, na mesma de ordem de grandeza que àquelas obtidas nos ensaios sem lodo.

j) realizando análises de risco devido à disposição do bloco pós consumo em lixões ou em usinas de reciclagem de entulhos, concluiu-se que a ingestão da água subterrânea contaminada e de fragmentos dos blocos por crianças; a inalação de fragmentos dos blocos em usinas de reciclagem de entulho por adultos e o contato dérmico (banho com água contaminada e manuseio dos blocos) não se caracterizaram como vias importantes de contaminação;

k) a metodologia proposta para avaliar a viabilidade ambiental da aplicação de resíduo de tratamento de água em indústrias cerâmicas mostrou-se aplicável em escala real. Ela consiste nas seguintes etapas:

- caracterizar a água pelo menos por um ano hidrológico ou utilizar série histórica;
- caracterizar produtos químicos, pelo menos 3 vezes, não alterando o fabricante;
- avaliar destino dos poluentes na ETA: considerar os contaminantes que ficam adsorvidos no lodo dos decantadores ou que podem estar presentes na água de lavagem dos filtros;
- caracterizar o lodo considerando uso em cerâmica:
  - poluentes adsorvidos no lodo: metais, compostos orgânicos pesados, COT e patógenos;
  - compostos orgânicos e metais voláteis;
  - parâmetros mineralógicos e geotécnicos.
- avaliar a viabilidade técnica:
  - avaliação de diferentes proporções lodo:argila;
  - escolha de argilas que o lodo pode substituir;
  - verificação da necessidade de modificação no processo produtivo;
  - realização de testes mecânicos e comparação com os limites estipulados pelas normas técnicas;
  - comparação entre blocos com e sem resíduo.
- avaliar os impactos ambientais através da:
  - realização de testes de lixiviação e solubilização do lodo para avaliar a contaminação da água subterrânea, devido à disposição do resíduo no pátio da indústria ou na jazida. Realização de análise de risco (consumo e contato) para parâmetros que ultrapassem Valor Máximo Permitido;
  - determinação dos teores de COV no lodo e realização de análise de risco;
  - determinação de patógenos no lodo e realização de análise de risco;

- análise do solo onde o lodo ficou armazenado e num local que não sofreu esta influência;
- realização de teste de queima para avaliar emissões atmosféricas e comparação dos resultados obtidos com e sem incorporação do resíduo. Verificação do atendimento às normas ambientais vigentes;
- realização de testes de lixiviação e solubilização dos blocos para avaliar contaminação do solo e da água subterrânea devido a disposição inadequada dos blocos em lixões. Realização de análise de risco (consumo e contato) para parâmetros que ultrapassem Valor Máximo Permitido
- realização de análise de risco, considerando a reciclagem do entulho.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros, recomenda-se:

- verificar os teores de acrilamida no lodo e na água tratada recirculada, avaliando seu impacto;
- realizar teste de queima controlado, em escala real, utilizando argila típica e injetando poluentes. Desta forma, poder-se-ia determinar as teores máximos que o lodo poderia ter destes elementos;
- para este teste controlado, aplicar modelos de qualidade do ar mais complexos. Para isto deve-se medir a velocidade do ar durante o teste, obter dados meteorológicos completos, além de planta detalhada do local, incluindo relevo e edificações do entorno.
- realizar testes de lixiviação e solubilização no lodo e no bloco (com e sem adição de resíduo), substituindo o ácido acético pelo ácido sulfúrico para simular chuva ácida no pátio e no local de disposição imprópria, respectivamente;
- ensaiar blocos com e sem lodo em câmaras de envelhecimento para avaliar os efeitos do tempo nos mesmos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, E. Drinking Water Sludges: Overview in France in 2002. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 9-20.

AGUILAR, M. I.; SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F. Nutrient Removal and Sludge Production in the Coagulation–Flocculation Process. **Water Research**, London, v. 36, n. 11, p. 2910-19, 2001.

AGUILAR, M. I.; SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F.; MESEGUER, V.; FUENTES, A. Improvement of Coagulation-Flocculation Process Using Anionic Polyacrylamide as Coagulant Aid. **Chemosphere**, Germany, v. 58, no 1, p. 47-56, 2005.

ANICER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Dados do setor**. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/dados.htm>>. Acesso em: 02/03/2004.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, Baltimore. United Book Press, 2000.

ASCE – American Society of Civil Engineers; AWWA – American Water Works Association; USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals**. New York: American Society of Civil Engineers, 1996.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 2795-95 – Standard Test Methods For Analysis of Coal and Coke Ash**. West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 1995.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 5291-96 – Standard Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants**. West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 1996a.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E 247-96 – Standard Test Method for Determination of Silica in Manganese Ores, Iron Ores and Related Materials by Gravimetry.** West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 1996b.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 6357-00a - Standard Test Methods for Determination of Trace Elements in Coal, Coke and Combustion Residues from Coal Utilization Processes by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry.** West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 2000a.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E 1019-00 – Standard Test Methods of Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen and Oxygen in Steel and in Iron, Nickel, and Cobalt Alloys.** West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 2000b.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C 114/00 – Standard Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.** West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM, 2000c.

ASTSWMO - ASSOCIATION OF STATE AND TERRITORIAL SOLID WASTE MANAGEMENT OFFICIALS. **Beneficial Use Survey,** Washington, D.C., 2000. Disponível em: <http://www.astswmo.org/Publications/pdf/Benfuserpt.pdf>. Acesso em: 13/07/2004.

AWWA – American Water Works Association. **Water Quality and Treatment – A Handbook of Community Water Supplies.** 4a ed. McGraw-Hill, Inc. USA, 1990.

BACHE, D. H.; PAPAVALOPOULOS, E.N.; RASSOL, E.; ZHAO, Y. Q.; MCGILLIGAN, J. F. Polymers in Alum Sludge Dewatering: Developments and Control. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 53-62.

BARBOSA, R. M<sup>a</sup>. **Avaliação do Impacto de Lodos de Estações de Tratamento de Água à Biota Aquática através de Estudos Ecotoxicológicos.** São Carlos, 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.



- BARROSO, M. M. ; CORDEIRO, J. S. Metais e Sólidos: Aspectos Legais dos Resíduos de Estações de Tratamento de Água. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 21., João Pessoa, Paraíba. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001.
- BASTA, N. T.; ZUPANCIC, R. J.; DAYTON, E. A. Evaluating Soil Tests to Predict Bermudagrass Growth in Drinking Water Treatment Residuals with Phosphorus Fertilizer. **Journal of Environment Quality**, Madison, v. 29, no 6, p. 2007-12, 2000.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. de.; SPENCER, M.; PORTO, M. F. A.; NUCCI, N. L. R.; JULIANO, N. M. A.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- BRASIL. FIBGE-SEPLAN. **Estudo nacional da despesa familiar-ENDEF: dados preliminares, consumo alimentar-antropometria: região II (São Paulo), região IV (Minas Gerais e Espírito Santo) e Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.
- BRASIL. **NBR 6461 – Bloco Cerâmico para Alvenaria – Verificação da Resistência à Compressão – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.
- BRASIL. **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984a.
- BRASIL. **NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984b.
- BRASIL. **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984c.
- BRASIL. **NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984d.
- BRASIL. **Resolução CONAMA no 20**. Ministério do Meio Ambiente, 1986a. Disponível em: <[www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em: 10/10/2004.

BRASIL. **NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986b.

BRASIL. **NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987a.

BRASIL. **NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987b.

BRASIL. **NBR 10006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987c.

BRASIL. **NBR 10007 – Amostragem de Resíduos – Procedimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987d.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 3.** Ministério do Meio Ambiente, 1990. Disponível em: <<http://www.lei.adv.br/003-90.htm>>. Acesso em: 07/03/2005.

BRASIL. **NBR 7171 – Bloco Cerâmico para Alvenaria.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992a.

BRASIL. **NBR 8042 – Bloco Cerâmico para Alvenaria – Formas e Dimensões.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b.

BRASIL. **NBR 12988 – Líquidos Livres – Verificação em amostra de resíduos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993.

BRASIL. **Portaria No 518. de 25 de Março.** Brasília: Ministério da Saúde, 2004a.

BRASIL. **NBR 10004:2004 – Classificação de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004b.

BRASIL. **NBR 10005:2004 – Ensaio de Lixiviação.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004c.

BRASIL. NBR 10006:2004 – Ensaio de Solubilização. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004d.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357. Ministério do Meio Ambiente, 2005.

BROWN, L. M. **Removal of Heavy Metals from Water with Microalgal Resins - I. Process Development.** Water Treatment Technology Program Report No. 74. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver, 1996.

BUDAPEST POWER PLANT LTD. **Air Pollution.** Disponível em: <<http://www.bert.hu/doc.asp?id=261&lang=en>>. Acesso em: 28/02/2005.

BUENO, R. C. R. **Re: Trabalho da ABES** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: [pati\\_andrade@uol.com.br](mailto:pati_andrade@uol.com.br) em 07/10/2004.

BUTTLER, A. M.; FREITAS, A. A.; SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Codisposição do Lodo de ETAs em Matrizes de Cimento e Reaproveitamento de Resíduos da Construção Civil. *In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL*, 6., 2003, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2003.

CALIFÓRNIA. CALIFORNIA BAY-DELTA AUTHORITY. **Water Quality Program Plan.** Disponível em: <<http://calwater.ca.gov/Programs/DrinkingWater/DrinkingWaterQualityProgramPlan.shtml>>. Acesso em: 12/11/2004.

CAMPANTE, H.; SEABRA, A.M. Diagnóstico e Otimização de Operações e Processos: Parte I - Fornos Industriais. *Revista Keramica*, n. 251, p. 26-36, janeiro/fevereiro, 2002.

CANTÓ, J.; ARMENTER, J. L.; CRISTIÀ, J.; ARTEAGA, F.; CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A. Raw Material Production for Ceramic Lining Industry from Drinking Water Treatment Sludges: Case of Sant Joan Despí (Barcelona) Plant. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. *Proceedings...* London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 159-168.

CARVALHO, E. H. **Disposição de Resíduos Gerados nas Estações de Tratamento de Água em Estações de Tratamento de Esgoto com Decantação Primária.** São Carlos, 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CHIARLE, S.; RATTO, M.; ROVATTI, M. Mercury Removal from Water by Ion Exchange Resins Adsorption. **Water Research**, London, v. 34, n. 11, p. 2971-78, 2000.

CHRISTENSEN, L.; DICK, R. I. Specific Resistance Measurements: Methods and Procedures. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 111, n. 3, p. 258-71, 1985.

COLORADO. CDPHE – Colorado Department of Public Health and Environment. **Regulations Pertaining to the Beneficial Use of Water Treatment Sludge and Fees Applicable to the Beneficial Use of Sludges.** Water Quality Control Division – 5 CCR 1003-7. State Board of Health. Colorado: CDPHE, 2004.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BAIXADA SANTISTA – CBH – BS. **Minuta Preliminar do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 7.** Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-BS/218/relbsseg.pdf>>. Acesso em: 28/10/2004.

CORDEIRO, J. S. **O Problema dos Lodos Gerados nos Decantadores em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos. São Carlos, 1993. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CORDEIRO, J. S.; CAMPOS J. R. **O Impacto Ambiental Provocado pela Indústria da Água de Abastecimento.** Disponível em: <[http://www.esp.ce.gov.br/espce/paginas/arquivos/vigambi/Impacto\\_Ambiental ETA.pdf](http://www.esp.ce.gov.br/espce/paginas/arquivos/vigambi/Impacto_Ambiental ETA.pdf)>. Acesso em: 01/11/2003.

CORNWELL, D. A.; BURMASTER, J. W.; FRANCIS, J. L.; FRIEDLINE Jr., J. C.; HOUCK, C.; KING, P. H.; KOCKE, W. R.; NOVAK, J. T.; ROLAN, A. T.; SAN GIACOMO, R. Research Needs for Alum Sludge Discharge. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 79, n. 6, p. 99-104, 1987.

- CORNWELL, D. A.; KOPPERS, H. M. M. Slib, Schlamm, Sludge. **Cooperative Research Report**, Denver, U.S., American Water Works Association Research Foundation & KIWA, 1990.
- CORNWELL, D. A.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. Denver: American Water Works Association, 2000.
- COSIN, S.; KOZIEVITCH V. de F. J.; MORENO, M. T.; SOUZA SANTOS, P.; VELENZUELA DIAZ, F. R. Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água a Massa Cerâmica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2002.
- DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute. **Water Environment Research**, Alexandria, v. 73, n. 1, p. 52-57, 2001.
- DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; FRAGIACOMO, P.; TROFINO, J. C.; VIUDES, M. A. P. Clarificação da Água de Lavagem de Filtros de Sistemas de Filtração Direta Ascendente e Desaguamento do Lodo por Centrifugação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- EIDN – Environment Industry Development Network. Water Sludge Strategy. Australia, 2000. Disponível em: <<http://www.eidn.com.au/watersludgestrategy.html>>. Acesso em: 19/06/2003.
- EIKEBROKK, B. Coagulation-Direct Filtration of Soft, Low Alkalinity Humic Waters. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 55-62, 1999.
- ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Test Method for Evaluating Solid Waste**. Report Number 846, Washington: EPA, 1986.
- ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Risk assessment guidance for superfund: human health evaluation manual**. v. 1, Washington: EPA, 1989 (EPA/540/1-89/002).

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Methods For Determination of Metals in Environmental Sample – Supplement I**. Washington: EPA, 1994 (EPA – 600/R – 94/111).

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **SCREEN3 Model User's Guide**. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. EPA-454/B-95-004. Triangle Park, North Carolina, 1995.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Dispersion Models - SCREEN3**. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Air Models, 1996a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/scram001/tt22.htm>>. Acesso em: 28/02/2005.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical Chemical Methods – SW 846**, Washington: EPA, 1996b.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Emission Factor Documentation for AP-42 Section 11.3 - Brick and Structural Clay Product Manufacturing - Final Report**. For U. S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factor and Inventory Group. EPA Contract 68-D2-0159, Work Assignment No. 4-02, MRI Project No. 4604-02. Triangle Park, North Carolina, 1997.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **CFR 40 - Code Federal Register, parte 60, Anexo A**. Washington: EPA, 1998.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Giardia: Drinking Water Health Advisory**, 1999a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/humanhealth/microbial/giardiaha.pdf>>. Acesso em: 04/10/2004.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Giardia: Human Health Criteria Document**, 1999b. Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/humanhealth/microbial/giardia.pdf>>. Acesso em: 04/10/2004.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Cryptosporidium: Drinking Water Health Advisory**, 2001a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/humanhealth/microbial/cryptoha.pdf>>. Acesso em: 01/10/2004.

ESTADOS UNIDOS. EPA – Environmental Protection Agency. **Cryptosporidium: Human Health Criteria Document**, 2001b. Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/humanhealth/microbial/crypto.pdf>>. Acesso em: 04/10/2004.

ESTADOS UNIDOS. National Research Council of the National Academies. Committee on Toxicants and Pathogens in Biosolids Applied to Land, National Research Council. **Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices**, 2002. Disponível em: <<http://www.nap.edu/books/0309084865/html/>>. Acesso em: 07/09/2004.

ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Vanadium and Compounds**. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 1992.

ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Aluminum**. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 1999c.

ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Lead**. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 1999d.

ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Chomium**. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 2000a.

ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Manganese**, 2000b. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 2000b.

- ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Arsenic**, 2000c. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 2000c.
- ESTADOS UNIDOS. U.S. DHHS – U.S. Department of Health and Human Services. **Toxicological Profile for Fluorides, Hydrogen Fluoride, and Fluorine**, 2003. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: ATSDR, 2003.
- FAUST, S. D.; ALY, O. M. **Chemistry of Water Treatment**. 2 ed. Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: Lewis Publisher's: 1998.
- FERREIRA, R. **Comunicação pessoal durante visita à ETA Cubatão**. Cubatão, 2004.
- GALLIMORE, L. E.; BASTA, N.T.; STORM, D. E.; PAYTON, M. E.; HUHNEKE, R. H.; SMOLEN, M. D. Water Treatment Residuals to Reduce Nutrients in Surface Runoff from Agricultural Land. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 28, n. 5, p. 1474-78, 1999.
- GODBOLD, P.; LEWIN, K.; GRAHAM, A.; BARKER, P. **The Potential Reuse of Water Utility Products as Secondary Commercial Materials**. Disponível em: <[http://www.wrcplc.co.uk/downloads/Water\\_Utility\\_Waste\\_Recycled.pdf](http://www.wrcplc.co.uk/downloads/Water_Utility_Waste_Recycled.pdf)>. Acesso em: 19/06/2003.
- GRANDIN, S. R. **Desidratação dos Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água**. São Paulo, 1992. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HARRI, A.; BOSANDER, J.; ÖMAN, J.; BLOMBERG, J. (2002). Effects of Water Treatment Residuals on Sewage Treatment and Sludge Handling at Himmerfjärden Sewage Works, Sweden. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 225-32.
- HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo da Incorporação do Lodo Centrifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna em Matriz de



Concreto com Dosagem de 3%. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2003.

HOPPEN, C. Reciclagem de Lodo de ETA Centrifugado na Construção Civil, Método Alternativo para Preservação Ambiental. Curitiba, 2004. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná.

HORTH, H.; GENDEBIEN, A; AGG, R.; CARTWRIGHT, N. Treatment and Disposal of Waterworks Sludge in Selected European Countries. Inglaterra: Foundation for Water Research, 1994.

HOWARD, N. **Sustainable Construction – The Data**. Centre for Sustainable Construction. Watford: BRE, 2000.

HUANG, C.; PAN, J.R.; SUN, K.-D.; LIAW C.-T. Reuse of Water Treatment Plant Sludge and Dam Sediment in Brick-Making. **Water Science and Technology**, v. 44, n. 10, p. 273-77, 2001.

INGLATERRA. EGVM - EXPERT GROUP ON VITAMINS AND MINERALS. **Risk Assessment – Iron**, 2003. Disponível em: <[http://www.food.gov.uk/multimedia/pdfs/evm\\_iron.pdf](http://www.food.gov.uk/multimedia/pdfs/evm_iron.pdf)>. Acesso em: 23/12/2004.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. **Polyacrylamides in Drinking Water Treatment and Recycling of Sludge Liquors**. Report No FR0119, 1990. Disponível em: <<http://www.fwr.org/waterq/fr0119.htm>>. Acesso em: 19/06/2003.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Métodos de Análise Química para Argilas – Técnicas & Métodos – IPT – N – 1174**. São Paulo: IPT, 1980.

ISAAC. R. de L.; GREGORY, J. **Dewaterability of Ferric Sludge Conditioned with Polymers**. London, 1998. Preliminary Report - University of London.

ISAAC. R. de L.; LUVIZOTTO Jr., E.; CHAVEZ, A. (2002a). Clarificação de Água de Lavagem de Filtro e Lodo de Decantador Convencional para Recirculação em ETA. *In*: SIMPÓSIO LUSO-

BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – SILUBESA, 10., 2002a, Braga. **Anais...** Braga: APESB, APRH, ABES, 2002.

