

Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Infra-Estrutura de Transportes, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica.

Nathalia Paiva Barbosa de Castro

## **SISTEMAS TUBULARES PARA CONTENÇÃO DE LODO E SEDIMENTOS CONTAMINADOS**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Delma de Mattos Vidal

Orientador

---

Professor Homero Santiago Maciel  
Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP - Brasil

2005

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA**

Castro, Nathalia  
Sistemas Tubulares para Contenção de Lodo e Sedimentos Contaminados / Nathalia Paiva Barbosa de Castro  
São José dos Campos, 2005.  
103f.  
Tese de mestrado – Curso e área de concentração da tese –  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ano. Orientadores: Nome dos orientadores precedidos de sua  
Titulação.  
1. Geossintéticos. 2. Filtragem. 3. Desaguamento (Geotecnia). I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto  
Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI. II. Título

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CASTRO, Nathalia. **Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados**. 2005. 103f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: NATHALIA PAIVA BARBOSA DE CASTRO

TÍTULO DO TRABALHO: Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2005

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

  
Nathalia Paiva Barbosa de Castro  
Rua Pedro Turssi, 38 / 12 B – Jd Satélite – S. J. dos Campos - SP

# **Sistemas Tubulares para Contenção de Lodo e Sedimentos Contaminados**

**Nathalia Paiva Barbosa de Castro**

Composição da Banca Examinadora:

|                     |                                       |        |
|---------------------|---------------------------------------|--------|
| Prof <sup>a</sup> . | Maryangela Geimba de Lima..Presidente | (ITA)  |
| Prof <sup>a</sup> . | Delma de Mattos Vidal..Orientador     | (ITA)  |
| Prof <sup>a</sup>   | Íria Fernandes Vendrame..             | ITA    |
| Prof <sup>a</sup> . | Denise de Carvalho Urashima..         | UNIVAP |
| Prof.               | Romero César Gomes..                  | UFOP   |