ISAAC, R. de L.; MORITA, D. M.; LUVIZOTTO Jr., E.; FERRÃO, A. M. de A. Use of Dewatered Sludge in Building Construction Components. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002b, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 169-77.

ISAAC, R. de L.; MORITA, D. M.; SILVA Jr. A. P da; NOVAES, R. M.; ANDRADE, P. S.; PORRAS, A. C. **Projeto Beta – Uso do Lodo de Estação de Tratamento de Água na Construção Civil - Relatório Final**. Campinas, 2004.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 6245/93 – Petroleum Products Determination of Ash**. Geneva: ISO, 1993.

JOHNSTON, R.; HEIJNEN, H. **Safe Water Technology for Arsenic Removal**. Disponível em: <<http://www.unu.edu/env/Arsenic/Han.pdf>>. Acesso em: 04/11/2004.

KAWAMOTO, P. H.; FERREIRA FILHO, S. S. Efeito da Oxidação Química no Processo de Condicionamento e Desidratação de Lodos de Estações de Tratamento de Água. *In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - SILUBESA*, 9., 2000, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: APESB, APRH, ABES, 2000.

KAYODE, T. O.; GREGORY, J. A New Technique for Monitoring Alum Sludge Conditioning. **Water Research**, London, v. 22, n. 1, p. 85-90, 1988.

LECHEVALLIER, M. W.; AU, K-K. **Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water**. WHO Drinking Water Quality Series. Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/en/watreatpath.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/watreatpath.pdf)>. Acesso em: 25/11/2004.

LECHAVALLIER, M. W.; NORTON, W. D. Giardia and Cryptosporidium in Raw and Finished Water. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 87, no 9, p. 54-68, 1995.

LEHMANN, M.; ZOUBOULIS, A. I.; MATIS, K.A. Removal of Metal Ions from Dilute Aqueous Solutions: a Comparative Study of Inorganic Sorbent Materials. **Chemosfere**, Germany, v. 39, no 6, p. 881-92, 1999.

LISLE, J.; ROSE, J. Cryptosporidium Contamination of Water in the USA and UK: A Mini-Review. **Journal Water SRT – AQUA**, London, v. 44, no 3, p. 103-17, 1995.

LOGSDON, G. S.; SYMONS, J. M. Mercury Removal by Conventional Water Treatment Techniques. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 65, p. 554-61, 1975.

MAGALHÃES, P. F. **Estudo de Viabilidade de Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água na Produção de Cerâmica Vermelha**. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MARINO, R. F. **Public Health Assessment - Palmetto Recycling, Incorporated - Columbia, Richland County, South Carolina**, 1995. The South Carolina Department of Health and Environmental Control Under Cooperative Agreement with the Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Disponível em: <[http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/PHA/palmetto/pal\\_toc.html](http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/PHA/palmetto/pal_toc.html)>. Acesso em: 29/01/2005.

MELO, A. A. de; LOVO, E.; BUENO, R. C. R.; NAPOLITANO, V. P. O. Impactos do Recebimento de Lodo de ETA em uma ETE-Franca, uma Solução Viável Operacionalmente e Ambientalmente Correta. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., Joinville, 2003. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2003.

MIKI, M. K. **Utilização de Polímeros para Condicionamento de Lodo de ETE para Desidratação em Filtro Prensa de Placas**. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MORITA, D. M. **Tratabilidade de Águas Residuárias Contendo Poluentes Perigosos: Estudo de Caso**. São Paulo, 1993. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. de O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. (2002). Incorporação de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. *In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – SILUBESA, 10., 2002, Braga. Anais...* Braga: APESB, APRH, ABES, 2002.

NOVO MÉXICO. New Mexico Environment Department. Water Systems Operator Certification Study Guide. Disponível em: <[http://www.nmenv.state.nm.us/swqb/FOS/Training/WSOC\\_Study\\_Guide/NM\\_Water\\_System\\_Operator\\_Certification\\_Study\\_Guide.pdf](http://www.nmenv.state.nm.us/swqb/FOS/Training/WSOC_Study_Guide/NM_Water_System_Operator_Certification_Study_Guide.pdf)>. Acesso em: 15/11/2004.

NIEMINSKI, E. C.; ONGERTH, J. E. (1995). Removing Giardia and Cryptosporidium by Conventional Treatment and Direct Filtration. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 87, n. 9, p. 96-106, 1995.

NOVAES, R. M. **Viabilidade Técnica da Incorporação de Lodos das Estações de Tratamento de Água do Município de Campinas em Blocos Cerâmicos**. Campinas, 2005. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

OBERACKER, F. E.; MAIER, D.; MAIER, M.; HAHN, H. H. (2002). Sustainable Handling of Arsenic-Containing Water Works Sludge. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT, 2002, London. Proceedings...* London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 233-45.

OLIVEIRA, L. P. de. **Especiação de Metais Pesados na Biolixiviação de Solo Contaminado Paulista**. São Paulo, 2004a. Exame de Qualificação - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, E. M. S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, 50, p. 324-30, 2004b.

- PAOLIELLO, M. M. B.; CHASIN, A. A. M. (2001). **Ecotoxicologia do Chumbo e seus Compostos**. Série Cadernos de Referência Ambiental – v.3. Centro de Recursos Ambientais.
- PAPAVASILOPOULOS, E. N. Viscosity as a Criterion for Optimum Dosing of Polymers in Waterworks Sludges. **Journal of Water and Environment Management**, London, v. 11, n. 3, p. 217-24, 1997.
- PATOCZKA, J.; JOHNSON, R.K.; JOHN J. SCHERI, J. J. **Trace Heavy Metals Removal with Ferric Chloride**. Trabalho apresentado em Water Environment Federation Industrial Wastes Technical Conference. Nashville, TN., 1998. Não Publicado.
- PAULSRUD, B.; STORHAUG, R.; HEM L. J. (2002). Management of Wastes from Drinking Water Treatment in Norway. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 21-8.
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook**. 5 ed. McGraw-Hill Book Company, 1973.
- PETERS, M. A.; LADD, D. M. Determination of Fluoride in Oxides With the Fluoride – Ion Activity Electrode. **Talanta**, Seattle, v. 18, n. 7, p. 655-64, 1971.
- PINHEIRO, P. C. C.; VALLE, R. M. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar. *In: CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA*, 2., 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, 1995, p.157-162.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- POON, C.S.; CHU, C.W. The Use of Ferric Chloride and Anionic Polymer in the Chemically Assisted Primary Sedimentation Process. **Chemosphere**, Germany, v. 39, no 10, p. 1573-82, 1999.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. Caracterização Físico-Química do Lodo Centrifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2003.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da Composição Granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 2, n. 1 e 2, p. 31-5, janeiro/abril, 1997.

RASOOL, E.; BROWN, P.; DOUGLAS, J.; COTTRELL, D. J. Turriff Sludge Treatment Works: Optimizing the Design. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 71-81.

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

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2001.

ROUF, A.; HOSSAIN, D. **Effects of Using Arsenic-Iron Sludge in Brick Making**. Disponível em: <[www.unu.edu/env/Arsenic/Dhaka2003/15-Rouf.pdf](http://www.unu.edu/env/Arsenic/Dhaka2003/15-Rouf.pdf)>. Acesso em: 05/10/2003.

SÃO PAULO. **Decreto nº 8.468, de 8 de Setembro de 1976 - Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que Dispõe Sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente**. São Paulo: SABESP, 1976.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Estudo de impacto ambiental EIA, relatório de impacto ambiental RIMA: manual de orientação**. São Paulo: 1992.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 1997**. São Paulo: CETESB, 1997.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 1998**. São Paulo: CETESB, 1998.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação**. Norma P 4.230, 1999. 32p. São Paulo: CETESB, 1999a.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 1999**. São Paulo: CETESB, 1999b.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2000**. São Paulo: CETESB, 2000.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2001**. São Paulo: CETESB, 2001a.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2001b.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2002**. São Paulo: CETESB, 2002.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2003**. São Paulo: CETESB, 2004a.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo 2001 - 2003**. São Paulo: CETESB, 2004b.

SARABIA, O. C. **Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos**, 2001. Disponível em: <<http://usuarios.lycos.es/drinkingwater/Toxicidad%20de%20lodos.pdf>>. Acesso em: 23/11/2003.

SCALIZE, P. S. **Disposição de Resíduos Gerados nas Estações de Tratamento de Água em Estações de Tratamento de Esgoto.** São Carlos, 2003. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, A. P., BIDONE, F. R. A., MARQUES, D. M. L. M. Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, S. J. (2002). The Management of Potable Water Treatment Sludge: Present Situation in the UK. *In*: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 29-36.

SOUZA FILHO, A. G. de. **Caracterização e Clarificação por Sedimentação da Água de Lavagem de Filtros Rápidos de uma Estação de Tratamento de Água que Utiliza Cloreto Férrico como Coagulante Primário.** São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SRINIVASAN, P.T.; VIRARAGHAVAN, T; SUBRAMANIAN, K. S. **Aluminium in Drinking Water: An Overview,** 1999. Disponível em: <[http://www.wrc.org.za/publications/watersa/1999/January/jan99\\_p47.pdf](http://www.wrc.org.za/publications/watersa/1999/January/jan99_p47.pdf)>. Acesso em: 12/11/2004.

TAIHEIYO CEMENT CORPORATION. **Environmental Report '03,** 2003. Disponível em: <<http://www.taiheiyo-cement.co.jp/english/envrpt2003/pdf/allenv2003.pdf>>. Acesso em: 26/05/2004.

THE COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Council Directive of 12 December 1991 on Hazardous Waste (91/689/EEC).** Official Journal L 377, 31/12/1991 P. 0020 – 0027, Brussels, 1991.



THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Council Directive of 26 April 1999 on the Landfill of Waste (1999/31/EC)**. Official Journal of the European Communities L 182, 16/07/1999 P. 001 – 0019, Luxembourg, 1999.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Directive 2000/76/EC of the European an of the Council of 4 December 2000 on the Incineration of Waste**. Official Journal of the European Communities L 332, 28/12/2000 P0091 – 0111, Brussels, 2000.

THOMPSON, P. L.; PAULSON, W. L. Dewaterability of alum and ferric coagulation sludges. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 90, n. 4, p. 164-70, 1998.

TURNER, D.B. **Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling**, Boca Raton. 2 ed. CRC Press Inc., 1994.

UNESCO/WHO/UNEP – UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION/WORLD HEALTH ORGANIZATION/UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring - Second Edition**, 1992. Disponível em: <[http://www.who.int/docstore/water\\_sanitation\\_health/wqassess/ch11.htm#Chapter%206\\*%20RIVERS](http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wqassess/ch11.htm#Chapter%206*%20RIVERS)>. Acesso em: 24/08/2003.

UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Alicante. **Optimization of the Composting Process of Sludge from Wastewater Treatment Plants**. Disponível em: <[http://www.ua.es/otri/servicios/oferta\\_cientifica/ot\\_ual/TO-SLUDGE.doc](http://www.ua.es/otri/servicios/oferta_cientifica/ot_ual/TO-SLUDGE.doc)>. Acesso em: 05/01/4/2004.

UNIVERSITY OF DENVER. Advances in X-Ray Analysis. *In*: ANNUAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF X-RAY ANALYSIS, 1958-69, Denver. **Proceedings...** Denver: Denver Research Institute, University of Denver, Plenum Press, N.Y, v. 1-12, 1958-1969.

WHO. **International Programme on Chemical Safety – Environmental Health Criteria 3 – Lead**. Geneva, 1977. Disponível em:

<<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc003.htm#SubSectionNumber:5.1.3>>. Acesso em: 25/02/2005.

WHO. **International Programme on Chemical Safety – Environmental Health Criteria 81 – Vanadium**. Geneva, 1988. Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc81.htm#SectionNumber:8.1>>. Acesso em: 27/02/2005.

WHO. **Guidelines for Drinking Water Quality, Third edition**, 2003. Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/guidelines3rd/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines3rd/en/)>. Acesso em: 04/11/2004.

WHORTON, A.; PERRYMAN, G.; HAWKINS, C.; DAVIES, I.; GRIGG, C. (2002). The Recycling of Water Treatment Works Cake to Agriculture and Land Restoration. *In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT*, 2002, London. **Proceedings...** London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p. 247-257.

WSAA – Water Services Association of Australia. **Water Treatment Sludge: Potential for Use as a Soil Ameliorant. Report No WSAA 106**, 1997. Disponível em: <<http://www.fwr.org/wsaa/wsaa106.htm>>. Acesso em: 19/06/2003.

YUZHU, W. **Condicionamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água: Estudo de Caso**. São Paulo, 1996. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ZHAO, Y. Q.; PAPAVALOPOULOS, E. N.; BACHE, D. H. Clogging of Filter Medium by Excess Polymer During Alum Sludge Filtration. **Filtration & Separation**, Oxford, v. 35, n. 10, p. 947-50, 1998.

ZORDAN, S. E. Ficha técnica – Entulho da Indústria da Construção Civil. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho\\_ind\\_ccivil.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm)>. Acesso em: 15/03/2005.

# ANEXO I

## METODOLOGIAS

### ANEXO I-1

#### Metodologias para Ensaio de Difractometria e Fluorescência de Raios-x

O procedimento utilizado para determinar a composição mineralógica através de difratometria de raios-X (método do pó), pode ser resumido nas seguintes etapas:

- quarteamento da amostra bruta de solo para a obtenção de uma amostra de aproximadamente 20 g;
- redução granulométrica para aproximadamente mesh 200;
- compactação de uma alíquota de 1 g a 3 g da amostra sobre a cavidade (27 mm de diâmetro por 2,5 mm de profundidade) de um suporte metálico e, introdução do suporte no equipamento de difratometria de raios-x.

As Figuras AI-1-1 e AI-1-2 mostram, respectivamente, um suporte com uma amostra pronta para ser analisada e o aparelho de difratometria de raios-x.

O ensaio de fluorescência de raios-x seguiu o seguinte procedimento:

- secagem e quarteamento da amostra bruta de solo para obtenção de uma amostra de aproximadamente 50 g;
- redução granulométrica da amostra para aproximadamente mesh 400;
- compactação do pó em prensa de 20 t;
- introdução da amostra compactada no equipamento de fluorescência de raios-x.

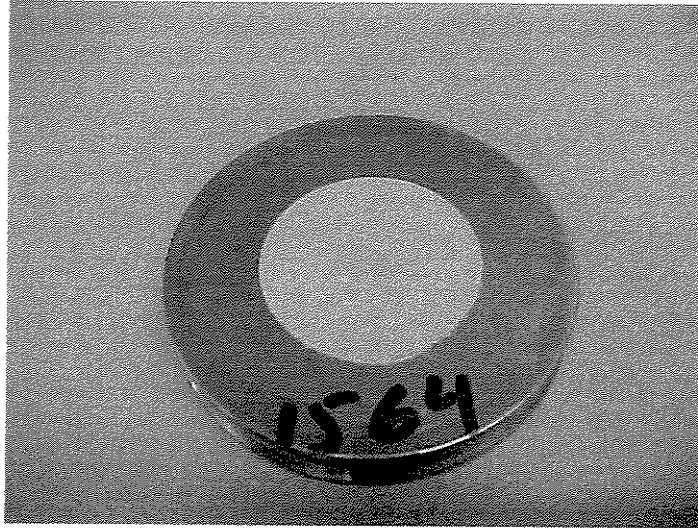


Figura AI-1-1 – Suporte, para a prensagem de amostra mineralógica, pronto para ser introduzido no equipamento de difratometria de raios-x.

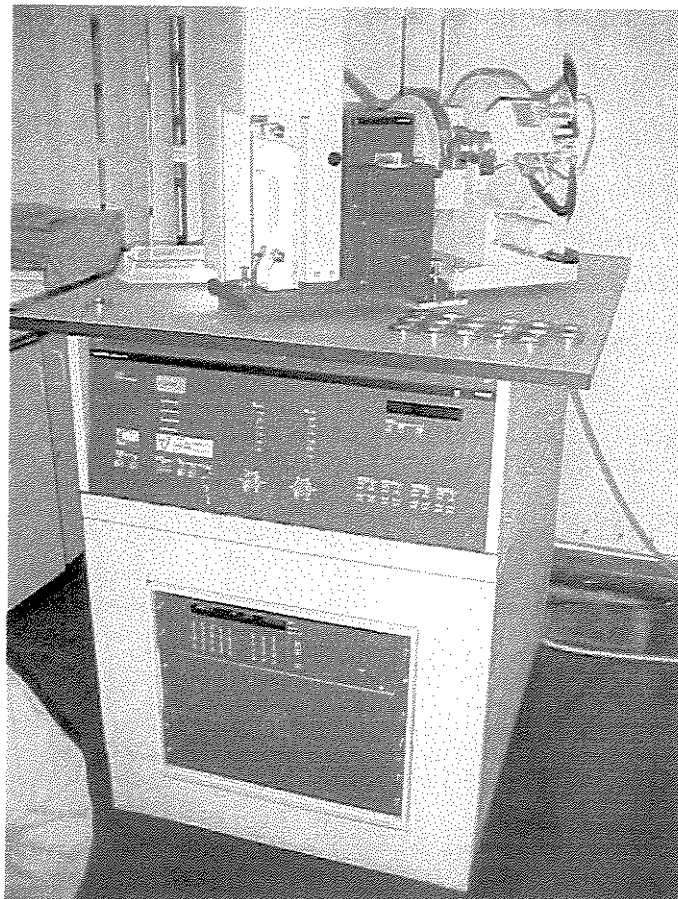


Figura AI-1-2 – Equipamento de difratometria da raios-x do LCT EPUSP.

## **ANEXO I-2**

### **Metodologia para Ensaio de Absorção de Água**

Para os ensaios de absorção de água utilizou-se a seguinte metodologia:

- para cada lote ensaiado, 13 blocos foram colocados em estufa por 24 horas;
- depois de retirados da estufa, os blocos foram pesados um a um (obtendo-se PI – Peso Seco) e depois colocados em um tanque com água onde permaneceram por 24 horas;
- os blocos foram retirados do tanque e pesados um a um (obtendo-se PF – Peso Molhado);

- através da expressão:  $\frac{(PF - PI) \times 100}{PI}$  obteve-se a porcentagem de absorção de água em cada bloco. Cada resultado foi analisado segundo a norma NBR 7171 (BRASIL, 1992a), que recomenda uma absorção superior a 8% e inferior a 25%.

## **ANEXO I-3**

### **Procedimento Teste de Queima (IPT, 2004)**

A seguir são descritas as instalações e os equipamentos, bem como os métodos e os procedimentos empregados na realização do teste de queima.

#### 1 – Forno

A Figura AI-3-1 mostra uma foto do forno onde foram realizados os testes. Ele consiste basicamente de uma grande câmara circular com teto em forma de abóbada, construído em alvenaria de tijolos comuns com capacidade para queima de aproximadamente 35.000 peças (11,5 x 14,0 x 24,0 cm) por fornada e é denominado pela cerâmica de Tatuí como Forno 1.