**ITA**

## SUMÁRIO

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 1     | Introdução .....  | 1         |
| 2     | Desaguamento de resíduos .....  | 5         |
| 2.1   | <b>Introdução.....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.2   | <b>Classes de resíduos.....</b>   | <b>6</b>  |
| 2.3   | <b>Resíduos de mineração .....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.4   | <b>Sedimentos contaminados .....</b>  | <b>8</b>  |
| 2.5   | <b>Lodos.....</b>   | <b>9</b>  |
| 2.5.1 | Lodos industriais .....   | 9         |
| 2.5.2 | Lodos oleosos .....   | 9         |
| 2.5.3 | Lodo de estação de tratamento de esgoto.....                                | 10        |
| 2.6   | <b>Técnicas de desaguamento convencionais.....</b>                          | <b>11</b> |
| 2.6.1 | Desaguamento mecânico .....   | 11        |
| 2.6.2 | Disposição em lagoas e valas .....  | 15        |
| 2.6.3 | Leitos de secagem.....  | 16        |
| 3     | Sistemas tubulares de geotêxtil.....  | 17        |
| 3.1   | <b>Concepção .....</b>  | <b>17</b> |
| 3.2   | <b>Aplicações em lodos de estações de tratamento de esgoto (ETEs) .....</b> | <b>18</b> |
| 3.3   | <b>Aplicações em resíduos de refinaria de petróleo .....</b>                | <b>24</b> |
| 3.4   | <b>Aplicações em sedimentos .....</b>                                       | <b>27</b> |
| 3.4.1 | Contaminados .....  | 27        |
| 3.4.2 | Não contaminados.....   | 29        |
| 4     | Dimensionamento face às solicitações hidráulicas.....                       | 32        |
| 4.1   | <b>Introdução.....</b>  | <b>32</b> |
| 4.2   | <b>Propriedades hidráulicas do geotêxtil.....</b>                           | <b>32</b> |
| 4.2.1 | Abertura de filtração .....   | 32        |
| 4.2.2 | Condutividade hidráulica normal ao plano.....                               | 33        |
| 4.3   | <b>Mecanismos de filtração .....</b>  | <b>34</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.3.1      | Influência da estrutura do geotêxtil.....  | 34        |
| 4.3.2      | Influência da estrutura do meio a filtrar – filtração de um meio poroso.....     | 34        |
| 4.3.3      | Influência da estrutura do meio a filtrar – filtração de partículas em suspensão | 37        |
| <b>4.4</b> | <b>Critérios de retenção .....</b>   | <b>38</b> |
| 4.4.1      | Critério de retenção convencional .....  | 38        |
| 4.4.2      | Critério de retenção racional ou por teoria probabilística .....                 | 40        |
| 4.4.3      | Processo de Colmatação.....  | 41        |
| 4.4.4      | Aditivos .....   | 42        |
| <b>4.5</b> | <b>Critérios de permeabilidade.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Eficiência do processo.....</b>   | <b>44</b> |
| 4.6.1      | Eficiência na filtração.....   | 44        |
| 4.6.2      | Eficiência no desaguamento .....   | 45        |
| <b>4.7</b> | <b>Exemplo de aplicação .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>4.8</b> | <b>Comentários.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>5</b>   | <b>Dimensionamento face às solicitações mecânicas.....</b>                       | <b>48</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Introdução.....</b>   | <b>48</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Análise da forma.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Cálculos em termos de tração.....</b>   | <b>54</b> |
| 5.3.1      | Proposta de Leshchinsky e Leshchinsky (2002) - GeoCoPS™ .....                    | 54        |
| 5.3.2      | Proposta de Liu, Goh e Silvester .....   | 57        |
| 5.3.3      | Proposta de Kazimierowicz .....  | 59        |
| <b>5.4</b> | <b>Fatores de redução.....</b>   | <b>59</b> |
| 5.4.1      | Introdução.....  | 59        |
| 5.4.2      | Fluência .....   | 61        |
| 5.4.3      | Danos de instalação.....   | 61        |
| 5.4.4      | Danos ambientais .....   | 62        |
| 5.4.5      | Emendas .....  | 63        |
| <b>5.5</b> | <b>Costuras .....</b>  | <b>64</b> |
| 5.5.1      | Introdução.....  | 64        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 5.5.2      | Tipos de costuras.....  | 65        |
| 5.5.3      | Número de carreira de pontos.....                                 | 66        |
| 5.5.4      | Localização da costura .....                                      | 67        |
| 5.5.5      | Tipos de pontos.....  | 67        |
| 5.5.6      | Número de pontos.....   | 68        |
| 5.5.7      | Tipo da linha .....   | 68        |
| 5.5.8      | Equipamentos de costura.....                                      | 69        |
| 5.5.9      | Mangas .....  | 69        |
| <b>5.6</b> | <b>Comparação numérica das propostas de dimensionamento .....</b> | <b>71</b> |
| <b>5.7</b> | <b>Exemplo de aplicação .....</b>                                 | <b>73</b> |
| <b>5.8</b> | <b>Comentários.....</b>   | <b>76</b> |
| 6          | Conclusões .....  | 78        |
| 7          | Referências bibliográficas .....                                  | 81        |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1: Resultados do ensaio de filtração (Fowler et al 2002).....   | 19 |
| Tabela 3.2: Resultados da análise da presença de metais pesados (Fowler et al 2002).....   | 20 |
| Tabela 3.3: Resultados após 65 dias de consolidação (Fowler et al 2002). ....  | 21 |
| Tabela 4.1: Coeficientes para o critério de retenção do CFGG (1986), citado por Vidal e Urashima (1999). ....  | 39 |
| Tabela 5.1: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS <sup>TM</sup> e do método proposto por Liu (1981) (Leshchinsky e Leshchinsky 2002). ....   | 71 |
| Tabela 5.2: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS <sup>TM</sup> e do método proposto por Silvester (1986), considerando $\gamma_{\text{material}} = 20\text{kN/m}^3$ (Leshchinsky e Leshchinsky 2002)...       | 71 |
| Tabela 5.3: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS <sup>TM</sup> e do método proposto por Kazimierowicz (1994), considerando $\gamma_{\text{material}} = 14\text{kN/m}^3$ (Leshchinsky e Leshchinsky 2002)..... | 72 |
| Tabela 5.4 Comparação entre a proposta de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) e os resultados médios indicados na Tabela 5.2. ....   | 73 |
| Tabela 5.5: Comparação dos valores de tração entre as propostas de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000), Kazimierowicz (1994) e do programa computacional GeoCoPS <sup>TM</sup> . ....  | 73 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1: Aterro hidráulico ou “Salsichão” (Bogossian et al 1982). .....  | 2  |
| Figura 1.2: a) Fase de preenchimento do tubo; b) Fase de desaguamento do material e c) Fase de abertura do tubo.....  | 3  |
| Figura 2.1: Perspectiva de uma centrífuga decantadora do modelo Decanter tipo CA 505 (Fonte: Westfalia Separator do Brasil Ltda, citado por Reali et al 1999) ..... | 13 |
| Figura 2.2: Filtro-prensa do tipo diafragma (Fonte: Netzsch).....   | 13 |
| Figura 2.3: Mecanismo de funcionamento das câmaras de um filtro prensa do tipo diafragma (Fonte: Netzsch).....  | 14 |
| Figura 2.4: Prensa desaguadora (Fonte: Degremont, citado por Cordeiro 1999).....  | 15 |
| Figura 3.1: Esquema geral de enchimento e desaguamento (Mori et al 2002) .....  | 18 |
| Figura 3.2: Esquema de montagem do “bag test” para duas amostras (Fowler et al 2002).....   | 19 |
| Figura 3.3: Tubo experimental preenchido até 1,5 m (Fowler et al 2002).....   | 21 |
| Figura 3.4: Tubo após 26 dias de consolidação (Fowler et al 2002) .....   | 22 |
| Figura 3.5: Os 19 tubos no pátio asfaltado (Fowler et al 2002). .....   | 23 |
| Figura 3.6: Tubos preenchidos (Fowler et al 2002). .....  | 23 |
| Figura 3.7: Dry DREdge <sup>TM</sup> removendo os sedimentos (Fowler et al). .....  | 25 |
| (a) Curva granulométrica.....   | 26 |
| (b) Resultados de ensaio.....   | 26 |
| Figura 3.8: Caracterização do material dragado (adaptado de Duke et al 2000).....   | 26 |
| Figura 3.9: Tubo de geotêxtil preenchido até a altura de 1,5 m (Fowler et al 2002).....   | 27 |
| Figura 3.10: Eficiência de contenção dos tubos de geotêxtil para filtração (Mori et al 2002). .....   | 29 |
| Figura 3.11: Tubos de geotêxtil preenchidos no pátio de desaguamento (Gaffney et al 2000). .....  | 31 |
| Figura 4.1: Formação de arco devido à direção do fluxo ser a mesma da força da gravidade (Vidal e Urashima 1999). .....   | 35 |
| Figura 4.2: Perda de partículas devido à direção do fluxo ser inversa à da força da gravidade (Vidal e Urashima 1999) .....   | 35 |
| Figura 4.3: Formação de pré-filtro na filtração de material bem graduado (Vidal e Urashima 1999) .....  | 36 |
| Figura 4.4: Perda de partículas ou sufusão na filtração de material mal graduado não uniforme (Vidal e Urashima 1999) .....   | 36 |
| Figura 4.5: Mecanismos de filtração – influência do meio a filtrar (Vidal e Urashima 1999). .....   | 37 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 4.6: Zonas de deposição do material durante o bombeamento.....   | 38 |
| Figura 4.7: Distribuição da umidade e formação do “Filter cake” (Gaffney et al 1999).....   | 42 |
| Figura 5.1: Seção transversal em forma de elipse (Pilarczyk 2000).....  | 50 |
| Figura 5.2: Seção transversal em forma de falsa elipse .....  | 51 |
| Figura 5.3: Pontos medidos experimentalmente ao longo do perímetro (Liu 1981) versus geometria calculada (elipse achatada) pelo programa GeoCoPS <sup>TM</sup> (Leshchinsky e Leshchinsky 2002) ..... | 53 |
| Figura 5.4: Efeitos da pressão de enchimento sobre a forma do tubo e sobre a solicitação em tração (Leshchinsky e Leshchinsky 2002) .....   | 54 |
| Figura 5.5: Seção transversal do tubo de geotêxtil: convenções e notações (Leshchinsky e Leshchinsky 2002) .....  | 56 |
| Figura 5.6: Esquema de ensaio de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000).....   | 58 |
| Figura 5.7: Ábaco para estimativa de forma e em termos de tração (Pilarczyk 2000) .....   | 58 |
| Figura 5.8: Análise das tensões pela proposta de Kazimierowicz (1994).....  | 59 |
| Figura 5.9: Exemplo de falhas na costura de um tubo de Geotêxtil em Mobile-Alabama /EUA (Leshchinsky e Leshchinsky 2002).....   | 64 |
| Figura 5.10: a) Tipo de costura simples; b) Tipo de costura com geotêxtil sobreposto (Amoco 2000, Diaz et al 1990).....   | 66 |
| Figura 5.11: Ponto com linha simples (Amoco 2000, Diaz et al 1990).....   | 67 |
| Figura 5.12: Ponto com linha dupla (Amoco 2000, Diaz et al 1990).....   | 68 |
| Figura 5.13: Esquema da localização das mangas ao longo do comprimento do tubo de geotêxtil (Pilarczyk 2000).....   | 70 |
| Figura 5.13: Representação das dimensões calculadas pelo método proposto por Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) para uma pressão de enchimento de 20kPa (sem escala).....                          | 74 |
| Figura 5.14: Representação das dimensões calculadas pelo método proposto por Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) para uma pressão de enchimento de 40kPa (sem escala).....                          | 75 |

## RESUMO

O trabalho faz uma análise da técnica de desaguamento de lodo e sedimentos dragados (contaminados ou não), por meio de tubos de geotêxtil, através da abordagem de suas características mais relevantes, apresentando exemplos de aplicação e avaliando o processo de desaguamento face às solicitações mecânicas e hidráulicas às quais todo o sistema está submetido. Este estudo é justificado pelo dilema enfrentado atualmente em relação a como, onde e por quanto tempo dispor os resíduos gerados pelas atividades humanas. O desaguamento é uma etapa pela qual os resíduos e sedimentos dragados devem ser submetidos em função do grande volume apresentado e a dificuldade de serem transportados e aterrados. A técnica de desaguamento por tubos de geotêxtil vem ao encontro desta necessidade de redução do teor de umidade, mostrando, em alguns casos, um melhor desempenho em relação a técnicas convencionais ou até mesmo podendo ser aproveitada como um recurso de otimização do processo de desaguamento sem abandonar a técnica já empregada para tal fim. Esta técnica teve seu início nos anos 80 com a finalidade de empregar tubos de geotêxtil para conter material granular, a fim de criar diques para a construção de aterros hidráulicos ou para controle de erosão. A partir do mesmo princípio, experiências voltadas para a questão ambiental, na contenção de material contaminado e material dragado fino foram surgindo e, desde então, tem-se confirmado que, se dimensionados corretamente, os tubos de geotêxtil para desaguamento de materiais finos são uma alternativa viável, principalmente do ponto de vista econômico.