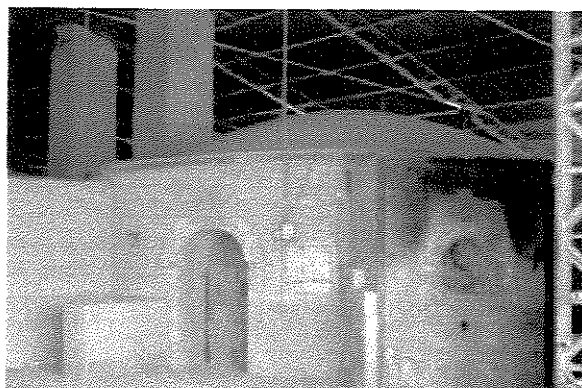


Figura AI-3-1 – Aspecto externo do Forno 1, instalado na cerâmica de Tatuí.

O piso do forno, também construído, em alvenaria possui aberturas através das quais os gases são conduzidos para canais subterrâneos, ligados a duas chaminés. Imediatamente antes da entrada dos gases em cada uma das chaminés há um registro do tipo “gaveta” que possibilita o controle da tiragem dos gases do forno (pressão interna do forno). Encerrado o período de queima, o ar quente do forno é desviado para os secadores durante todo o período de resfriamento da carga. A Figura AI-3-2 apresenta um desenho esquemático do forno.

O combustível utilizado no forno é cavaco de madeira, que é queimado sobre as grelhas das seis fornalhas existentes, as quais estão dispostas radialmente nas paredes laterais do forno. As fornalhas são construídas em alvenaria de tijolos comuns e, cada uma delas é provida com um dispositivo que alimenta o cavaco de madeira para o interior da fornalha, dispositivo este denominado aqui de alimentador de cavaco de madeira (vide Figura AI-3-3).

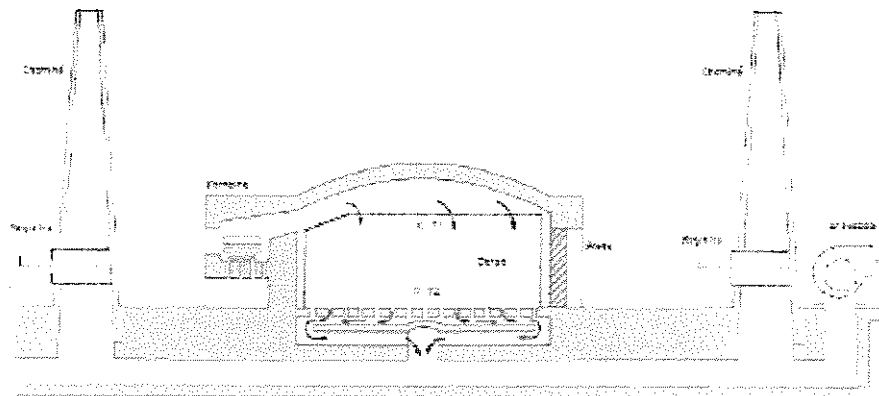


Figura AI-3-2 – Desenho esquemático de um forno intermitente utilizado na indústria de cerâmica estrutural (Fonte: Messias, L.S, 1988 apud IPT, 2004).

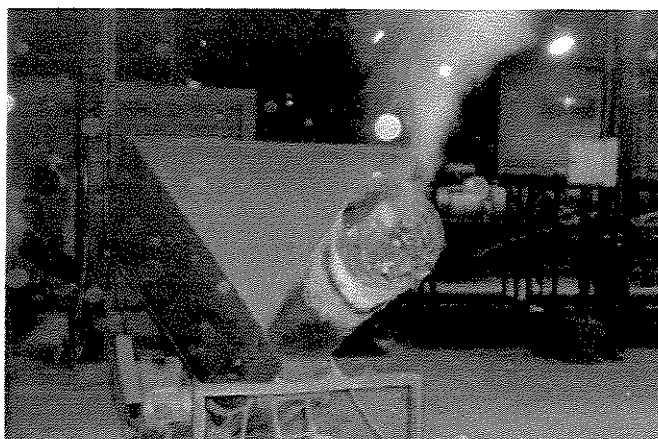


Figura AI-3-3 – Dispositivo utilizado para alimentar cavaco de madeira para o forno.

O alimentador de cavaco de madeira é composto por um silo, com capacidade aproximada de 300 kg de cavaco de madeira; montado sobre uma rosca sem fim de velocidade variável, instalada na base do silo, responsável pela introdução do material sobre a grelha das fornalhas. Acoplado ao dispositivo alimentador há um ventilador axial que insufla o ar de combustão sob a grelha das fornalhas, não havendo nenhum controle sobre a vazão do ar de combustão.

O cavaco é alimentado aos silos manualmente, por meio de recipientes, abastecidos nas pilhas de cavacos existentes no pátio, não havendo controle da quantidade total do cavaco de madeira alimentado por queima.

Para o controle do processo de queima, o forno possui dois termopares, um instalado no topo do forno e o outro na base. A temperatura máxima no topo do forno é de cerca de 900oC, acima da qual pode ocorrer a requeima das peças, que leva a perdas de produto. A temperatura da base é utilizada para indicar o final do período de secagem, durante o qual, ela permanece em torno de 60oC. Após a secagem de toda a carga, a temperatura da base se eleva podendo atingir valores próximos à 500oC, enquanto que a temperatura do topo é mantida em torno de 900oC até que o material da base seja considerado queimado.

## 2 – Monitoramento contínuo da composição da fase gasosa

Para o monitoramento contínuo da composição da fase gasosa foram amostrados gases em apenas uma das chaminés, numa região próxima do ponto definido para a coleta de material particulado. Para tanto, utilizou-se uma sonda resfriada à água, de modo que as velocidades das reações fossem congeladas rapidamente.

A determinação da composição foi realizada utilizando-se o analisador especificado na Tabela AI-3-1, cuja unidade de análise é composta por cinco células de medição que determinam a concentração, em base seca, de CO; CO<sub>2</sub>; SO<sub>2</sub>; O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

Para a determinação do teor de O<sub>2</sub>, o analisador dispõe de uma célula galvânica, enquanto que para a determinação dos teores de NO<sub>x</sub>, uma célula de medição cujo princípio é a quimioluminescência. Pelo princípio da quimioluminescência, o NO presente na amostra reage com ozônio formando NO<sub>x</sub> no estado excitado NO<sub>x</sub> (estado de mais alta energia), que ao retornar ao seu estado natural emite fótons cuja intensidade é proporcional à concentração de NO presente na amostra.

Para a determinação dos teores de CO, CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, o princípio de medição que o equipamento utiliza é o de absorção de radiação não dispersiva na região espectral do infravermelho.

A operação dos analisadores contínua foi realizada segundo as recomendações dos fabricantes. De modo a atender a estas recomendações, os gases amostrados, antes de serem analisados, passaram por um sistema de condicionamento onde foram retirados o material particulado e a umidade presentes. Na Figura AI-3-4 é apresentado um desenho esquemático do sistema de



condicionamento de amostra que foi utilizado e na Figura AI-3-5 uma foto mostrando o sistema de análise montado para os testes.

A calibração dos analisadores foi realizada no local, isto é, na indústria, mediante a utilização de gases padrões, cujos valores de concentração para calibração da escala e do ponto zero estão listados na Tabela AI-3-2.

Tabela AI-3-1: Especificação do analisador contínuo utilizado no monitoramento da composição dos gases efluentes do processo.

| Analisador                | Parâmetro medido     | Faixa de medição                     | Princípio de medição |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Horiba<br>Modelo<br>PG250 | Oxigênio             | 0 a 5/10/25%                         | Eletroquímico        |
|                           | Dióxido de carbono   | 0 a 5/10/20%                         | Infravermelho        |
|                           | Monóxido de carbono  | 0 a 200;500/100/2000/5000 ppmv       | Infravermelho        |
|                           | Óxidos de nitrogênio | 0 a 25/50/100/250/500/1000/2500 ppmv | Quimioluminescência  |
|                           | Dióxido de enxofre   | 0 a 200/500/1000/3000 ppmv           | Infravermelho        |

Tabela AI-3-2: Gases padrão utilizados para calibrar os analisadores contínuos utilizados no monitoramento da composição dos gases efluentes do processo.

| PARÂMETRO MEDIDO     | CONCENTRAÇÃO    |
|----------------------|-----------------|
| Oxigênio             | 5,0             |
| Dióxido de carbono   | 10,0            |
| Monóxido de carbono  | 396             |
| Óxidos de nitrogênio | 137             |
| Dióxido de enxofre   | 781             |
| Gás zero             | Nitrogênio 100% |

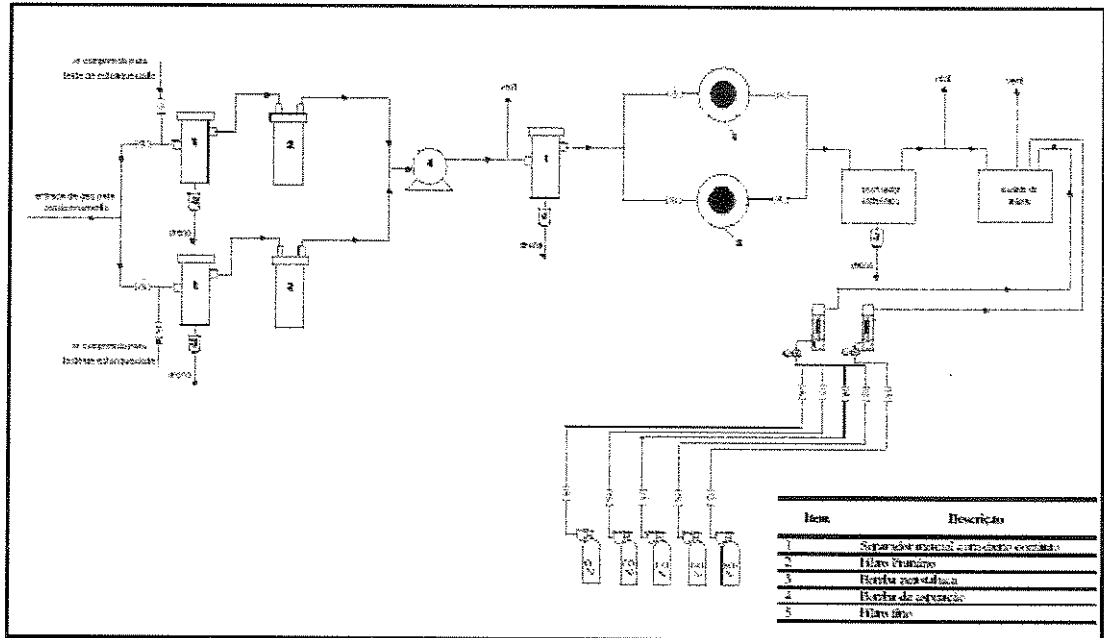


Figura AI-3-4 – Dispositivo utilizado para o condicionamento dos gases amostrados.



Figura AI-3-5 – Sistema de monitoramento contínuo utilizado durante os testes.

### 3 – Determinação da concentração de material particulado e óxidos de enxofre.

A determinação da concentração de material particulado nos gases de chaminé foi realizada utilizando-se os procedimentos, materiais e equipamentos descritos no método número 5 da USEPA – United States Environmental Protection Agency, que consta do CFR 40 - Code Federal

Register, parte 60, anexo A de 1998, que é o método base utilizado pelos órgãos ambientais brasileiros.

Neste método, o gás é aspirado isocineticamente (amostra é aspirada com velocidade igual ao do ponto de onde está sendo coletada) por uma sonda aquecida que impede a condensação dos vapores presentes na amostra. Em seguida, o gás passa por um elemento filtrante que retém o material particulado. O filtro é instalado em uma caixa, que é mantida aquecida a 120°C, impedindo assim que os vapores existentes na amostra condensem no dispositivo de filtragem. Após passar pelo filtro, o gás segue para um conjunto de borbulhadores com água, onde os condensáveis ficam retidos.

A concentração de material particulado é determinada a partir dos valores da massa de material particulado retido no filtro, massa de material particulado removida da sonda por lavagem (depósitos) e do volume de gases secos coletados, medido no integrador volumétrico existente na “caixa de controle”. Assim, a concentração de material particulado obtida é expressa em miligramas por normal metro cúbico de gás seco ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ).

As concentrações de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$ ) foram determinadas utilizando-se os procedimentos, materiais e equipamentos descritos no método número 8 da USEPA, que consta do CFR 40 - Code Federal Register, parte 60, anexo A de 1998, que é o método base utilizado pelos órgãos ambientais brasileiros.

Segundo este método, uma alíquota de amostra é retirada do fluxo de gás e é borbulhada em soluções específicas e seletivas, onde as moléculas de  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$  presentes no fluxo gasoso são absorvidas.

Os teores de  $\text{SO}_2$  (os teores de dióxido de enxofre foram determinados, também, pelo analisador contínuo) e  $\text{SO}_3$  foram obtidos a partir das massas desses compostos presentes nas soluções absorvedoras após as amostragens, por meio de determinações titulométricas e do volume de gás amostrado. O valor obtido nos cálculos é apresentado em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .

A Figura AI-3-6 mostra o equipamento utilizado para as amostragens de material particulado e  $\text{SO}_x$ .

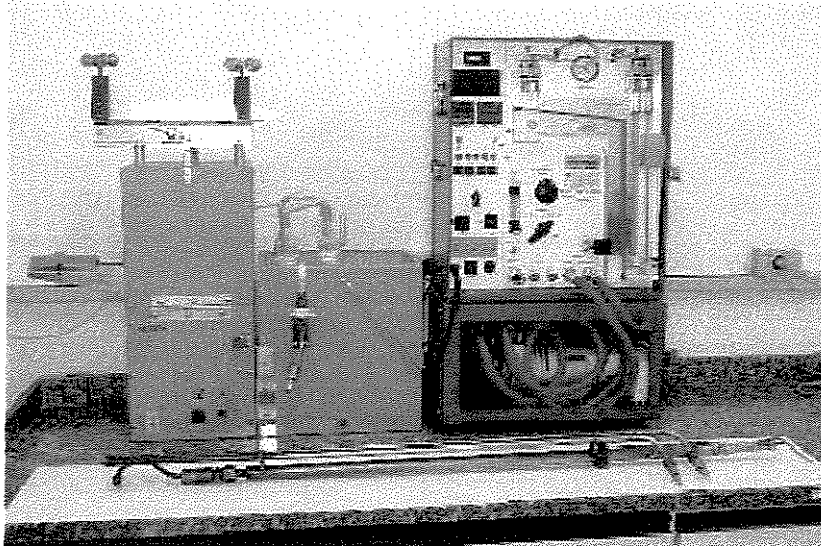


Figura AI-3-6 – Equipamento para coleta de material particulado e  $SO_x$ .

#### 4 – Determinação da vazão de cavaco de madeira

Considerou-se que os dispositivos utilizados para alimentar o cavaco nas fornalhas não possuem curvas de aferição da vazão em função do número de pontos da polia. O material alimentado nos silos é feito por recipientes. Portanto, optou-se por determinar a massa média de cavaco de madeira contida em um recipiente e o número de recipientes alimentados em cada um dos alimentadores ao longo do período de operação.

Pelo procedimento descrito anteriormente, foi possível determinar a quantidade total e a vazão horária de material introduzido a cada dispositivo de alimentação e a quantidade total de cavaco consumida durante todo o ciclo de queima.

Cabe ressaltar que as máquinas de alimentação de cavaco não têm posição fixa em relação às fornalhas e nem em relação ao forno, portanto a vazão horária individual de cada fornalha pode variar de um ciclo para outro.

#### 5 – Temperatura interna do forno

Para medir da temperatura do topo e da base do forno foram utilizados termopares do tipo K com indicação digital, de propriedade da cerâmica de Tatuí. Para a medição da temperatura da

chaminé foi utilizado o termopar tipo K com indicação digital, que é parte integrante da sonda de coleta de material particulado, de propriedade do IPT.

#### 6 – Determinação da velocidade e vazão total dos gases de combustão

A velocidade dos gases de chaminé foi determinada utilizando-se um tubo de Pitot tipo S acoplado a um Pascalímetro (dispositivo utilizado para medir pressões muito baixas), cujo range é de 0 a 120 Pa e precisão de leitura igual a 2,0 Pa.

O Pascalímetro foi utilizado em substituição ao manômetro inclinado, equipamento normalmente utilizado neste tipo de medição, devido às velocidades encontradas serem muito baixas, da ordem de 2 m/s, o que acarreta em um diferencial de pressão no tubo de Pitot da ordem de 0,2 mmca.

A vazão total dos gases efluentes ao processo foi determinada a partir da velocidade média dos gases e da área da seção transversal da chaminé, onde foi levantado o perfil de velocidade do escoamento.

#### 7 – Umidade dos gases

A umidade dos gases foi determinada por gravimetria a partir da condensação do vapor d'água presente em uma alíquota de gás amostrada e do volume do gás amostrado.