## ABSTRACT

The work analyzes the sludge and dredge material (contaminated or uncontaminated) dewatering technique which utilizes geotextile tubes (geotubes), through the more relevant features survey, presenting application samples and evaluating the dewatering process considering the mechanical and hydraulic loads, which the system is imposed. This study is completely applicable since nowadays it is known that there is an actual dilemma concerning how, where and how long disposing the waste generated by the human activities. The dewatering is a stage that the waste and dredged sediments must be submitted due to their large volume and hence the associated difficulty of transporting and landfilling. The dewatering technique through the geotubes utilization meets the need of the water content reduction, presenting, in some cases, a better performance if compared with conventional techniques or even it can be used as a dewatering process optimization tool to complement another one. This technique started to be used in the 80's with the purpose of utilizing the geotubes to encapsulate granular material for containment dike building or erosion control. After that, experiences using the same principle, however focused in terms of environmental impacts, on the containment of contaminated and fine dredged materials, have been performed and, since then, it has been confirmed that, if properly designed, the geotubes are a feasible alternative, mainly in the economical point of view.

## AGRADECIMENTOS

A autora deseja expressar seus mais sinceros agradecimentos:

A Deus que por sua infinita bondade, misericórdia e seu abundante amor me deu força de vontade para superar os momentos difíceis, que não foram poucos, e alegria para desfrutar das vitórias, que felizmente superaram as derrotas.

À minha querida orientadora Delma de Mattos Vidal que com carinho e dedicação de mãe mostrou verdadeiramente sua vocação para orientar e em tudo esteve presente para que este trabalho fosse realizado.

Aos meus amigos da pós que me incentivaram e com seu companheirismo conquistaram cada batalha ao meu lado.

A CAPES pelo suporte financeiro destinado ao desenvolvimento deste estudo.

À minha família e à família do meu marido que me ajudaram no que foi possível.

E por fim, mas não com menor valor, ao meu marido Ricardo Pereira das Neves que contribuiu e muito para o andamento dos trabalhos, compreendendo a ausência, muitas vezes e o mau humor em momentos de pressão e ao meu filho Ricardo Pereira das Neves Júnior por seu olhar de carinho sempre, sua alegria sempre, sua energia sempre, mostrando que temos que olhar para frente, que não temos tempo a perder. Obrigada, meu filho e meu marido, meus constantes companheiros, por estarem ao meu lado torcendo e lutando, isto foi fundamental para que eu alcançasse a linha de chegada.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos amores da minha vida,  
ao meu marido Ricardo e ao meu  
filho Ricardinho.*

# 1 INTRODUÇÃO

Devido a uma maior preocupação por parte das indústrias com o meio ambiente e sua preservação, novos procedimentos e técnicas têm sido desenvolvidos a fim de minimizar a contaminação, especialmente, do solo, do ar e da água do planeta. Tendo em vista esta preocupação, este trabalho propõe-se a analisar a técnica que utiliza tubos de geotêxtil para o desaguamento de material com alto teor de umidade gerado por atividade industrial, lodos resultantes do tratamento do esgoto e também material oriundo da dragagem de áreas sujeitas à presença de poluentes como por exemplo, calhas de canais e áreas portuárias.

Desde os anos 80, bolsas de geotêxtil têm sido utilizadas com sucesso na contenção de pequenos ou grandes volumes de material de variadas naturezas em diversos países, tais como Holanda, Alemanha, França, Japão, Brasil e Estados Unidos (Pilarczyk 2000, Fowler et al 2002, Moo-Young e Tucker 2002, Bogossian et al 1982).

Aproveitando a função de filtração que bem desempenha o geotêxtil e que é definida por reter partículas sólidas e permitir a passagem do fluido presente (Vidal e Urashima 1999, Moo-Young et al 2002), iniciou-se a aplicação deste geossintético para a confecção de elementos tubulares preenchidos com material granular, geralmente proveniente de dragagens. Pelas características de filtração do geotêxtil, a fluido presente na composição do sedimento é expulsa permanecendo retida a parte sólida.

Estas grandes bolsas ou “Salsichões” , como é citado por alguns autores, têm sido utilizadas na construção de aterros hidráulicos, diques, proteção de margens, quebra-mares e outras obras de mesmo gênero, conforme ilustra a Figura 1.1 (Fowler et al 2002, Bogossian et al 1982).

A partir desta idéia, foram surgindo experiências utilizando o mesmo princípio, porém voltadas para a questão ambiental, na intenção de conter material contaminado (Pilarczyk 2000).

A questão do descarte de resíduos, de uma maneira geral, já é levantada há algum tempo como um problema a ser pelo menos minimizado. Em busca desta solução muitas técnicas de disposição vêm se apresentando acompanhadas de suas vantagens e desvantagens. Uma técnica bastante comum é a disposição desses resíduos em lagoas de sedimentação.



Figura 1.1: Aterro hidráulico ou “Salsichão” (Bogossian et al 1982).

Estas lagoas, geralmente provisórias, estão sujeitas a transbordar, principalmente em função do grande volume de resíduos depositados, associado a chuvas intensas, o que pode trazer uma série de danos, não só à natureza, mas também aos seres humanos. Além disto, períodos de chuva implicam em um aumento do tempo de secagem do resíduo, fator que retarda ainda mais sua saída para o seu destino final.

A fim de impedir que isso aconteça algumas técnicas para acelerar o desaguamento destes resíduos e reduzir o seu volume, têm sido desenvolvidas utilizando métodos que, com o princípio de confinamento, retiram o fluido presente retendo apenas a parte sólida e seus poluentes.

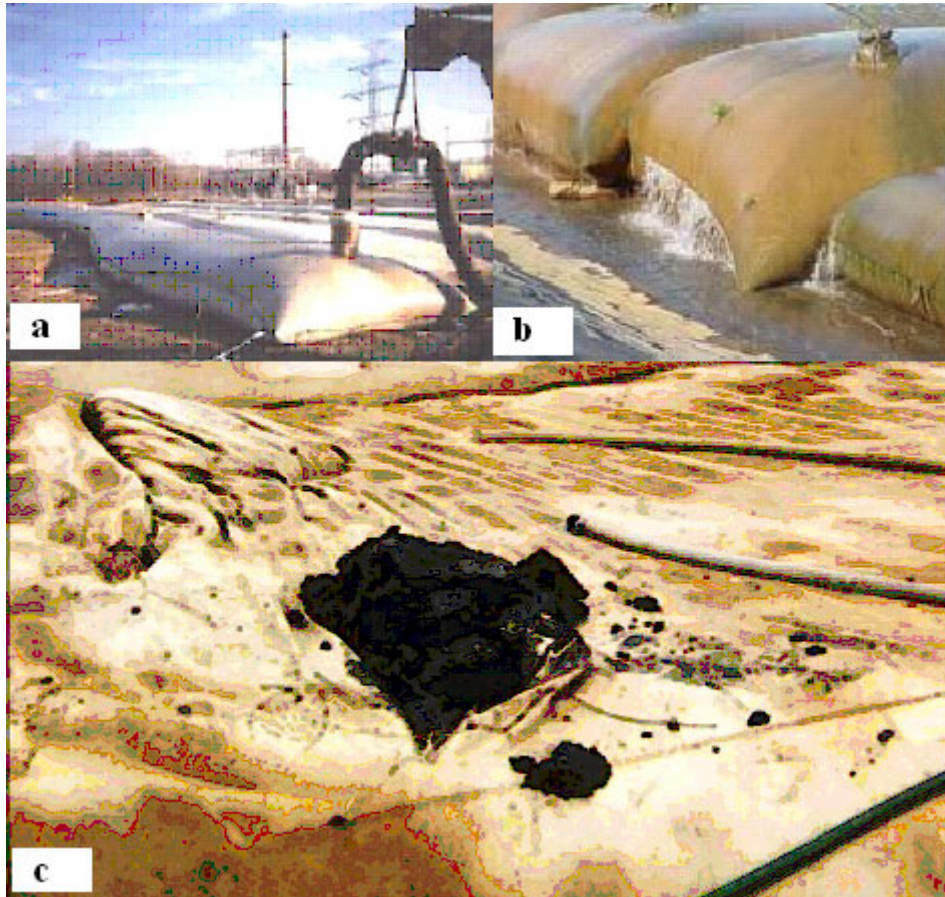
As técnicas de desaguamento mecânico, freqüentemente escolhidas pelas indústrias, enfrentam alguns problemas como manutenção e gasto de energia, preocupação recente por parte das empresas (Furtado et al 1998).

Nos últimos anos vem sendo proposta a utilização de tubos de geotêxtil para desaguamento de resíduos (Fowler et al 2002). A Figura 1.2 mostra as fases do processo de desaguamento utilizando esta técnica.

Dentre as principais considerações de um projeto para a confecção destes tubos está incluída, sem dúvida, a resistência do geotêxtil utilizado e da costura, que deverá ser suficiente para resistir às elevadas pressões, que são geradas durante o preenchimento do tubo e a compatibilidade entre o geossintético e o material em questão em termos de retenção das partículas (Pilarczyk 2000).

Este trabalho tem por objetivo a análise desta técnica, considerando as propostas de dimensionamento apresentadas por alguns autores e suas hipóteses quanto ao comportamento

dos tubos de geotêxtil em relação às solicitações mecânicas e solicitações hidráulicas, discutindo a capacidade de retenção do geossintético e sua eficiência no desaguamento.



Fonte: a) Land & Water Magazine & Inner Space Services Inc.;

b) U.S. Army Operations Support Command (2000) e c) Synthetics Industries Company

Figura 1.2: a) Fase de preenchimento do tubo; b) Fase de desaguamento do material e c) Fase de abertura do tubo.

O capítulo 2 discute as técnicas de desaguamento e as principais características físicas e químicas do material contido, uma vez que o tipo de contaminante e a granulometria do sedimento têm grande influência na determinação do geotêxtil a ser utilizado e o procedimento ideal para a aplicação da técnica. Como exemplo, pode-se citar a colocação ou não de floculante e a consideração da solubilidade do contaminante em água, o que dificulta sua retenção por aderência às partículas que compõem a parte sólida (Vidal et al 1999, Vidal 2003, Mori et al 2002).

O capítulo 3 mostra alguns exemplos de aplicação da técnica de desaguamento por meio de tubos de geotêxtil.



O capítulo 4 trata do dimensionamento quanto às solicitações hidráulicas. Isto inclui os critérios de permeabilidade e de retenção das partículas em que a estrutura do geotêxtil e do meio a filtrar são analisados. Neste mesmo capítulo são discutidos o processo de colmatação e a adição de floculantes ao material contido. Também é mostrado um exemplo de aplicação quanto aos critérios apresentados.