## ANEXO II

### TABELAS – QUALIDADE DO RIO CUBATÃO

Tabela AII-1: Densidade de Coliformes Fecais (NMP/100ml) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|     |         |         |         |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mês | Jan/97  | fev/97  | mar/97  | abr/97  | mai/97  | jun/97  |
| CF  | 5,0E+03 | 8,0E+02 | 1,3E+03 | 5,0E+02 | 5,0E+03 | 3,0E+03 |
| Mês | jul/97  | ago/97  | set/97  | out/97  | nov/97  | dez/97  |
| CF  | 8,0E+02 | 3,0E+03 | 5,0E+02 | 5,0E+03 | 5,0E+02 | 5,0E+03 |
| Mês | jan/98  | fev/98  | mar/98  | abr/98  | mai/98  | jun/98  |
| CF  | 1,3E+04 | 1,7E+03 | 5,0E+03 | 1,3E+03 | 3,0E+03 | 2,2E+02 |
| Mês | jul/98  | ago/98  | set/98  | out/98  | nov/98  | dez/98  |
| CF  | 1,7E+03 | 7,0E+02 | 1,3E+03 | 8,0E+03 | 1,3E+03 | 8,0E+02 |
| Mês | jan/99  | fev/99  | abr/99  | jun/99  | ago/99  | out/99  |
| CF  | 8,0E+02 | 8,0E+03 | 5,0E+03 | 1,7E+02 | 8,0E+03 | 5,0E+03 |
| Mês | dez/99  | fev/00  | abr/00  | jun/00  | ago/00  | out/00  |
| CF  | 1,4E+01 | 7,0E+03 | 3,0E+02 | 2,0E+00 | 5,0E+01 | 8,0E+00 |
| Mês | dez/00  | fev/01  | abr/01  | jun/01  | ago/01  | out/01  |
| CF  | 5,0E+02 | 3,0E+03 | 7,0E+01 | 5,0E+01 | 3,0E+02 | 1,3E+03 |
| Mês | dez/01  | fev/02  | abr/02  | jun/02  | ago/02  | out/02  |
| CF  | 1,7E+03 | 1,7E+03 | 3,0E+03 | 1,4E+04 | 1,3E+03 | 3,0E+03 |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-2: Densidade de Estreptococos Fecais (NMP/100mL) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|     |         |         |         |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mês | jan/99  | abr/99  | jun/99  | ago/99  | out/99  | dez/99  |
| EF  | 5,0E+02 | 1,7E+03 | 1,4E+02 | 2,3E+02 | 3,0E+03 | 3,0E+01 |
| Mês | fev/00  | abr/00  | jun/00  | ago/00  | out/00  | dez/00  |
| EF  | 2,3E+03 | 5,0E+00 | 1,3E+03 | 2,0E+00 | 2,2E+02 | 5,0E+01 |
| Mês | abr/01  | jun/01  | ago/01  | out/01  | fev/02  | abr/02  |
| EF  | 1,5E+01 | 2,2E+02 | 7,6E+01 | 1,2E+02 | 8,4E+01 | 8,4E+01 |
| Mês | jun/02  | ago/02  |         |         |         |         |
| EF  | 3,6E+03 | 1,3E+03 |         |         |         |         |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-3: Densidade de *Clostridium Perfringens* (NMP/100mL) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|     |         |         |         |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mês | jan/99  | abr/99  | jun/99  | ago/99  | out/99  | dez/99  |
| CP  | 2,8E+02 | 1,1E+02 | 1,1E+01 | 1,1E+02 | 5,0E+02 | 5,0E+02 |
| Mês | fev/00  | abr/00  | jun/00  | ago/00  | out/00  | dez/00  |
| CP  | 1,1E+02 | 1,7E+02 | 5,0E+01 | 3,4E+01 | 3,0E+02 | 5,0E+01 |
| Mês | abr/01  | jun/01  | ago/01  | out/01  | fev/02  | abr/02  |
| CP  | 4,7E+01 | 6,7E+01 | 1,0E+02 | 0,0E+00 | 4,0E+01 | 1,0E+02 |
| Mês | jun/02  | ago/02  |         |         |         |         |
| CP  | 3,3E+03 | 5,9E+01 |         |         |         |         |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-4: Densidade de *Cryptosporidium sp* (oocistos/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês    | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | Dez/99 |
| Crypto | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Mês    | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | Dez/00 |
| Crypto | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Mês    | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | fev/02 | Abr/02 |
| Crypto | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Mês    | jun/02 | ago/02 |        |        |        |        |
| Crypto | 0,3    | 0,0    |        |        |        |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-5: Densidade de *Giardia sp* (cistos/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|                |        |        |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês            | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| <i>Giardia</i> | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 13,0   | 0,0    |
| Mês            | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| <i>Giardia</i> | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,2    | 0,0    |
| Mês            | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | fev/02 | abr/02 |
| <i>Giardia</i> | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 1,7    |
| Mês            | jun/02 | ago/02 |        |        |        |        |
| <i>Giardia</i> | 1,4    | 0,0    |        |        |        |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002 e 2004a).

Tabela AII-6: Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|     |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês | jan/97 | fev/97 | mar/97 | abr/97 | mai/97 | jun/97 |
| NT  | 1,24   | 0,65   | 0,81   | 2,25   | 1,44   | 1,05   |
| Mês | jul/97 | ago/97 | set/97 | out/97 | nov/97 | dez/97 |
| NT  | 0,52   | 0,92   | 0,90   | 0,79   | 8,65   | 1,56   |
| Mês | jan/98 | fev/98 | mar/98 | abr/98 | mai/98 | jun/98 |
| NT  | 0,90   | 0,90   | 4,10   | 0,70   | 0,80   | 0,50   |
| Mês | jul/98 | ago/98 | set/98 | out/98 | nov/98 | dez/98 |
| NT  | 1,20   | 0,70   | 1,20   | 3,70   | 1,30   | 0,90   |
| Mês | jan/99 | fev/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 |
| NT  | 1,70   | 1,10   | 1,35   | 1,21   | 0,64   | 0,96   |
| Mês | dez/99 | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 |
| NT  | 0,77   | 2,31   | 0,43   | 0,31   | 0,40   | 0,94   |
| Mês | dez/00 | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 |
| NT  | 1,05   | 1,60   | 0,74   | 0,47   | 1,22   | 0,15   |
| Mês | dez/01 | fev/02 | abr/02 | jun/02 |        |        |
| NT  | 0,96   | 0,86   | 1,16   | 3,02   |        |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-7: Concentração de Ferro (mgFe/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Ferro | 1,26   | 0,93   | 0,67   | 1,09   | 0,40   | 0,39   |
| Mês   | jan/98 | fev/98 | mar/98 | abr/98 | mai/98 | jun/98 |
| Ferro | 0,39   | 0,63   | 4,55   | 0,24   | 0,68   | 0,41   |
| Mês   | jul/98 | ago/98 | set/98 | out/98 | nov/98 | dez/98 |
| Ferro | 0,39   | 0,38   | 0,49   | 4,58   | 0,40   | 0,35   |
| Mês   | jan/99 | fev/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 |
| Ferro | 7,50   | 0,55   | 0,54   | 0,51   | 0,52   | 4,22   |
| Mês   | dez/99 | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 |
| Ferro | 0,88   | 2,29   | 0,80   | 0,53   | 0,14   | 0,50   |
| Mês   | dez/00 | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 |
| Ferro | 0,35   | 0,63   | 0,40   | 0,58   | 0,55   | 0,53   |
| Mês   | dez/01 | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 |
| Ferro | 0,57   | 0,51   | 0,44   | 0,43   | 0,68   | 0,22   |
| Mês   | fev/03 | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |
| Ferro | 0,81   | 0,69   | 0,31   | 0,80   | 0,36   | 0,64   |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).



Tabela AII-8: Concentração de Cloreto (mg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|         |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês     | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Cloreto | 15,0   | 5,0    | 5,0    | 6,0    | 5,0    | 7,0    |
| Mês     | jan/98 | fev/98 | mar/98 | abr/98 | mai/98 | jun/98 |
| Cloreto | 3,5    | 2,5    | 1,0    | 3,5    | 1,0    | 1,8    |
| Mês     | jul/98 | ago/98 | set/98 | out/98 | nov/98 | dez/98 |
| Cloreto | 2,7    | 4,0    | 5,1    | 1,0    | 3,6    | 3,3    |
| Mês     | jan/99 | fev/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 |
| Cloreto | 1,0    | 4,9    | 3,0    | 3,4    | 5,1    | 1,7    |
| Mês     | dez/99 | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 |
| Cloreto | 2,6    | 2,9    | 3,2    | 4,2    | 18,1   | 4,6    |
| Mês     | dez/00 | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 |
| Cloreto | 3,6    | 3,4    | 7,3    | 4,3    | 0,5    | 9,3    |
| Mês     | dez/01 | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 |
| Cloreto | 5,5    | 3,5    | 6,6    | 8,1    | 12,2   | 0,7    |
| Mês     | fev/03 | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |
| Cloreto | 5,0    | 2,02   | 8,0    | 5,75   | 3,54   | 8,53   |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-9: Concentração de Alumínio (mgAl/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|          |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês      | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Alumínio | 0,20   | 2,62   | 0,61   | 0,24   | 0,33   | 0,22   |
| Mês      | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Alumínio | 5,44   | 0,36   | 0,22   | 0,33   | 2,50   | 1,14   |
| Mês      | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Alumínio | 0,92   | 0,91   | 0,01   | 1,30   | 0,10   | 0,10   |
| Mês      | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Alumínio | 0,29   | 0,14   | 0,17   | 0,16   | 0,25   | 0,14   |
| Mês      | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Alumínio | 0,34   | 0,26   | 1,12   | 0,15   | 0,56   | 0,15   |
| Mês      | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Alumínio | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-10: Concentração de Bário (mgBa/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Bário | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   |
| Mês   | jan/98 | set/98 | nov/98 | jan/99 | abr/99 | jun/99 |
| Bário | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,40   | 0,40   |
| Mês   | ago/99 | out/99 | dez/99 | fev/00 | abr/00 | jun/00 |
| Bário | 0,40   | 0,40   | 0,40   | 0,40   | 0,40   | 0,08   |
| Mês   | ago/00 | out/00 | dez/00 |        |        |        |
| Bário | 0,08   | 0,40   | 0,08   |        |        |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-11: Concentração de Cádmio (mgCd/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês    | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Cádmio | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| Mês    | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Cádmio | 0,001  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  |
| Mês    | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Cádmio | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,001  | 0,010  | 0,010  |
| Mês    | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Cádmio | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  |
| Mês    | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Cádmio | 0,010  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| Mês    | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Cádmio | 0,001  | 0,001  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,01   |
| Mês    | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Cádmio | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,01   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-12: Concentração de Chumbo (mgPb/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês    | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Chumbo | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   |
| Mês    | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Chumbo | 0,05   | 0,02   | 1,12   | 0,04   | 0,02   | 0,02   |
| Mês    | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Chumbo | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,02   |
| Mês    | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Chumbo | 0,02   | 0,02   | 0,09   | 0,02   | 0,02   | 0,02   |
| Mês    | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Chumbo | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,10   | 0,10   |
| Mês    | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Chumbo | 0,10   | 0,10   | 0,02   | 0,07   | 0,07   | 0,07   |
| Mês    | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Chumbo | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-13: Concentração de Cobre (mgCu/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Cobre | 0,010  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  |
| Mês   | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Cobre | 0,004  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  |
| Mês   | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Cobre | 0,020  | 0,020  | 0,010  | 0,020  | 0,040  | 0,020  |
| Mês   | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Cobre | 0,020  | 0,020  | 0,030  | 0,020  | 0,040  | 0,040  |
| Mês   | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Cobre | 0,020  | 0,004  | 0,006  | 0,004  | 0,004  | 0,004  |
| Mês   | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Cobre | 0,004  | 0,004  | 0,110  | 0,010  | 0,050  | 0,01   |
| Mês   | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Cobre | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-14: Concentração de Níquel (mgNi/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês    | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Níquel | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,020  |
| Mês    | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Níquel | 0,010  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  |
| Mês    | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Níquel | 0,020  | 0,040  | 0,040  | 0,050  | 0,020  | 0,020  |
| Mês    | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Níquel | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  | 0,020  |
| Mês    | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Níquel | 0,020  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,010  |
| Mês    | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Níquel | 0,010  | 0,010  | 0,020  | 0,030  | 0,030  | 0,030  |
| Mês    | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Níquel | 0,030  | 0,030  | 0,030  | 0,030  | 0,030  |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-15: Concentração de Mercúrio (mgHg/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|          |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês      | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Mercúrio | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| Mês      | jan/98 | mar/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 | jan/99 |
| Mercúrio | 0,0002 | 0,1000 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| Mês      | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 | fev/00 |
| Mercúrio | 0,0003 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0003 |
| Mês      | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 | fev/01 |
| Mercúrio | 0,0003 | 0,0003 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0010 |
| Mês      | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 | fev/02 |
| Mercúrio | 0,0010 | 0,0010 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Mês      | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 | abr/03 |
| Mercúrio | 0,0002 | 0,0001 | 0,0030 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 |
| Mês      | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |        |
| Mercúrio | 0,0016 | 0,0016 | 0,0010 | 0,0016 |        |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-16: Concentração de Zinco (mgZn/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Zinco | 0,01   | 0,01   | 0,23   | 0,01   | 0,01   | 0,02   |
| Mês   | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Zinco | 0,01   | 0,04   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,01   |
| Mês   | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Zinco | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,05   | 0,02   |
| Mês   | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Zinco | 0,14   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,02   |
| Mês   | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 |
| Zinco | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   |
| Mês   | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 | fev/03 |
| Zinco | 0,02   | 0,05   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,07   |
| Mês   | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |        |
| Zinco | 0,03   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-17: Concentração de Manganês (mgMn/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|          |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês      | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Manganês | 0,05   | 0,08   | 0,09   | 0,10   | 0,05   | 0,05   |
| Mês      | jan/98 | fev/98 | mar/98 | abr/98 | mai/98 | jun/98 |
| Manganês | 0,04   | 0,03   | 0,06   | 0,03   | 0,05   | 0,10   |
| Mês      | jul/98 | ago/98 | set/98 | out/98 | nov/98 | dez/98 |
| Manganês | 0,05   | 0,07   | 0,05   | 0,10   | 0,04   | 0,05   |
| Mês      | jan/99 | fev/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 |
| Manganês | 0,15   | 0,07   | 0,04   | 0,07   | 0,08   | 0,16   |
| Mês      | dez/99 | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 |
| Manganês | 0,06   | 0,16   | 0,04   | 0,07   | 0,08   | 0,10   |
| Mês      | dez/00 | fev/01 | abr/01 | jun/01 | ago/01 | out/01 |
| Manganês | 0,04   | 0,07   | 0,06   | 0,06   | 0,11   | 0,07   |
| Mês      | dez/01 | fev/02 | abr/02 | jun/02 | ago/02 | out/02 |
| Manganês | 0,09   | 0,05   | 0,08   | 0,06   | 0,12   | 0,05   |
| Mês      | fev/03 | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 | dez/03 |
| Manganês | 0,06   | 0,01   | 0,04   | 0,10   | 0,04   | 0,05   |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-18: Concentração de Cromo Total (mgCr/L) no Rio Cubatão ao longo do tempo.

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jan/97 | mar/97 | mai/97 | jul/97 | set/97 | nov/97 |
| Cromo | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   |
| Mês   | jan/98 | mar/98 | mai/98 | jul/98 | set/98 | nov/98 |
| Cromo | 0,05   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   |
| Mês   | jan/99 | abr/99 | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 |
| Cromo | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,02   |
| Mês   | fev/00 | abr/00 | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 |
| Cromo | 0,01   | 0,01   | 0,050  | 0,01   | 0,01   | 0,01   |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-19: Potencial de Formação de THM ( $\mu\text{g/L}$ ).

|       |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês   | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 | fev/00 | abr/00 |
| PFTHM | 136,0  | 139,0  | 405,0  | 125,0  | 164,0  | 164,0  |
| Mês   | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 | fev/01 | abr/01 |
| PFTHM | 56,6   | 68,1   | 70,9   | 102,0  | 329,0  | 108,0  |
| Mês   | jun/01 | ago/01 | out/01 | dez/01 | fev/02 | jun/02 |
| PFTHM | 109,0  | 54,5   | 163,0  | 80,5   | 262,0  | 90,2   |
| Mês   | ago/02 | fev/03 | jun/03 | ago/03 | dez/03 |        |
| PFTHM | 95,5   | 97,4   | 102,0  | 77,6   | 63,8   |        |

Fontes: CETESB (SÃO PAULO, 1997; 1998; 1999b; 2000; 2001a; 2002; 2004a).

Tabela AII-20: Resultados dos testes de toxicidade realizados no rio Cubatão. de 1998 a 2003.

|            |            |            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mês        | jan/98     | mar/98     | mai/98     | jul/98     | set/98     | nov/98     |
| Toxicidade | Não Tóxico | Crônico    | Crônico    | Não Tóxico | Crônico    | Crônico    |
| Mês        | jan/99     | abr/99     | ago/99     | out/99     | dez/99     | fev/00     |
| Toxicidade | Crônico    | Não Tóxico | Crônico    | Crônico    | Não Tóxico | Crônico    |
| Mês        | abr/00     | out/00     | dez/00     | fev/01     | abr/01     | jun/01     |
| Toxicidade | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Crônico    | Não Tóxico |
| Mês        | ago/01     | out/01     | dez/01     | fev/02     | abr/02     | jun/02     |
| Toxicidade | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Crônico    |
| Mês        | ago/02     | fev/03     | abr/03     | jun/03     | ago/03     | out/03     |
| Toxicidade | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico | Não Tóxico |
| Mês        | dez/03     |            |            |            |            |            |
| Toxicidade | Não Tóxico |            |            |            |            |            |

Fontes: CETESB (1997, 1998, 1999b, 2000, 2001a, 2002 e 2004a).

Tabela AII-21: Concentrações de Carbono Orgânico Dissolvido – COD (mg/L) medidas no rio Cubatão.

|     |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mês | jun/99 | ago/99 | out/99 | dez/99 | fev/00 | abr/00 |
| COD | 4,63   | 2,43   | 9,23   | 5,72   | 2,63   | 5,82   |
| Mês | jun/00 | ago/00 | out/00 | dez/00 | abr/01 | jun/01 |
| COD | 5,98   | 4,09   | 3,28   | 5,47   | 4,40   | 4,53   |
| Mês | ago/01 | out/01 | dez/01 | fev/02 | abr/02 | jun/02 |
| COD | 6,25   | 6,82   | 5,35   | 5,25   | 1,92   | 2,95   |
| Mês | ago/02 | fev/03 | abr/03 | jun/03 | ago/03 | out/03 |
| COD | 4,57   | 1,00   | 4,04   | 1,11   | 1,24   | 1,84   |
| Mês | dez/03 |        |        |        |        |        |
| COD | 1,36   |        |        |        |        |        |

Fontes: CETESB (1997, 1998, 1999b, 2000, 2001a, 2002 e 2004a).