O capítulo 5 trata do dimensionamento do tubo de geotêxtil face às solicitações mecânicas, discutindo sobre as propostas existentes e seus fatores intervenientes. Para a análise da resistência à tração são estudados os fatores de redução pertinentes, assim como as características da costura dos tubos e as mangas de preenchimento. Continuando o exemplo de aplicação apresentado no capítulo 4, neste capítulo é considerada a aplicação de algumas propostas para o dimensionamento quanto à forma assumida pelo tubo no momento do preenchimento e quanto à solicitação em termos de tração.

As conclusões e comentários finais estão no capítulo 6.

## 2 DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS

### 2.1 Introdução

Encontrar um destino final para o resíduo gerado a partir das atividades humanas, levando em consideração a preservação do meio ambiente, como já vem sendo discutido, não é uma preocupação recente, ao contrário, é uma dificuldade que está sendo enfrentada ao longo dos últimos anos por indústrias, empresas mineradoras e inclusive pela agropecuária.

Para tentar solucionar este problema algumas técnicas de disposição de resíduos vêm sendo aplicadas, cada uma com suas características próprias, vantagens e desvantagens.

O objetivo de se dispor um efluente industrial em um local intermediário à fase de aterramento é explicado pelo fato de se tratar de um material que, geralmente, possui um elevado teor de umidade o que impede ou dificulta o seu transporte, necessitando ser submetido a um processo de desidratação ou desaguamento, a fim de possibilitar o seu encaminhamento a um aterro apropriado à sua classe.

Uma técnica amplamente utilizada para disposição de efluentes é a de lagoas de sedimentação. Esta alternativa conta com uma série de aspectos negativos, tais como:

- Espaço físico, pois são construídas em grandes áreas;
- Os altos custos envolvidos em sua construção;
- Sistema de estanqueidade de fundo, que é sempre um fator de grande responsabilidade, pois falhas nestes sistemas possibilitam a contaminação do solo e das águas subterrâneas por infiltração;
- Estas lagoas, geralmente, estão associadas a uma barragem de contenção e, com isso, sujeitas a um possível rompimento da mesma devido ao acúmulo de resíduos e conseqüente aumento das tensões;
- A demora na separação da parte líquida da sólida, que, em virtude da exposição ao ar livre, no período de chuva é quase impossível e ainda, neste mesmo período, traz o risco de transbordamento.

Este trabalho trata de uma técnica que tem se mostrado eficiente no desaguamento de alguns resíduos sólidos e semi-sólidos.

Em geral, os resíduos sólidos e semi-sólidos resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles

gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (Obladen 2004).

Outro tipo de material que apresenta características similares às supracitadas são os sedimentos retirados em atividades de dragagem, pois se trata de uma grande massa de partículas sólidas e água. Estes sedimentos podem ser de áreas portuárias ou de calhas de rios, nos dois casos estão sujeitos a estarem contaminados por óleos e graxas, metais pesados, agentes patogênicos, enfim, substâncias que vão variar com o tipo de atividade que é desenvolvida em cada área (Borma et al 1999).

As atividades de exploração também geram grandes volumes de resíduos sólidos e semi-sólidos, por exemplo, a mineração e a indústria petrolífera.

## **2.2 Classes de resíduos**

Para efeitos da Norma NBR 10004 (2004), os resíduos são classificados em: resíduos classe I ou perigosos; resíduos classe II ou não-inertes e resíduos classe III ou inertes.

Segundo a NBR 10004 (2004), periculosidade é uma característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar:

- Risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou;
- Riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

Os resíduos classe I são aqueles que apresentam periculosidade podendo ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e/ou patogênicos.

Os resíduos classe II são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos ou de resíduos classe III – inertes. Estes resíduos não-inertes podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos classe III são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 (2004) – Amostragem de Resíduos - e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização (NBR 10006 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

Como exemplo destes materiais pode-se citar: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

### 2.3 Resíduos de mineração

Em se tratando de resíduos de mineração, é importante que se deixe, primeiramente, bem clara a diferença entre os termos estéril e rejeito. Segundo Abrão e Oliveira (1998), estéril é rocha ou solo que ocorre dentro do corpo de minério ou externamente ao mesmo, sem valor econômico, que é extraído na operação de lavra para o aproveitamento do minério. Também neste caso, tal como se aplica aos conceitos de jazida e minério, dada sua conotação econômica, o que é estéril numa época pode representar minério em outra. Já o termo rejeito se dá a materiais que resultam como “sem valor econômico” no processo de concentração mineral. Em geral, exibem granulometria de areia até argila, tendo sido britados e moídos no beneficiamento do mineral. Normalmente, são descartados das usinas de concentração na forma de polpa, uma mistura de sólidos + água, e contidos por uma barragem ou dique.

Os principais problemas de contaminação dos resíduos de mineração, dispostos mais freqüentemente em pilhas de estéreis e barragens de rejeito, referem-se à drenagem ácida, resultante da oxidação dos sulfetos, à lixiviação de metais pesados, que é uma consequência da drenagem ácida, além da liberação de material sólido, erodido das áreas de disposição (Abrão e Oliveira 1998). Este certamente é um dos problemas clássicos relativos à produção de águas ácidas, pois, dependendo do tipo de minério explorado, as pilhas de estéril são ricas em sulfetos de ferro. Em presença de ar e água, os sulfetos de ferro oxidam-se produzindo íons  $H^+$ , responsáveis pela diminuição do pH das águas que percolam através do rejeito. Em ambiente ácido, os metais pesados tendem a se solubilizar, podendo atingir águas superficiais ou subterrâneas, uma vez que zonas não saturadas e sujeitas à variação sazonal do nível d'água ficam preferencialmente expostas ao fluxo difusivo de  $O_2$  (Ritchie 1994).

A oxidação dos sulfetos de ferro não implica necessariamente na formação imediata de drenagem ácida. Embora as reações de oxidação produzam íons  $H^+$ , esses íons podem ser consumidos por meio de reações com outros componentes do sistema.

Em relação às pilhas de estéreis pode-se citar o porte avantajado que têm assumido e as restrições ambientais que têm sofrido, uma vez que estas pilhas alcançam bilhões de toneladas, áreas de quilômetros quadrados e alturas de centenas de metros. Quanto à disposição de resíduos é importante lembrar que, com o aprimoramento das técnicas de lavra e de beneficiamento e os esforços para redução de custos de produção, a mineração vem, ao

longo do tempo, aproveitando minérios com teores cada vez menores e aumentando o porte dos empreendimentos e, com isto, gerando mais rejeitos. No caso das minas de ouro, por exemplo, praticamente todo o minério que alimenta a usina é transformado em rejeito, já que os teores de ouro ocorrem na faixa de gramas por tonelada. Assim sendo, as barragens para contenção de rejeitos têm, conseqüentemente, experimentado um aumento significativo na sua quantidade e no seu porte. No Brasil, há barragens de rejeitos com altura de cerca de 100m e volume de milhões de metros cúbicos, ou seja, assemelhando-se à categoria das grandes barragens das usinas hidrelétricas (Abrão e Oliveira 1998).

## **2.4 Sedimentos contaminados**

Como conseqüência do progresso e desenvolvimento industrial e urbano, os sedimentos depositados em áreas portuárias, lagos, reservatórios e corpos d'água vêm sendo contaminados ao longo dos últimos anos de maneira que os contaminantes típicos dessas regiões, dependendo da atividade desenvolvida, ficam aderidos ao sedimento. De tempos em tempos, é necessária uma remoção deste material através de dragagem para evitar encalhamento de embarcações no caso de portos ou, no caso de canais, transbordamento por diminuição da profundidade. Isto faz com que o contaminante presente na massa de solo deslocada polua outro local e é, por este motivo que, uma vez constatada a presença de poluentes num local de dragagem, deve-se tratar este material, contê-lo de forma a separá-lo do solo não contaminado ou transportá-lo para locais mais afastados da costa (Borma et al 1999).

Em países como o Japão, por exemplo, esta atividade de dragagem é muito freqüente em se tratando de uma ilha com intensa atividade industrial. Constantemente são detectados sedimentos contaminados até mesmo por metais pesados e dioxinas (Mori et al 2002).

Borma et al (1999) explicam que um importante ponto de partida para a regulamentação da disposição de materiais contaminados em oceanos foi a Convenção de Londres de 1972, da qual o Brasil é signatário. Tendo como enfoque a preservação ambiental marinha em relação aos mais diversos tipos de contaminantes, esta convenção reconhece que a dragagem é essencial para o desenvolvimento e manutenção das atividades portuárias. Reconhece também que a maior parte dos sedimentos provenientes de atividades de dragagem é, por sua natureza, de baixa ou nula contaminação, sendo somente uma pequena parcela contaminada, resultado da emissão de substâncias perigosas. A essa parcela de material

contaminado devem ser aplicadas restrições ambientais até que seja efetuado um controle na fonte.

Para tratamento diferenciado do sedimento de dragagem em relação aos demais resíduos, foi criada, dentro da estrutura da Convenção de Londres, uma série de diretrizes especiais para disposição de sedimentos dragados, publicada sob a forma de uma Estrutura Geral para Avaliação de Material Dragado (DMAF – Dredged Material Assessment Framework), adotada como parte integrante desta convenção em dezembro de 1995 (IMO 1995).

O estudo feito por Borma et al (1999) mostra que, para efeito de caracterização e avaliação do impacto ambiental resultante das várias formas de disposição, as características físico-químicas do material em questão, bem como os mecanismos controladores da mobilização, transporte e retenção dos contaminantes presentes no sedimento devem ser entendidos, qualificados e quantificados.

## **2.5 Lodos**

### **2.5.1 Lodos industriais**

Os resíduos industriais incluem desde os perigosos até os inertes. Embora, em sua grande maioria, possuam baixo teor de matéria orgânica, sobretudo os de classe I, seus percolados apresentam poder poluidor geralmente maior do que os resíduos domiciliares, por encerrarem substâncias extremamente tóxicas, mesmo em concentrações muito baixas (ppm a ppb), tais como componentes orgânicos e metais pesados diversos. Os resíduos sólidos são dispostos em aterros industriais e os efluentes líquidos em lagoas de efluentes e poços de injeção (Tressoldi e Consoni 1998).

Entretanto, algumas indústrias como a de cerveja e a de papel, por exemplo, geram lodos com grande porcentagem de matéria orgânica. Estas indústrias tratam os efluentes do esgoto interno juntamente com os efluentes gerados em suas atividades. Isto resulta também em um de lodo com composição rica em matéria orgânica o qual necessita de desaguamento antes de ser depositado em aterros.