**ANEXO III**  
**TABELAS – CARACTERIZAÇÃO DO LODO**

Tabela AIII-1: Caracterizações da massa bruta do lodo.

| Parâmetros                            | Unidade | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7     |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Arsênio                               | mg/Kg   | <3,25   | <1,00   | <1,00   | 1,87    | 4,33    | 20,70   | 5,57  |
| Bário                                 | mg/Kg   | 76,30   | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Berílio                               | mg/Kg   | <1,95   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00 |
| Cádmio                                | mg/Kg   | <1,10   | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Carbono Orgânico Total                | %(p/p)  | -       | 4,10    | 1,83    | 4,70    | 2,27    | 2,70    | 3,22  |
| Chumbo                                | mg/Kg   | <19,8   | 4,94    | 103,00  | 4,42    | 6,48    | 29,20   | 16,80 |
| Cianeto                               | mg/Kg   | <0,17   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00 |
| Cloretos                              | mg/Kg   | -       | 7,00    | 75,30   | 220,00  | 78,30   | 474,00  | 98,30 |
| Cloro Residual                        | mg/Kg   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | <0,5  |
| Cobre                                 | mg/Kg   | 16,00   | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Compostos Organo-Halogenados (hexano) | %       | -       | <0,05   | <0,05   | <0,05   | -       | <0,05   | -     |
| Cromo Hexavalente                     | mg/Kg   | 1,11    | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | -     |
| Cromo Total                           | mg/Kg   | <28,5   | 7,96    | 5,88    | 6,34    | 9,62    | 72,50   | 19,30 |
| Fenol                                 | mg/Kg   | <2,97   | <1,00   | <0,50   | <0,50   | <1,00   | <0,50   | <0,50 |
| Mercurio                              | mg/Kg   | <0,25   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00 |
| Níquel                                | mg/Kg   | <1,99   | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Oleos e Graxas                        | %       | 0,07    | 0,09    | 0,09    | <0,05   | <0,05   | 0,06    | <0,05 |
| Selênio                               | mg/Kg   | <7,75   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00   | <1,00 |
| Surfactantes                          | mg/Kg   | -       | 0,96    | 0,63    | 0,83    | <0,5    | 0,71    | 0,65  |
| Vanádio                               | mg/Kg   | <328    | 9,07    | 7,49    | 8,60    | 12,80   | 75,20   | 36,30 |
| Zinco                                 | mg/Kg   | 24,5    | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Hidrocarbonetos Líquidos/Bombeáveis   | %       | -       | <0,05   | <0,05   | <0,05   | <0,05   | <0,05   | -     |
| Ph                                    | UpH     | 7,9     | 7,1     | 7,4     | 7,8     | 6,5     | 7,2     | 7,8   |
| Umidade                               | %       | 80,12   | 84,40   | 84,60   | 80,30   | 74,8    | 77,8    | 17,30 |
| Líquidos Livres                       | mL/100g | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | -     |

Tabela AIII-2: Caracterizações de compostos orgânicos voláteis do lodo.

| Parâmetros               | 1<br>(mg/kg) | 2<br>(mg/kg) | 3<br>(mg/kg) | 4<br>(mg/kg) | 5<br>(mg/kg) | 6<br>(mg/kg) |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Clorometano              | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Cloreto de Vinila        | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Bromometano              | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.1-Dicloroeteno         | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Cloreto de metileno      | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Disulfeto de Carbono     | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Trans-1.2-Dicloroeteno   | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.1-Dicloroetano         | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 2-Butanona               | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Cis-1.2-Dicloroeteno     | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Clorofórmio              | 0,006        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.1.1-Tricloroetano      | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.2-Dicloroetano         | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Tetracloroeto de carbono | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Benzeno                  | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Tricloroeteno            | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.2-Dicloropropano       | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Bromodiclorometano       | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Cis-1.3-Dicloropropeno   | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Tolueno                  | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.1.2-Tricloroetano      | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Tetracloroeteno          | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Dibromoclorometano       | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Clorobenzeno             | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Etilbenzeno              | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| m.p-Xilenos              | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| o-Xileno                 | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Estireno                 | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| Bromofórmio              | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |
| 1.1.2.2-Tetracloroetano  | <0,005       | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,05        | <0,06        |

Tabela AIII-3: Caracterizações microbiológicas do lodo.

| Parâmetros                   | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Coliformes Totais<br>(NMP/g) | 372      | 37       | 7        | 4        | 3        | 2        |
| Coliformes Fecais<br>(NMP/g) | 10       | 1        | 3        | <1       | <1       | <1       |
| Giardia sp                   | Negativo | Negativo | Negativo | Negativo | Negativo | Negativo |
| Cryptosporidium sp           | Negativo | Negativo | Negativo | Negativo | Negativo | -        |



Tabela AIII-4: Testes de lixiviação do lodo – todas as análises.

| Parâmetros                  | V.M.P.<br>(mg/L) | 1<br>(mg/L) | 2<br>(mg/L) | 3<br>(mg/L) | 4<br>(mg/L) | 5<br>(mg/L) | 6<br>(mg/L) | 7<br>(mg/L) |
|-----------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Arsênio                     | 5,0              | <0,017      | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Bário                       | 100,0            | <0,10       | <0,1        | 0,60        | <0,10       | <0,10       | 0,18        | <0,1        |
| Cádmio                      | 0,5              | <0,005      | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Chumbo                      | 5,0              | <0,10       | <0,05       | 1,45        | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Cobre                       | -                | <0,01       | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Cromo Total                 | 5,0              | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Fluoreto                    | 150,0            | 0,84        | 0,90        | 0,72        | 1,48        | 1,71        | 0,52        | 0,40        |
| Mercúrio                    | 0,1              | <0,0005     | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Níquel                      | -                | <0,01       | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Prata                       | 5,0              | <0,005      | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Selênio                     | 1,0              | <0,02       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Vanádio                     | -                | <1,70       | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Zinco                       | -                | 0,05        | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Fenóis                      | -                | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      |
| Aldrin                      | 0,003            | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,003      |
| Clordano                    | 0,03             | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,03       |
| DDT                         | 0,1              | -           | <0,01       | <0,01       | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,1        |
| Dieldrin                    | 0,003            | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,003      |
| Endrin                      | 0,02             | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,02       |
| Epoxi –<br>Heptacloro       | 0,01             | -           | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,01       |
| Heptacloro                  | 0,01             | -           | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,01       |
| Hexaclorobenzeno            | 0,001            | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,001      |
| Lindano                     | 0,3              | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,3        |
| Metoxicloro                 | 3,0              | -           | <0,5        | <0,5        | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <3,0        |
| Pentaclorofenol             | 1,0              | -           | <0,5        | <0,5        | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <1,0        |
| Toxafeno                    | 0,5              | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,5        |
| 2,4 – D                     | 10,0             | -           | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <10,0       |
| 2,4,5 – T                   | 0,2              | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,2        |
| 2,4,5 – TP                  | 3,0              | -           | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <0,5        | <3,0        |
| Organofosf.<br>e Carbamatos | 10,0             | -           | <10,0       | <10,0       | <10,0       | <10,0       | <10,0       | <1,0        |

Tabela AIII-5: Testes de solubilização do lodo – todas as análises.

| Parâmetros               | V.M.P.<br>(mg/L)     | 1<br>(mg/L) | 2<br>(mg/L) | 3<br>(mg/L) | 4<br>(mg/L) | 5<br>(mg/L) | 6<br>(mg/L) | 7<br>(mg/L) |
|--------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alumínio                 | 0,20                 | <0,20       | <0,05       | 0,14        | 1,06        | 1,03        | <0,05       | 0,05        |
| Arsênio                  | 0,05                 | 0,021       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Bário                    | 1,00                 | <0,05       | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        |
| Berílio                  | -                    | -           | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,05       |
| Cádmio                   | 0,005                | <0,002      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      | <0,005      |
| Chumbo                   | 0,05                 | <0,05       | <0,05       | 0,42        | <0,05       | 0,21        | <0,05       | <0,05       |
| Cianeto                  | 0,10                 | <0,007      | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        |
| Cloreto                  | 250,00               | 18,00       | <5,0        | 14,80       | 140,00      | 11,80       | 265,00      | 24,60       |
| Cobre                    | 1,00                 | <0,005      | 0,08        | 0,05        | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Cromo Total              | 0,05                 | <0,02       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | 0,05        | <0,05       | <0,05       |
| Dureza Total             | 500,00               | 135,00      | 45,00       | 87,80       | 60,60       | 90,40       | 74,00       | 160,00      |
| Fenol                    | 0,001                | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      |
| Ferro                    | 0,30                 | <0,03       | 0,40        | 0,45        | 0,65        | 2,59        | 0,60        | <0,05       |
| Fluoreto                 | 1,50                 | 2,60        | 0,37        | 1,60        | 1,47        | 0,62        | 1,00        | 0,58        |
| Manganês                 | 0,10                 | 0,07        | 0,05        | <0,05       | <0,05       | 0,12        | <0,05       | 0,07        |
| Mercúrio                 | 0,001                | <0,0005     | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      |
| Níquel                   | -                    | <0,005      | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Nitrato                  | 10,00                | 0,10        | <0,1        | <0,1        | 0,21        | 0,13        | <0,1        | 24,70       |
| Prata                    | 0,05                 | <0,002      | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       | <0,05       |
| Selênio                  | 0,01                 | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       |
| Sódio                    | 200,00               | 6,50        | 3,36        | 1,13        | 3,82        | 3,6         | 63,9        | 8,52        |
| Sulfato                  | 400,00               | 4,00        | <5,0        | <5,0        | <5,0        | 24,0        | <5,0        | 50,9        |
| Surfactantes             | 0,20                 | <0,04       | 0,12        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | 0,14        | 0,23        |
| Vanádio                  | -                    | <0,85       | -           | -           | -           | -           | -           | <0,05       |
| Zinco                    | 5,00                 | 0,02        | <0,05       | 0,11        | <0,05       | 0,22        | <0,05       | <0,05       |
| Aldrin                   | -                    | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,00003    |
| Clordano                 | $3,0 \times 10^{-4}$ | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0003     |
| DDT                      | $1,0 \times 10^{-3}$ | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      |
| Dieldrin                 | $3,0 \times 10^{-5}$ | -           | <0,00003    | <0,00003    | <0,00003    | <0,00003    | <0,00003    | <0,00003    |
| Endrin                   | $2,0 \times 10^{-4}$ | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0002     |
| Epoxi Heptacloro         | $1,0 \times 10^{-4}$ | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     |
| Heptacloro               | $1,0 \times 10^{-4}$ | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     |
| Hexaclorobenzeno         | $1,0 \times 10^{-5}$ | -           | <0,00001    | <0,00001    | <0,00001    | <0,00001    | <0,00001    | <0,00001    |
| Lindano                  | $3,0 \times 10^{-3}$ | -           | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,0001     | <0,003      |
| Metoxicloro              | 0,03                 | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,03       |
| Pentaclorofenol          | 0,01                 | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       |
| Toxafeno                 | $5,0 \times 10^{-3}$ | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,005      |
| 2,4 – D                  | 0,1                  | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,1        |
| 2,4,5 – T                | $2,0 \times 10^{-3}$ | -           | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,001      | <0,002      |
| 2,4,5 – TP               | 0,03                 | -           | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,01       | <0,03       |
| Organofosf. e Carbamatos | 0,1                  | -           | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        | <0,1        |

**ANEXO IV**  
**TABELAS E FIGURAS – DIFRATOMETRIA**

Tabela AIV-1: Fases cristalinas mais freqüentes no lodo – diversas caracterizações.

| Composto  | Lodo 1 | Lodo 2 | Lodo 3 | Lodo 4 | Lodo 5 | Lodo 6 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Quartzo   | X      | X      | X      | X      | X      | X      |
| Goethita  | X      | X      | X      | X      | X      |        |
| Hematita  |        |        |        |        |        | X      |
| Caulinita | X      | X      | X      | X      | X      | X      |
| Muscovita | X      | X      | X      | X      | X      |        |
| Ilita     |        |        |        |        |        | X      |
| Calcita   | X      | X      | X      |        | X      | X      |

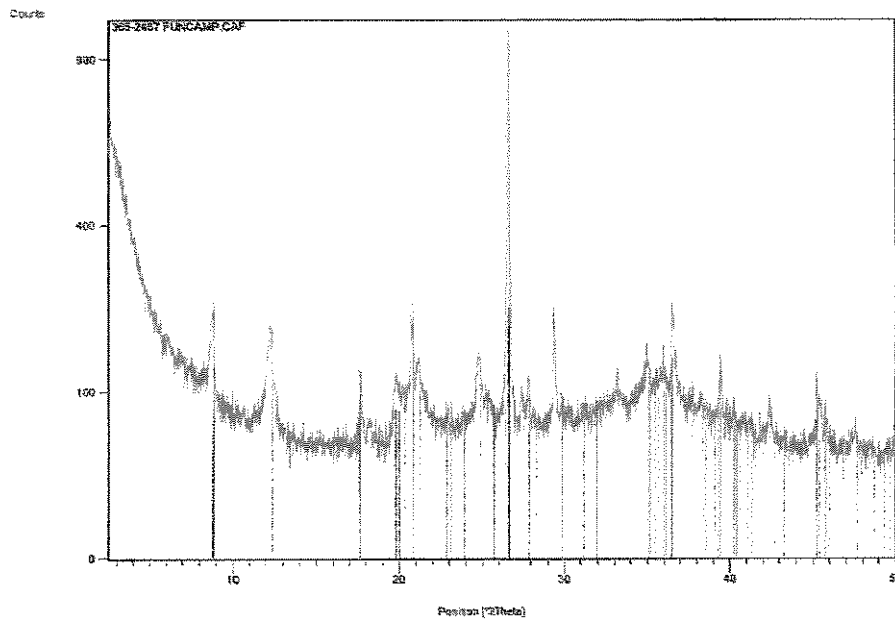


Figura AIV-1 – Difratoograma típico para o lodo da ETA Cubatão.

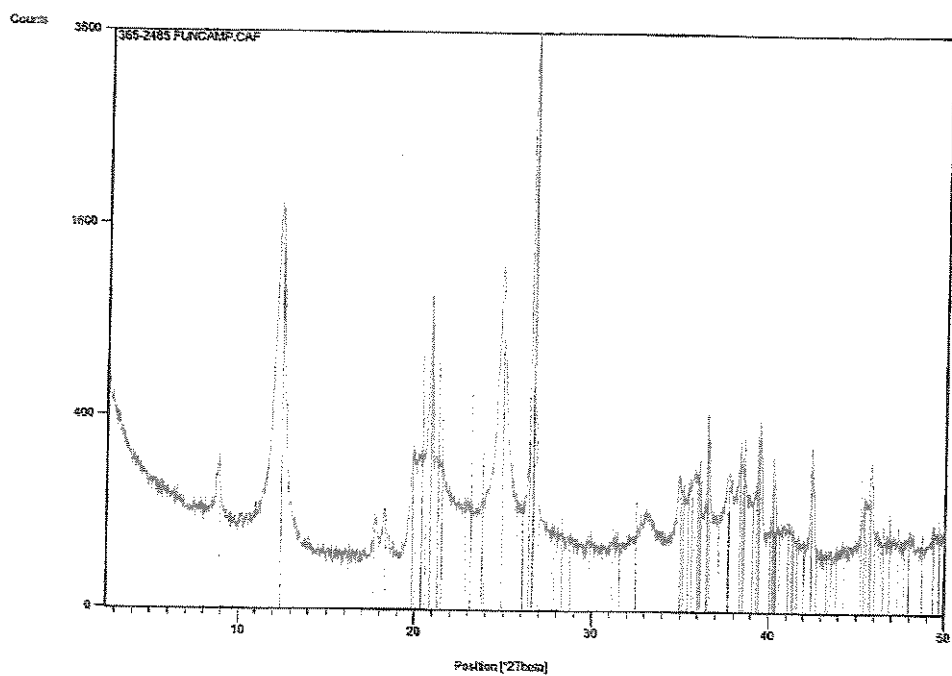


Figura AIV-2 – Difratoograma do saibro.

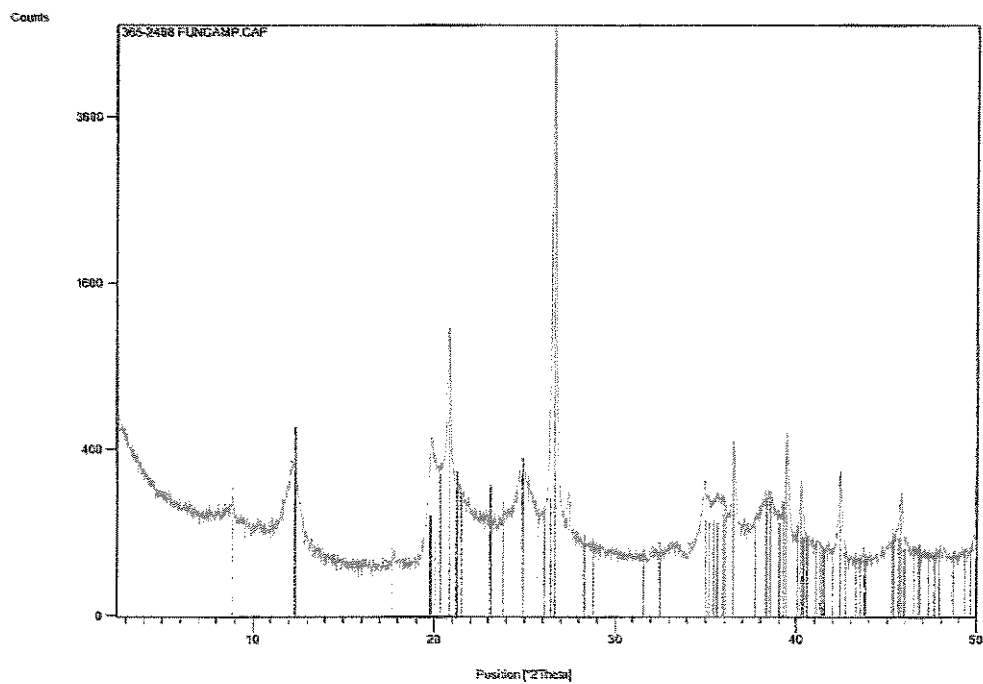


Figura AIV-3 – Difratoograma da argila amarela.

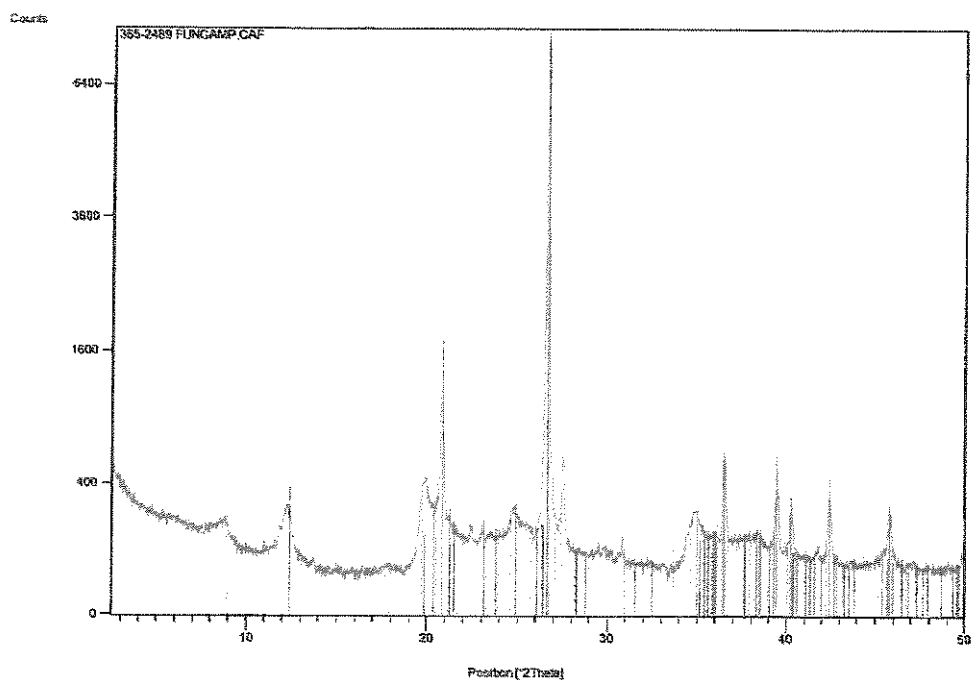


Figura AIV-4 – Difratoograma da argila verde escuro.

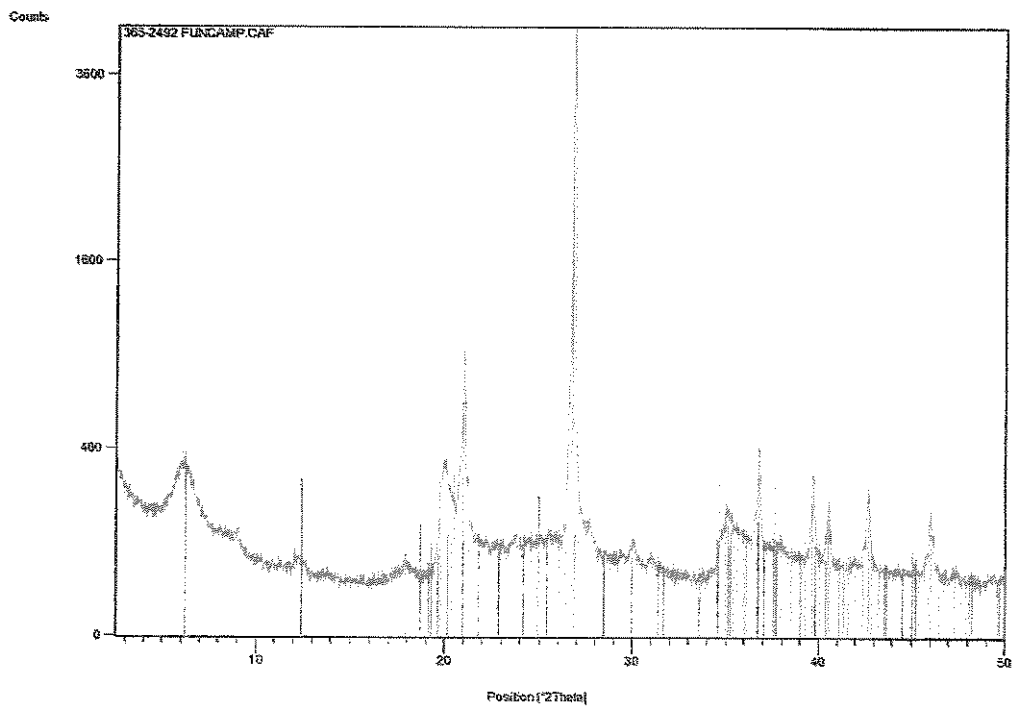


Figura AIV-5 – Difratoograma do taguá.

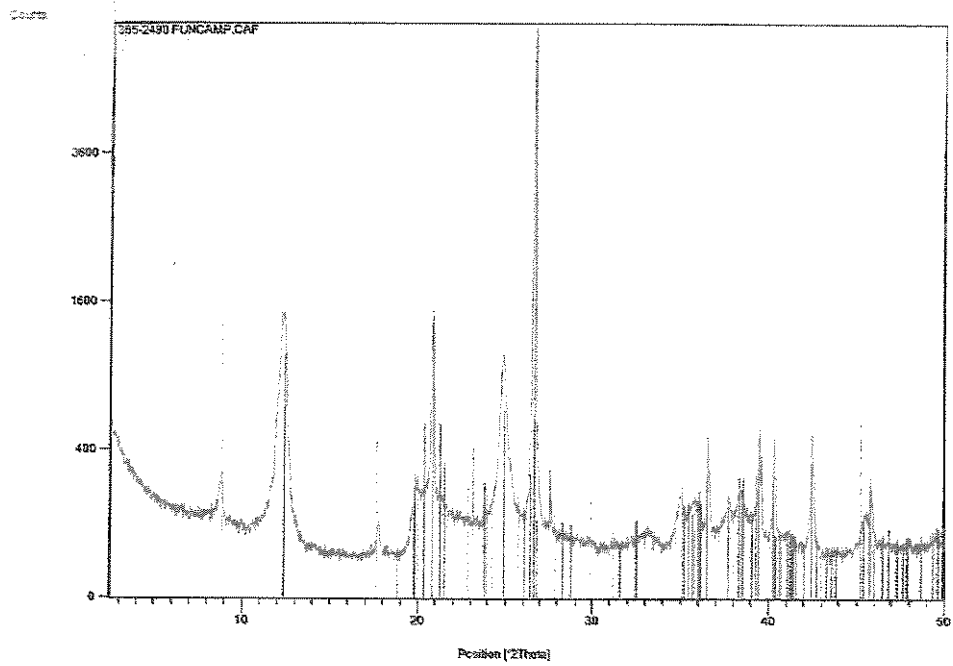


Figura AIV-6 – Difratoograma da mistura argilas jazida.

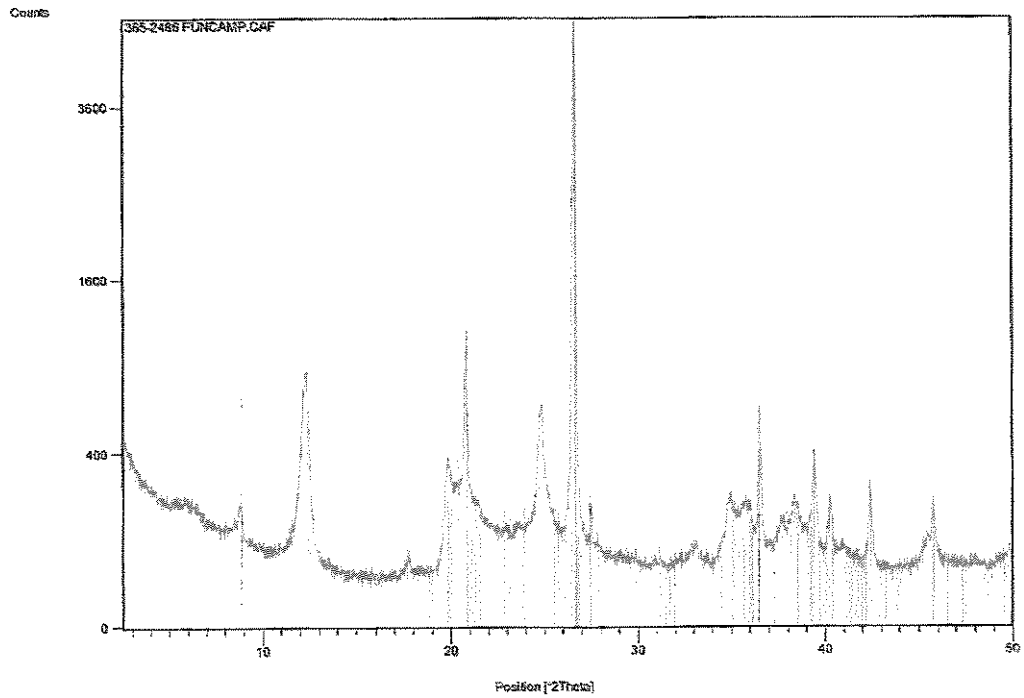


Figura AIV-7 – Difratoograma da mistura argilas teste.

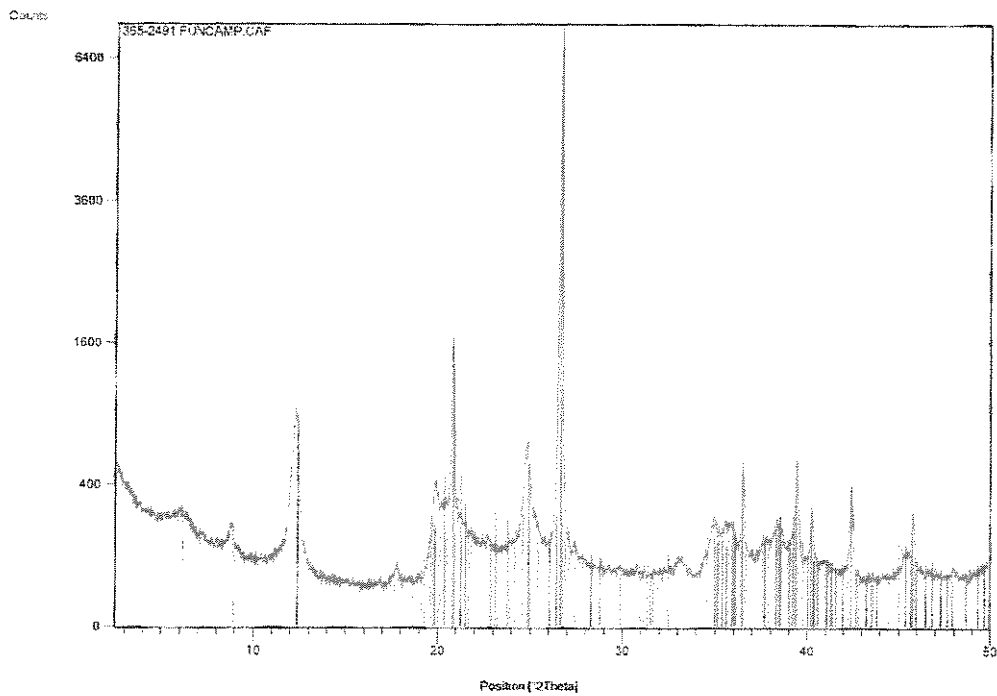


Figura AIV-8 – Difratoograma da mistura argilas pátio.

## ANEXO V

### ENTREVISTAS – PESQUISADORES CONSULTADOS E RESPOSTAS

Tabela AV-1: Especialistas Consultados.

|   |                            |          |  |                         |             |
|---|----------------------------|----------|--|-------------------------|-------------|
| 1   | Alcides Lopes Leao         | UNESP    | 29   | Jurandyr Povinelli      | EESCar –USP |
| 2   | Américo A. F. S. Kerr      | USP      | 30   | Kurt Strecker           | FAENQUIL    |
| 3   | André Henrique Rosa        | UNESP    | 31   | Lúcio Flávio F. Lima    | CETESB      |
| 4   | Antenor R. Barbosa Jr      | UFOP     | 32   | Mara Lemos              | CETESB      |
| 5   | Aristides A. Rocha         | USP      | 33   | Marco Antonio P. Reali  | EESCar –USP |
| 6   | Arlindo Philippi Jr        | USP      | 34   | Maria Cecília Pires     | CETESB      |
| 7   | Bernardo A. do N. Teixeira | UFSCAR   | 35   | Mario Kato              | UFPE        |
| 8   | Carlos Augusto Chernicharo | UFMG     | 36   | Milton Norio Sogabe     | CETESB      |
| 9   | Carlos Celso do A. e Silva | USP      | 37   | Mônica Maria Diniz Leão | UFMG        |
| 10  | Carlos Komatsu             | CETESB   | 38   | Pedro Além Sobrinho     | USP         |
| 11  | Celso Luiz da Silva        | UNESP    | 39   | Pedro Sérgio Fadini     | PUCCAMP     |
| 12  | Cláudio Alonso             | CETESB   | 40   | Pérsio de S. Santos     | USP         |
| 13  | Daltro Pinatti             | FAENQUIL | 41   | Regis Nieto             | CETESB      |
| 14  | Dorothy Casarini           | CETESB   | 42   | Ricardo Cesar Hirata    | USP         |
| 15  | Eglé                       | UNICAMP  | 43   | Richard Hiroshi         | CETESB      |
| 16  | Francisco Suetonio Mota    | UFC      | 44   | Rodrigo Cesar Cunha     | CETESB      |
| 17  | Geraldo Lippel             | UFRJ     | 45   | Rubens Bresaola Jr      | UNICAMP     |
| 18  | Hamilton Targa             | USP      | 46   | Sandra Cesário da Silva | UEL         |
| 19  | Hugo M. Soares             | UFSC     | 47   | Sérgio João de Luca     | UFRGS       |
| 20  | Ivanildo Hespanhol         | USP      | 48   | Silvana Moreira         | UNICAMP     |
| 21  | João Vicente de Assunção   | USP      | 49   | Teresa Paiva            | FAENQUIL    |
| 22  | Jorge Akutsu               | UNESP    | 50   | Urivald Pawlowsky       | UFP         |
| 23  | Jorge Macedo               | UFJF     | 51   | Valter Lúcio de Pádua   | UFMG        |
| 24  | José Carlos de M. Xavier   | CETESB   | 52   | Vanderley Moacyr John   | USP         |
| 25  | José Roberto Campos        | USP - SC | 53   | Wanda Maria R. Gunther  | USP         |
| 26  | José Roberto Guimarães     | UNICAMP  | 54   | Wilfrid Keller          | UFMG        |
| 27  | José Sérgio Cordeiro       | UFSCAR   | 55   | Wilson de F. Jardim     | UNICAMP     |
| 28  | José Yvan Pereira Leite    | CEFET-RN |  |                         |             |
| LEGENDA   |                            |          |  |                         |             |
| UNESP - Universidade Estadual Paulista  |                            |          | CEFET - RN - Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte |                         |             |
| USP - Universidade de São Paulo   |                            |          | UFPE - Universidade Federal de Pernambuco                                  |                         |             |
| UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto                                     |                            |          | PUCCAMP - Pontifícia Universidade Católica de Campinas                     |                         |             |
| UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos                                   |                            |          | UEL - Universidade Estadual de Londrina                                    |                         |             |
| UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais                                   |                            |          | UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul                          |                         |             |
| CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental                      |                            |          | FAENQUIL - Faculdade de Engenharia Química de Lorena                       |                         |             |
| UNICAMP - Univesidade Estadual de Campinas                                    |                            |          | UFP - Universidade Fernando Pessoa   |                         |             |
| UFC - Universidade Federal do Ceará   |                            |          |  |                         |             |
| UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro                                 |                            |          |  |                         |             |
| UFSC - Unicersidade Federal de Santa Catarina                                 |                            |          |  |                         |             |
| UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora                                   |                            |          |  |                         |             |
| EESCar - USP - Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos |                            |          |  |                         |             |



## **Respostas Obtidas**

### **1) João Vicente de Assunção:**

A princípio tenho preocupação quanto a possível emissão de dioxinas e furanos no forno, pela presença de cloro no lodo, mas não tenho certeza desta emissão, pois o material está solidificado não? Seria o caso de analisar a situação e medir se for o caso.

### **2) Wilson de Figueiredo Jardim:**

Analisando os dados que você me enviou, e assumindo que este alumino-silicato será usado como builder na indústria de material cerâmico, acho que a priori, não há impactos adicionais, exceto se o mesmo alterar a qualidade do produto final, conferindo menor resistência mecânica, lixiviação, etc. Melhor do que a disposição final hoje em prática esta alternativa certamente é.

Por que você não faz uma análise do ciclo de vida deste produto frente a duas opções de destinação final?

### **3) Celso Luiz da Silva:**

Sobre o solicitado tenho a informar que não trabalho diretamente com o assunto em questão, motivo pelo qual não poderia analisar em detalhes sua proposta de pesquisa. De qualquer forma entendo que o assunto é de grande importância, tendo em vista as quantidades gigantescas crescentes que são geradas nas estações de tratamento.

Talvez você devesse dar certa atenção para os voláteis gerados nas etapas de secagem e queima do material cerâmico.

### **4) Carlos Komatsu:**

Minha especialidade é de poluição atmosférica, portanto na minha visão é necessário avaliar quais seriam os impactos na emissão dos poluentes atmosféricos com a inserção do lodo na

massa. Os dados que acompanharam a sua mensagem não mostram a possível influência desse resíduo nas emissões atmosféricas usuais dessa indústria. Todos os processos que envolvem combustão e incorporação de resíduos é necessário que se realize um "teste em branco" e um "teste de queima" onde é avaliado o desempenho do forno antes e depois da incorporação. Neste teste são avaliados os resíduos, as matérias-primas, as condições operacionais e os poluentes emitidos, desde a manipulação do resíduo até a sua incorporação. Assim é possível verificar se há algum benefício ambiental do ponto de vista da poluição atmosférica.

Outro enfoque que pode ser dado é comparar o que é feito atualmente com este resíduo com a incorporação na cerâmica.

#### **5) Milton Norio Sogabe:**

O processo mais próximo do que você pretende avaliar seria o co-processamento de resíduos em fornos de cimento, naturalmente os dois processos são bem diferentes mas os princípios norteadores poderiam ser os mesmos. Os dois princípios básicos seriam o do ganho de energia (recuperação energética) ou da substituição de matéria prima. Acho que no seu caso, a segunda encaixa melhor. Assim anexo segue a Norma CETESB para avaliação de impacto para queima de resíduos em fornos de clínquer que acho poderá dar uma primeira idéia.

Alguns aspectos poderiam ser discutidos quanto a cenários para avaliação de risco, mas isto poderia ser feita um pouco mais pra frente.

#### **6) Américo A. F. S. Kerr:**

O ideal seria que se fizesse uma avaliação experimental quantitativa dos impactos do processo que você está propondo. No caso da poluição do ar, área em que trabalho, isso significaria controlar a composição da exaustão no processo de queima desta cerâmica, onde podem escapar, por exemplo, alguns dos componentes tóxicos cuja presença você identificou no lodo (e.g. Arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio). A partir disso, seria possível estimar a carga que seria lançada na atmosfera em um processo contínuo de produção.

Veja, contudo, que apenas isso ainda não ofereceria uma estimativa das concentrações que seriam observadas no entorno de uma eventual planta de produção. Para tanto ainda seria necessário

empregar algum modelo de dispersão que considerasse essa emissão ocorrendo no cenário espacial e meteorológico (especialmente intensidade, direção do vento e nível de turbulência) da região onde a planta seria instalada.

Mas acho que você poderia fazer algumas estimativas teóricas de emissões, ao menos para alguns destes componentes, considerando a quantidade de lodo que entra na composição de cada peça cerâmica típica, uma taxa aceitável de produção de peças e, no caso do mercúrio (e orgânicos voláteis, por exemplo, considerar que todo ele volatiliza-se para a atmosfera).

Poderia, também, indicar o que ocorreria com chumbo e cádmio, a partir da temperatura de queima das peças, no confronto com suas temperaturas de evaporação. A USA/EPA costuma ter referências de taxas de emissão típicas para diferentes processos produtivos e você poderia fazer comparações com suas estimativas.

Além desta relação com emissões atmosféricas, seria o caso, ainda de avaliar problemas que possam vir a estar associados com eventuais processos de erosão ou de lixiviação, tanto durante a armazenagem da matéria prima, quanto durante o uso das peças cerâmicas, particularmente se expostas a intempérie (telhas, tijolos etc).

#### **7) Gabriela – respondeu por Maria Cecília Pires:**

Avaliei o material e aqui estão algumas considerações sobre o questionamento.

Para estabelecer os impactos ambientais, alguns autores sugerem a avaliação de aspectos como:

- matérias-primas: consumo de recursos materiais não renováveis;
- poluição: liberação de substâncias tóxicas para o ambiente;
- resíduos: geração de resíduos não tratados;
- capacidade de reutilização: possibilidade de reutilização do produto.

Deve-se considerar o risco da incorporação de resíduos em contaminar o meio ambiente pelo espalhamento e diluição dos contaminantes, que pode se dar pela lixiviação dos contaminantes e subsequente contaminação da água. Segundo alguns autores, o espalhamento e diluição de contaminantes dentro de materiais de construção civil não são, em si, um problema durante a fase de uso dos materiais, mas ao final da vida útil será gerado um volume de resíduo de demolição

superior ao original e mais contaminado que os resíduos de construção tradicionais. Em certas situações, a incorporação de resíduos somente é viável do ponto de vista ambiental se a destinação futura de resíduos de construção for controlada.

Deve-se considerar também a possibilidade de formação de substâncias tóxicas durante a queima do resíduo e os cuidados necessários para o manuseio deste resíduo pelos trabalhadores.

Desta maneira, faz-se necessário uma caracterização do resíduo considerando os aspectos ambientais. Diante disto, na avaliação de projetos de incorporação de lodo de estação de tratamento de água na fabricação de tijolos cerâmicos tem sido solicitada a caracterização do resíduo para os seguintes parâmetros:

- no solubilizado: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianeto, cromo total, fenol, fluoreto, mercúrio, nitrato, prata, selênio, aldrin, clordano, DDT, dieldrin, endrin, epóxi-heptacloro, heptacloro, hexaclorobenzeno, lindano, metoxicloro, pentaclorofenol, toxafeno, 2,4-D, 2,4,5-T, 2,4,5-TP alumínio, cloreto, cobre, dureza, ferro, manganês, sódio, surfactantes, sulfato e zinco;

- no lixiviado: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo total, fluoreto, mercúrio, prata, selênio, aldrin, clordano, DDT, dieldrin, endrin, epóxi-heptacloro, heptacloro, hexaclorobenzeno, lindano, metoxicloro, pentaclorofenol, toxafeno, 2,4-D, 2,4,5-T e 2,4,5-TP;

- na massa bruta: berílio, cromo VI, mercúrio, selênio, arsênio, chumbo, vanádio, cianetos, fenóis, hidrocarbonetos líquidos ou bombeáveis a 80°C, aldrin, clordano, DDT, dieldrin, endrin, epóxi-heptacloro, heptacloro, hexaclorobenzeno, lindano, metoxicloro, pentaclorofenol, toxafeno, 2,4-D, 2,4,5-T, 2,4,5-TP, benzeno, benzo(a)pireno, cloreto de vinila, clorobenzeno, clorofórmio, cresol total, 1,4-diclorobenzeno, 1,2-dicloroetano, 1,1-dicloroetileno, 2,4-dinitrotolueno, hexaclorobutadieno, hexacloroetano, metiletilcetona, nitrobenzeno, piridina, tetracloreto de carbono, tetracloroetileno, tricloroetileno, 2,4,5-triclorofenol e 2,4,6-triclorofenol.

Deve-se salientar, entretanto, que estes parâmetros foram selecionados considerando a NBR 10004/1987. Entretanto, estamos num período de transição e a NBR 10004/2004 passa a ser válida a partir de 30.11.2004.

### **8) Pedro Além Sobrinho:**

Destacou os seguintes itens:

- deve-se caracterizar o carvão, vez que não se sabe a origem deste material na maioria das empresas. Ele pode causar alterações na produção que podem atrapalhar a avaliação da atuação do lodo levando a rejeição do uso deste resíduo;
- acredita, de modo geral, que nenhum parâmetro vá causar poluição devido as baixas concentrações apresentadas no ensaio de massa bruta;
- deve-se analisar possíveis alterações na resistência dos blocos;
- para garantir a segurança é necessário avaliar lixiviação e solubilização do lodo.

### **9) Rubens Bresaola Júnior:**

Considerou todas as concentrações muito baixas para causar impactos significativos mas destacou como importantes os seguintes itens:

- problema da chuva sobre o lodo (maior foco de poluição): neste item são problemáticos os parâmetros: chumbo, cádmio, cianetos, compostos organo-halogenados, cromo, fenol. Deve-se evitar que estes elementos atinjam a água subterrânea ou escoem atingindo corpos d'água. Sugere avaliação de lixiviação e solubilização e que, de preferência, o lodo seja disposto no pátio em área coberta ou impermeabilizada;
- sugere espectrometria para avaliar o bloco pós-uso (lixiviação);
- Compostos orgânicos voláteis: avaliar volatilização no pátio, na secagem e na queima (tentar avaliar odores produzidos – cheiro de óleo, volume de ar, ocupação da área). Pode afetar a saúde do operário ou ser carregado pela chuva voltando aos rios;
- quantidade de coliformes apresentada é muito baixa para causar impactos à água subterrânea.

### **10) Geraldo Lippel:**

Examinei o fluxograma e as tabelas com as características dos materiais. Você me pergunta sobre possíveis impactos ambientais decorrentes da incorporação de lodo ao material cerâmico.

Não vejo, em princípio, nenhum impacto negativo do ponto de vista ambiental, desde que o lodo não contenha metais pesados facilmente ou moderadamente lixiviáveis. Da composição fornecida numa das tabelas (entendo ser a composição do produto final) não observei nenhum metal que cause preocupação. O teor de alumínio é relativamente elevado, mas penso que ele está presente numa forma estável.

Ensaio de lixiviação são importantes para confirmar a estabilidade dos metais na matriz formada. Não vejo problemas de contaminação microbiológica, visto que o material vai para fornos, que operam a alta temperatura.

Os impactos mais graves podem ser na qualidade do produto e, na percepção do público, que às vezes não vê com bons olhos o uso de material parcialmente reciclado.

#### **11) Sandra Cesário:**

Penso que através da análise microbiológica, seria importante observar o aspecto da segurança do trabalho ( higiene, transporte, armazenamento, contaminação de quem manipula ou está no local). Depois, com o processo este problema estaria resolvido (altas temperaturas).

No tocante às fases cristalinas, seria interessante poder fazer um balanço do quanto poderia estar economizando de minerais pela produção de 1000 tijolos, por exemplo. Isto seria interessante após vc saber o qto de lodo estaria adicionando nesta produção sem comprometer as características do produto ( durabilidade, absorção, resistência etc).

Este seria um impacto positivo importante.

Quanto a análise semiquantitativa não vi avaliação de Cd (importante devido alta toxicidade). Penso que para avaliação do impacto seria importante consultar as normas relativas a materiais cerâmicos para ver se existe um limite estabelecido. Além disso, já tem trabalhos realizados sobre solubilidade destes metais quando incorporados, porém não conheço.

Penso que a preocupação maior (ambiental) seria no tocante aos metais. Seria muito importante é avaliar alguns materiais cerâmicos desta indústria, sem a adição de lodo para ver o nível que têm e depois analisar os que foram incorporados.

Pode ser que para garantir as características do material não seja possível adicionar grande quantidade de lodo e isto não venha a refletir num impacto ambiental negativo.

Na verdade este trabalho abre uma série de outros, como por exemplo:

- avaliar até a que distância seria viável o transporte deste material.
- avaliar a disponibilidade de lodo versus produção de material cerâmico (não pode faltar)
- como alguns metais têm variação significativa, não sei se não influenciará nas características técnicas do produto final, ou até mesmo na produção.

### **12) Urivald Pawlowsky:**

Acredito que deverão ser aplicados os testes de lixiviação e solubilização previstos nas normas da ABNT.

### **13) Ricardo Hirata:**

O lodo deve ter contaminantes como nutrientes, metais ou mesmo alguns orgânicos. Isso deveria ser analisado e quando da incorporação, ver o que acontece com eles, através de uma extração seqüencial. Note que telhas e tijolos podem ficar expostos e perderem parte do material por abrasão ou por lixiviação. Isso acontecendo os contaminantes serão liberados?

A minha preocupação recai sobre os metais, pois os outros eu creio que se perdem pela queima. Quanto a queima ver se não existe presença de vapores tóxicos.

Os metais devem ser cuidadosamente analisados, sobretudo na material final. Há alguns metais tóxicos. A questão é se eles continuam imobilizados depois do tratamento. É isso que eu acho que a sua tese vai tratar. Uma extração e um teste forte de lixiviação seriam os métodos para tal teste em suas amostras depois da queima.

#### **14) Alcides Lopes Leão:**

Posso te dizer que o problema nesse caso é o enxofre e os metais tóxicos. Fiz um trabalho recentemente com lodo onde o problema era alumínio. Dessa forma, veja os limites permitidos por lei.

#### **15) Kurt Strecker:**

Gostaria de fazer alguns comentários a respeito da sua proposta:

- um aspecto muito importante, com conseqüências para o meio ambiente, é a composição química e mineralógica do lodo que pretende usar. Ele contém substâncias tóxicas (exemplo metais pesados), em que quantidade e em que forma (óxido, fosfato, nitrato, etc.)? Se houver, esses serão liberados, principalmente durante a queima da cerâmica?
- a composição do lodo influencia bastante também no processo da queima da cerâmica. Nesse contexto o importante é o teor de óxidos alcalinos e alcalinos-terrosos, que poderiam agir como fundentes, isto é causar a formação de uma fase líquida em temperaturas relativamente baixas. Importa também a quantidade de lodo na composição da cerâmica.
- Não ficou claro qual seria o produto cerâmica pretendida, piso, azulejo, telhas e outras. Dependendo da finalidade as exigências ao material variam e devem ser consideradas. No seu fluxograma há uma separação do produto após queima em diferentes qualidades. Isso me leva a acreditar que você não espera um produto uniforme. A separação com certeza seria improdutivo. Recomendaria obter um produto de menor ou melhor qualidade, que dependendo suas propriedades tenha uma aplicação específica.
- a respeito da distribuição granulométrica do lodo gostaria de dizer que as partículas são extremamente finas. 50% são menores do que 0,01 micrometro. Não estou acostumado trabalhar com esse tipo de material, mas peço você em verificar a distribuição, talvez refazê-la em outra instituição e compará-la com dados de literatura.



#### **16) Hamilton J. Targa:**

Quanto à proposta que você menciona, eu fiquei confuso com sua preocupação sobre o impacto ambiental do uso do lodo na indústria de cerâmica. Considerando a composição do lodo que me enviou não vejo nenhum elemento químico que representa algum perigo à saúde pública. Mesmo com o aquecimento necessário para a produção de cerâmica não será possível emitir algum produto que esteja na lista das substâncias perigosas aos seres humanos. Se fosse o caso de utilizar lodo de ETE então teriam de ser tomadas algumas cautelas.

Assim, não consigo vislumbrar impacto ambiental do uso de tal lodo. Não me lembro de nenhuma pendência na CETESB sobre este tema. O que se discute o uso de certos componentes dos esmaltes para a indústria de cerâmica que são considerados poluentes ambientais, e, portanto, tem seu uso restrito. Este não me parece ser o caso do lodo de ETA.

No momento estas são as minhas observações sobre o tema.

#### **17) Wilfrid Keller Schwabe:**

Não vejo nenhum inconveniente ou impacto ambiental negativo no uso do lodo de Estação de Tratamento de Água em cerâmica. A presença de metais pesados – quando houverem, e no geral é pequena, o que vem garantindo a classificação do lodo como não-inerte ou não-perigoso (II), porém, cada lodo é um caso a parte – será incorporada e imobilizada no material cerâmico.

Quanto à presença de patógenos, uma vez que poderá sofrer contato manual, peço que consulte algum biólogo quanto aos riscos de contaminação.

A utilização de carvão mineral deve produzir um efluente atmosférico contendo SO<sub>2</sub> e, eventualmente, fenóis. A caracterização desses efluentes é necessária para se confirmar sua concentração e necessidade de tratamento.

Estamos estudando o lodo da ETA de uma empresa de celulose, CENIBRA, e sua composição é similar à de vocês. Não encontramos apenas o CaCO<sub>3</sub>.

### **18) Daltro Garcia Pinatti:**

Ressalto os seguintes pontos:

- 1) A estabilização de lodos contaminados exige queima acima de 1150°C para que se alcance vitrificação completa. Em blocos cerâmicos queimados a 900°C as vitrificações são parciais, os contaminantes do lodo não serão estabilizados e o bloco cerâmica não atenderá as normas de lixiviação e solubilização. Honestamente você ainda não tem um tópico de tese.
- 2) O entendimento deste assunto exige completo conhecimento dos diagramas de multi-fases em geral considerados apenas parcialmente pelos ceramistas, engenheiros e pesquisadores de cerâmicas tradicionais.
- 3) Há uma enormidade de trabalhos já feitos neste assunto de modo convencional. A maioria deles resulta em redução da resistência mecânica. Mesmo que haja aumento da resistência, os critérios de lixiviação e solubilização não serão alcançados em queimas abaixo de 1150°C.
- 4) Não há pesquisa ou tecnologia que possa ter sucesso ignorando-se os fundamentos básicos dos diagramas de fase dos materiais.

### **19) Marco A. P. Reali**

No que se refere a possíveis impactos ambientais da incorporação de lodo de ETA no processo produtivo de uma indústria cerâmica, acredito que você deve se preocupar, dentre outros, também com os seguintes aspectos:

- análise referente à lixiviação e solubilização do material cerâmico produzido a partir da mistura de lodo de ETA à matéria prima original. Para isso, creio que deva ser avaliada a influência da relação "massa seca de lodo adicionada/ massa seca de matéria prima original" na qualidade do produto final (quanto à sua finalidade de uso e quanto à sua capacidade de "aprisionamento" de metais pesados e outros contaminantes presentes no lodo).

- para isso acho importante uma avaliação técnico/econômica/ambiental das etapas de produção, transporte e armazenamento do lodo antes de sua incorporação ao processo produtivo na indústria cerâmica. As etapas de transporte e armazenamento do lodo devem merecer cuidados especiais para que não causem impactos. Pela análise inicial (ainda bastante superficial) dos dados

enviados, dá para perceber que a amostra analisada continha predominantemente óxidos de Si, Al, Fe, Mg e Ca. Afortunadamente, outros metais pesados de maior impacto ambiental apresentaram concentrações bem mais baixas ou ausência. Um dado muito interessante que me chamou a atenção é a presença significativa de areia grossa (cerca de 11% de areia c/ diam de 1 a 5mm) na amostra de lodo analisada. De onde será que tal areia é proveniente? Tendo em vista que espera-se sempre que esse tipo de material fique retido nas unidades de desarenação das captações de água, surge a curiosidade de saber a origem do mesmo! Esse fato pode interferir no processo produtivo?

Espero que você obtenha tais resposta (e muitas outras mais importantes) durante o desenvolvimento de sua pesquisa.

## ANEXO VI

Tabela AVI-1: Dados emissões para comparação com os fatores da EPA.

| Tempo de queima                        | CO (ppmv) | CO <sub>2</sub> (% v/v) | NO <sub>x</sub> (ppmv) | SO <sub>2</sub> ' (ppmv) | Início da medição com duração de 1 hora | Material Particulado  | SO <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> " |
|--|-----------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------|-------------------|
|  |           |                         |                        |                          |   | (mg/Nm <sup>3</sup> ) |                 |                   |
| <b>EMISSIONES ENCONTRADAS COM LODO</b> |           |                         |                        |                          |   |                       |                 |                   |
| 0 a 18 horas                           | 850079,1  | 15887,1                 | 91830,6                | 10852,5                  | 18:05:20                                | 182                   | 0,14            | 0,88              |
| 18 a 21 horas                          | 71653,2   | 3400,7                  | 30393,0                | 8894,2                   | 20:14:40                                | 390                   | 2,45            | 20,48             |
| 21 a 23 horas                          | 48919,0   | 2032,9                  | 22681,1                | 11598,7                  | 22:11:20                                | 332                   | 4,15            | 53,39             |
| 23 a 28 horas                          | 110885,1  | 4518,7                  | 52726,9                | 36188,7                  | 24:03:20                                | 396                   | 0,4             | 81                |
| <b>EMISSIONES ENCONTRADAS SEM LODO</b> |           |                         |                        |                          |   |                       |                 |                   |
| 0 a 20 horas                           | 989213,9  | 18433,3                 | 120182,7               | 54897,6                  | 19:28:40                                | 731                   | 15,09           | 74,14             |
| 20 a 23 horas                          | 136548,5  | 3185,0                  | 29738,4                | 30799,2                  | 21:46:40                                | 649                   | 13,94           | 149,67            |
| 23 a 25 horas                          | 53633,6   | 2162,8                  | 21679,1                | 26215,1                  | 23:46:40                                | 496                   | 0,91            | 189,52            |

Tabela AVI-2: Dados de entrada – Programa SCREEN3.

|                                       | CO  | NOx        | SO2      |
|---------------------------------------|---|------------|----------|
| Maiores emissões encontradas com lodo | 1015,7 ppmv   | 132,5 ppmv | 88 ppmv  |
| Maiores emissões encontradas sem lodo | 1129,6 ppmv   | 132,0 ppmv | 259 ppmv |
| emissão com lodo - kg/h               | 4,96  | 1,05       | 1,06     |
| emissão sem lodo - kg/h               | 4,74  | 0,92       | 2,49     |
| taxa de emissão com lodo (g/s)        | 1,38  | 0,29       | 0,29     |
| taxa de emissão sem lodo (g/s)        | 1,32  | 0,26       | 0,69     |
| vazão com lodo (Nm <sup>3</sup> /h)   | 4195  | 4127       | 4502     |
| vazão sem lodo (Nm <sup>3</sup> /h)   | 3604  | 3646       | 3604     |
| velocidade com lodo (m/s)             | 2,4   | 2,9        | 3,3      |
| velocidade sem lodo (m/s)             | 2,1   | 2,4        | 2,1      |
| ALTURA DA CHAMINÉ                     | 8 metros  |            |          |
| DIÂMETRO DA CHAMINÉ                   | 1,13 metros <sup>(1)</sup>                          |            |          |
| TEMPERATURA DOS GASES DA CHAMINÉ      | 109°C ou 382 K <sup>(2)</sup>                       |            |          |
| TEMPERATURA AMBIENTE                  | 20°C ou 293 K                                       |            |          |
| ALTURA ACIMA DO SOLO DO RECEPTOR      | 1,70 metros   |            |          |
| OPÇÃO URBANA/RURAL                    | URBANA  |            |          |
| METEOROLOGIA                          | PIOR POSSÍVEL - F - 6                               |            |          |
| TERRENO                               | SIMPLES <sup>(3)</sup>                              |            |          |
| DOWNWASH                              | Prédio de 6 metros de altura e 30 metros de largura |            |          |

LEGENDA:

<sup>(1)</sup> chaminé quadrada (a=b=1 metro). Como  $\frac{a}{b} < 3$  o diâmetro equivalente (De) é calculado com a

$$\text{fórmula } De = 2 \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \text{ (PERRY; CHILTON, 1973)}$$

<sup>(2)</sup> média dos valores na base da chaminé

<sup>(3)</sup> - 0 a 30 metros da fonte – altura do terreno, acima da base da chaminé, igual a 0

- a partir de 30 metros da fonte – altura do terreno, acima da base da chaminé, igual a 6 metros

Tabela AVI-3: Resultado das análises químicas dos filtros impregnados com o material coletado.

| Elementos                          | Filtros com particulados |            |            |                                    |            |            |            |
|------------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                    | Ensaio sem lodo          |            |            | Ensaio com lodo                    |            |            |            |
|                                    | 1a<br>(mg)               | 2a<br>(mg) | 3a<br>(mg) | 1b<br>(mg)                         | 2b<br>(mg) | 3b<br>(mg) | 4b<br>(mg) |
| Massa do Filtro                    | 282,3                    | 282,3      | 282,3      | 282,3                              | 282,3      | 282,3      | 282,3      |
| Massa total de Particulado         | 21,7                     | 14,2       | 11,3       | 16,1                               | 30,3       | 28,2       | 12,2       |
| Alumínio                           | 10,64                    | 10,08      | 10,57      | 8,36                               | 6,57       | 10,56      | 8,84       |
| Arsênio                            | 0,014                    | 0,013      | 0,012      | 0,012                              | 0,014      | 0,014      | 0,012      |
| Bário                              | 10,945                   | 8,599      | 7,341      | 10,146                             | 10,629     | 6,831      | 3,829      |
| Cádmio                             | 0,0015                   | 0,0015     | 0,0015     | 0,0015                             | 0,0016     | 0,0016     | 0,0015     |
| Chumbo                             | 0,0022                   | 0,0021     | 0,0022     | 0,0021                             | 0,0022     | 0,0022     | 0,0021     |
| Cobre                              | 0,0037                   | 0,0041     | 0,0054     | 0,0044                             | 0,0042     | 0,0032     | 0,0032     |
| Cromo total                        | 0,0035                   | 0,0034     | 0,0034     | 0,0033                             | 0,0034     | 0,0033     | 0,0033     |
| Mercurio                           | 0,0353                   | 0,0119     | 0,0117     | 0,0209                             | 0,0416     | 0,0124     | 0,0118     |
| Níquel                             | 0,0061                   | 0,0059     | 0,0059     | 0,0060                             | 0,0063     | 0,0062     | 0,0059     |
| Selênio                            | 0,0122                   | 0,0119     | 0,0117     | 0,0119                             | 0,0125     | 0,0124     | 0,0118     |
| Ferro                              | 0,1335                   | 0,1287     | 0,1254     | 0,1420                             | 0,1432     | 0,1223     | 0,1449     |
| Manganês                           | 0,0559                   | 0,4740     | 0,0449     | 0,0543                             | 0,0450     | 0,0438     | 0,0371     |
| Sódio                              | 16,4171                  | 0,0015     | 0,0016     | 0,0017                             | 0,0017     | 0,0016     | 0,0017     |
| Prata                              | 0,0015                   | 0,0015     | 0,0015     | 0,0015                             | 0,0016     | 0,0016     | 0,0015     |
| Zinco                              | 10,3367                  | 0,0010     | 0,0011     | 0,0010                             | 0,0010     | 0,0011     | 0,0011     |
| Coletas com duração de 1 hora:     |                          |            |            |                                    |            |            |            |
| 1a – entre 19 e 20 horas de queima |                          |            |            | 1b – entre 17 e 18 horas de queima |            |            |            |
| 2a – entre 22 e 23 horas de queima |                          |            |            | 2b – entre 20 e 21 horas de queima |            |            |            |
| 3a – entre 24 e 25 horas de queima |                          |            |            | 3b – entre 22 e 23 horas de queima |            |            |            |
|                                    |                          |            |            | 4b – entre 24 e 25 horas de queima |            |            |            |

Tabela AVI-4: Massas dos elementos presentes na água de lavagem da sonda durante os testes com e sem lodo.

| Elementos                          | Água de Lavagem da Sonda |            |            |                                    |            |            |            |
|------------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                    | Ensaio sem lodo          |            |            | Ensaio com lodo                    |            |            |            |
|                                    | 1a<br>(mg)               | 2a<br>(mg) | 3a<br>(mg) | 1b<br>(mg)                         | 2b<br>(mg) | 3b<br>(mg) | 4b<br>(mg) |
| Massa Coletada                     | 672,7                    | 597,1      | 454,3      | 148,9                              | 320,3      | 275,7      | 372,6      |
| Alumínio                           | 23,54                    | 20,30      | 16,35      | 4,17                               | 6,43       | 9,37       | 11,18      |
| Arsênio                            | 0,032                    | 0,026      | 0,018      | 0,006                              | 0,015      | 0,012      | 0,015      |
| Bário                              | 24,217                   | 17,316     | 11,358     | 5,063                              | 10,890     | 6,654      | 4,844      |
| Cádmio                             | 0,0034                   | 0,0030     | 0,0023     | 0,0007                             | 0,0016     | 0,0014     | 0,0019     |
| Chumbo                             | 0,0049                   | 0,0043     | 0,0034     | 0,0010                             | 0,0022     | 0,0022     | 0,0021     |
| Cobre                              | 0,0037                   | 0,0041     | 0,0054     | 0,0044                             | 0,0042     | 0,0029     | 0,0040     |
| Cromo total                        | 0,0077                   | 0,0067     | 0,0053     | 0,0016                             | 0,0035     | 0,0029     | 0,0042     |
| Mercurio                           | 0,0780                   | 0,0239     | 0,0182     | 0,0104                             | 0,0426     | 0,0110     | 0,0149     |
| Níquel                             | 0,0135                   | 0,0119     | 0,0091     | 0,0030                             | 0,0064     | 0,0055     | 0,0075     |
| Selênio                            | 0,0269                   | 0,0239     | 0,0182     | 0,0060                             | 0,0128     | 0,0110     | 0,0149     |
| Ferro                              | 0,2953                   | 0,2591     | 0,1940     | 0,0709                             | 0,1467     | 0,1086     | 0,1833     |
| Manganês                           | 0,1238                   | 0,0955     | 0,0695     | 0,0271                             | 0,0461     | 0,0389     | 0,0469     |
| Sódio                              | 36,3258                  | 0,0030     | 0,0025     | 0,0009                             | 0,0018     | 0,0014     | 0,0022     |
| Prata                              | 0,0034                   | 0,0030     | 0,0023     | 0,0007                             | 0,0016     | 0,0014     | 0,0019     |
| Zinco                              | 22,8718                  | 0,0021     | 0,0017     | 0,0005                             | 0,0011     | 0,0009     | 0,0014     |
| Coletas com duração de 1 hora:     |                          |            |            |                                    |            |            |            |
| 1a – entre 19 e 20 horas de queima |                          |            |            | 1b – entre 17 e 18 horas de queima |            |            |            |
| 2a – entre 22 e 23 horas de queima |                          |            |            | 2b – entre 20 e 21 horas de queima |            |            |            |
| 3a – entre 24 e 25 horas de queima |                          |            |            | 3b – entre 22 e 23 horas de queima |            |            |            |
|                                    |                          |            |            | 4b – entre 24 e 25 horas de queima |            |            |            |

Tabela AVI-5: Resultado das análises químicas realizadas nos filtros de coleta de material particulado sem uso (branco).

|                 | Branco dos Filtros |           |           |           |           |           |           |           |           |               |
|-----------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|                 | 1<br>(mg)          | 2<br>(mg) | 3<br>(mg) | 4<br>(mg) | 5<br>(mg) | 6<br>(mg) | 7<br>(mg) | 8<br>(mg) | 9<br>(mg) | Média<br>(mg) |
| Massa do Filtro | 282,3              | 279,9     | 285,2     | 284,1     | 282,8     | 284,6     | 278,6     | 287,9     | 281,7     | 283,0         |
| Al              | 10,16              | 9,80      | 9,98      | 9,94      | 9,90      | 9,96      | 9,47      | 10,36     | 9,86      | 9,94          |
| As              | 1,44               | 1,40      | 1,40      | 1,40      | 1,40      | 1,40      | 1,36      | 1,44      | 1,40      | 1,40          |
| Ba              | 1,24               | 1,20      | 1,20      | 1,20      | 1,24      | 1,20      | 1,28      | 1,24      | 1,24      | 1,23          |
| Cd              | 0,155              | 0,150     | 0,150     | 0,150     | 0,155     | 0,150     | 0,160     | 0,155     | 0,155     | 0,153         |
| Pb              | 0,00003            | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003   | 0,00003       |
| Cu              | 0,00004            | 0,00004   | 0,00004   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004       |
| Cr              | 0,00004            | 0,00004   | 0,00004   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004   | 0,00003   | 0,00004       |
| Hg              | 0,0002             | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002    | 0,0002        |
| Ni              | 0,0008             | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008        |
| Se              | 0,0008             | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008    | 0,0008        |
| Fe              | 0,0050             | 0,0043    | 0,0056    | 0,0046    | 0,0053    | 0,0038    | 0,0050    | 0,0050    | 0,0045    | 0,0048        |
| Mn              | 0,00013            | 0,00011   | 0,00014   | 0,00011   | 0,00013   | 0,00010   | 0,00013   | 0,00012   | 0,00011   | 0,00012       |
| Na              | 0,056              | 0,056     | 0,054     | 0,055     | 0,066     | 0,057     | 0,052     | 0,059     | 0,058     | 0,057         |
| Ag              | 0,280              | 0,280     | 0,270     | 0,275     | 0,330     | 0,285     | 0,260     | 0,295     | 0,290     | 0,285         |
| Zn              | 0,190              | 0,180     | 0,185     | 0,180     | 0,180     | 0,180     | 0,185     | 0,180     | 0,180     | 0,182         |

## ANEXO VII

Tabela AVII-1: Testes de solubilização dos blocos queimados – todas as análises.

| <b>Solubilização Blocos Pós Queima (mg/L)</b> |                      |             |            |            |            |            |            |
|---|----------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Parâmetros</b>                             | <b>V.M.P.</b>        | <b>SL 1</b> | <b>CL1</b> | <b>SL2</b> | <b>CL2</b> | <b>SL3</b> | <b>CL3</b> |
| Arsênio                                       | 0,05                 | < 0,05      | < 0,05     | 0,06       | < 0,01     | 0,19       | 0,05       |
| Berílio                                       | -                    | < 0,01      | < 0,1      | -          | -          | -          | -          |
| Bário   | 0,7                  | < 0,1       | < 0,01     | < 0,1      | < 0,1      | < 0,1      | < 0,1      |
| Cádmio  | 0,005                | < 0,005     | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    |
| Chumbo  | 0,05                 | < 0,05      | < 0,05     | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     |
| Cianetos                                      | 0,1                  | < 0,1       | < 0,1      | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Cromo Total                                   | 0,05                 | < 0,05      | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Fenóis *                                      | 0,01                 | < 0,001     | < 0,001    | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     |
| Fluoretos                                     | 1,5                  | 0,23        | < 0,1      | 0,21       | < 0,1      | 0,21       | 0,28       |
| Mercúrio                                      | 0,001                | < 0,001     | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| Nitratos                                      | 10                   | < 0,1       | < 0,1      | 0,15       | < 0,1      | < 0,1      | 0,1        |
| Prata   | 0,05                 | < 0,05      | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Selênio                                       | 0,01                 | < 0,01      | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     | < 0,01     |
| Alumínio                                      | 0,2                  | < 0,05      | 1,00       | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Cloretos                                      | 250                  | < 5         | < 5        | 1,47       | < 1        | 1,35       | 1,1        |
| Cobre   | 2                    | < 0,05      | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Dureza  | 500                  | < 5         | 19,7       | -          | -          | -          | -          |
| Ferro   | 0,3                  | < 0,05      | 0,09       | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     | < 0,05     |
| Manganês                                      | 0,1                  | 0,15        | 0,22       | < 0,05     | 0,30       | < 0,05     | < 0,05     |
| Sódio   | 200                  | 2,46        | 3,18       | 3,7        | 1,6        | 4,9        | 4,9        |
| Surfactantes                                  | 0,5                  | < 0,1       | < 0,1      | < 0,1      | < 0,1      | < 0,1      | < 0,1      |
| Sulfatos                                      | 250                  | 7,4         | 39,8       | 8,87       | 70,3       | 8,24       | 15,6       |
| Vanádio                                       | -                    | 7,26        | 1,1        | -          | -          | -          | -          |
| Zinco   | 5                    | < 0,05      | 0,08       | < 0,05     | 0,18       | < 0,05     | < 0,05     |
| Aldrin  | $3,0 \times 10^{-3}$ | < 0,00003   | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  |
| Clordano                                      | $3,0 \times 10^{-4}$ | < 0,0003    | < 0,0003   | < 0,0002   | < 0,0002   | < 0,0002   | < 0,0002   |
| DDT   | $1,0 \times 10^{-3}$ | < 0,001     | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| Dieldrin                                      | $3,0 \times 10^{-3}$ | < 0,00003   | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  |
| Endrin  | $2,0 \times 10^{-4}$ | < 0,0002    | < 0,0002   | < 0,0001   | < 0,0001   | < 0,0001   | < 0,0001   |
| Epoxi Heptacloro                              | $1,0 \times 10^{-4}$ | < 0,0001    | < 0,0001   | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  |
| Heptacloro                                    | $1,0 \times 10^{-4}$ | < 0,0001    | < 0,0001   | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  | < 0,00003  |
| Hexaclorobenzeno                              | $1,0 \times 10^{-3}$ | < 0,00001   | < 0,00001  | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| Lindano                                       | $3,0 \times 10^{-3}$ | < 0,003     | < 0,003    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| Metoxicloro                                   | 0,03                 | < 0,03      | < 0,03     | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    |
| Pentaclorofenol                               | 0,01                 | < 0,01      | < 0,01     | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    | < 0,005    |
| Toxafeno                                      | $5,0 \times 10^{-3}$ | < 0,005     | < 0,005    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| 2,4 – D                                       | 0,1                  | < 0,1       | < 0,1      | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| 2,4,5 – T                                     | $2,0 \times 10^{-3}$ | < 0,002     | < 0,002    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| 2,4,5 – TP                                    | 0,03                 | < 0,03      | < 0,03     | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    | < 0,001    |
| Organofosf. e Carbamatos                      | 0,1                  | < 0,1       | < 0,1      | < 1        | < 1        | < 1        | < 1        |

LEGENDA:  
SL – Sem Lodo; CL – Com Lodo



Tabela AVII-2: Testes de lixiviação dos blocos queimados – todas as análises.

| Lixiviação Bloco Pós-Queima (mg/L) |        |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parâmetros                         | V.M.P. | SL1     | CL1     | SL2     | CL 2    | SL3     | CL3     |
| Arsênio                            | 5      | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Berílio                            | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Bário                              | 100    | 0,27    | 0,22    | 3,18    | 0,21    | 0,22    | 0,72    |
| Cádmio                             | 0,5    | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Chumbo                             | 5      | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | 0,9     |
| Cromo Total                        | 5      | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Fenóis *                           | -      | < 0,001 | < 0,001 | -       | -       | -       | -       |
| Fluoretos                          | 150    | < 0,1   | < 0,1   | < 1     | < 1     | < 1     | < 1     |
| Mercúrio                           | 0,1    | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Prata                              | 5      | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Selênio                            | 1      | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Aldrin                             | 0,003  | < 0,003 | < 0,003 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| Clordano                           | 0,03   | < 0,03  | < 0,03  | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 |
| DDT                                | 0,1    | < 0,1   | < 0,1   | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  |
| Dieldrin                           | 0,003  | < 0,003 | < 0,003 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| Endrin                             | 0,02   | < 0,02  | < 0,02  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  |
| Epoxi Heptacloro                   | 0,01   | < 0,01  | < 0,01  | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| Heptacloro                         | 0,01   | < 0,01  | < 0,01  | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| Hexaclorobenzeno                   | 0,001  | < 0,001 | < 0,001 | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  |
| Lindano                            | 0,3    | < 0,3   | < 0,3   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Metoxicloro                        | 3      | < 3,0   | < 3,0   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Pentaclorofenol                    | 1      | < 1,0   | < 1,0   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Toxafeno                           | 0,5    | < 0,5   | < 0,5   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| 2,4 – D                            | 10     | < 10,0  | < 10,0  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  | < 0,01  |
| 2,4,5 – T                          | 0,2    | < 0,2   | < 0,2   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| 2,4,5 – TP                         | 3      | < 3,0   | < 3,0   | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Organofosf. e Carbamatos           | 10     | < 1,0   | < 1,0   | < 10    | < 10    | < 10    | < 10    |

LEGENDA:  
SL – Sem Lodo; CL – Com Lodo

Tabela AVII-3: Poluentes na massa bruta dos blocos queimados – todas as análises.

| Massa Bruta dos Blocos Pós-Queima    |         |          |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Parâmetros                           | Unidade | V.M.P.   | SL1    | CL1    | SL2    | CL2    | SL3    | CL3    |
| Unidade                              | %       | -        | 1      | 0.9    | 1.07   | 0.38   | 0.32   | 0.35   |
| Ponto de Fulgor                      | °C      | -        | -      | -      | > 60   | > 60   | > 60   | > 60   |
| pH                                   | -       | 2 - 12,5 | 7,4    | 7,5    | 6,7    | 6,7    | 7,2    | 7,0    |
| Berílio                              | mg/kg   | 100      | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    |
| Cromo VI                             | mg/kg   | 100      | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    |
| Merúrio                              | mg/kg   | 100      | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    |
| Vanádio                              | mg/kg   | 1000     | 33,6   | 30,7   | 22,7   | 24,3   | 17,5   | 23,0   |
| Chumbo                               | mg/kg   | 1000     | 52,5   | 44,4   | 1,04   | 34,8   | < 1    | 3,31   |
| Selênio                              | mg/kg   | 100      | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    |
| Arsênio                              | mg/kg   | 1000     | < 1    | < 1    | 1,17   | < 1    | 1,82   | 1,57   |
| Sulfetos                             | mg/kg   | 500      | -      | -      | < 10   | < 10   | < 10   | < 10   |
| Cianetos                             | mg/kg   | 250      | < 1    | < 1    | < 10   | < 10   | < 10   | < 10   |
| Fenóis                               | mg/kg   | 10       | < 0,5  | < 0,5  | < 0,5  | < 0,5  | < 0,5  | < 0,5  |
| Hidrocarb. Líquidos e Bombáveis      | %       | 5        | < 0,05 | < 0,05 | -      | -      | -      | -      |
| Oleos e Graxas                       | %       | 1        | < 0,05 | < 0,05 | 0,05   | 0,12   | < 0,05 | < 0,05 |
| Líquidos Livres                      |         | Ausente  | A      | A      | A      | A      | A      | A      |
| Surfactantes                         | mg/kg   | -        | < 0,5  | < 0,5  | -      | -      | -      | -      |
| COT                                  | % (p/p) | -        | 0,5    | 0,86   | 0,08   | 0,42   | 0,11   | 0,05   |
| Cloretos                             | mg/kg   | -        | 16,3   | 16,7   | 12,7   | 10,3   | 11,3   | 9,3    |
| Cromo Total                          | mg/kg   | -        | 8,46   | 11,5   | 5,97   | 17,7   | 4,89   | 6,22   |
| Cloro Residual                       | mg/kg   | -        | < 0,5  | < 0,5  | -      | -      | -      | -      |
| Sólidos Voláteis                     | % (p/p) | -        | 0,9    | 1,54   | 0,15   | 0,77   | 0,2    | 0,1    |
| Coliformes Fecais                    | NMP/g   | -        | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    | < 1    |
| Giárdia sp                           |         | -        | A      | A      | A      | A      | A      | A      |
| Todos os COV e Solventes Halogenados | mg/kg   | -        | < 0,05 | < 0,05 | < 0,02 | < 0,02 | < 0,02 | < 0,02 |

LEGENDA:  
SL – Sem Lodo: CL – Com Lodo: A – ausentes

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)