### **2.5.2 Lodos oleosos**

Um bom exemplo de lodo oleoso é o proveniente das atividades de refino do petróleo.

Segundo Watts (1997), o processo de refino pode se dar por três diferentes modos: a separação (destilação), a conversão (lavagem) e a melhoria do petróleo.

Os resíduos dessas atividades possuem alto grau de poluição, em virtude da presença de hidrocarbonetos na sua composição e também de outros compostos orgânicos do nitrogênio, do enxofre e do oxigênio.

Atualmente este tipo de lodo passa pelo processo de desaguamento mecânico e segue direto para o aterro apropriado, uma vez que, quando dispostos em lagoas, sua consistência se torna pastosa podendo formar crostas que impedem a eliminação por evaporação da água presente (Fowler et al 2002).

### **2.5.3 Lodo de estação de tratamento de esgoto**

O resíduo resultante do tratamento do esgoto é proveniente de uma série de etapas às quais estarão submetidas as águas residuárias. Também é comum algumas indústrias tratarem seus efluentes junto com o esgoto gerado pela própria empresa. Dessa forma, o lodo resultante do tratamento do esgoto doméstico costuma ter composição bem diferente do lodo resultante do tratamento de um esgoto industrial (<http://www.uniagua.org.br/default.asp?tp=3&pag=tratamento.htm.as>).

As pesquisas e o desenvolvimento relacionados ao tratamento e disposição de lodo de esgoto têm aumentado nos últimos anos. Há também um aumento no conhecimento da taxa de produção, métodos de caracterização, técnicas de manejo e processamento, benefícios e riscos da utilização do lodo na agricultura e também do comportamento do lodo no meio ambiente. Como os lodos diferem consideravelmente entre si, as estações de tratamento de esgotos produzem lodos de características diferentes, de forma que não há uma solução geral para todas as situações (Chagas 2000).

Com o crescente número de instalações para o tratamento de esgoto, tanto doméstico como industrial e o necessário incremento no grau de tratamento, a quantidade de lodo a ser tratada aumentará. A tarefa do tratamento do lodo e a sua disposição assumirão então um lugar significativo no controle da qualidade ambiental. O lodo é um sinal visível do tratamento de esgoto, contendo todas as substâncias que tenham sido alteradas por processos físico-químicos ou biológicos e uma mistura complexa de sólidos de origem biológica e mineral que são removidos do esgoto. Sua qualidade é modificada com o uso indiscriminado por parte da sociedade moderna de diversos produtos químicos, que poderão ser lançados nas redes coletoras de esgoto e, por conseqüência, estar presentes no lodo. Apesar disso, o lodo

originado pelos processos de tratamento de esgotos pode ter como um dos possíveis destinos finais a sua utilização na agricultura como insumo, principalmente pela presença de nutrientes e humos. Entretanto, este recurso deve ser explorado com segurança, pois no lodo podem estar presente substâncias contaminantes ao solo.

No caso do lodo de esgoto, os componentes perigosos são os metais pesados, as bactérias, vírus, protozoários e helmintos. A descarga desses componentes, bem como a dos nutrientes nitrogênio e fósforo na superfície e no lençol freático, deve ser minimizada para que se evite a degradação da qualidade da água.

A quantidade e a qualidade do lodo produzido varia dependendo da região geográfica, dos processos de tratamento do esgoto e lodos, da sua secagem (um lodo seco ainda contém 50% de umidade), e ainda, da população contribuinte ou dos efluentes industriais que porventura são lançados na rede coletora formando uma significativa parcela dos esgotos municipais.

A necessidade de se dar um destino adequado aos lodos oriundos de estações de tratamento de esgotos despertou um grande interesse pelo seu baixo custo combinado aos benefícios alcançados pela sua associação ao solo. Estas melhorias do solo são possíveis por haver um aproveitamento dos nutrientes presentes no lodo, haver uma melhoria nas propriedades físicas do solo por ação do alto teor de matéria orgânica tratada que confere ao solo uma menor densidade por aumento da sua porosidade total, o que melhora suas condições de retenção de água, substituindo, em boa parte dos casos, a utilização de fertilizantes artificiais (Chagas 2000).

O lodo de esgotos é um fertilizante de composição extremamente variável e, comparativamente aos fertilizantes químicos tradicionais, as diferenças desfavoráveis aos lodos, inerentes aos custos de transporte, manuseio, aplicação e monitoramento, decrescem ao longo dos anos, em virtude do incremento dos custos da energia necessária à produção dos fertilizantes comerciais. Isto tende a viabilizar os processos de desaguamento deste tipo de lodo.

## **2.6 Técnicas de desaguamento convencionais**

### **2.6.1 Desaguamento mecânico**

Os tipos mais comuns de desaguamento mecânico são os métodos que utilizam centrífugas e filtros-prensa. Ambos são equipamentos que necessitam de uma dosagem de floculante



adicionada ao lodo para aumentar a eficiência na hora da separação da parte sólida da parte líquida, de modo a aproximar as condições de umidade do material à percentagem de sólidos desejada, uma vez que, para que um resíduo seja transportado ao seu destino final, este deve apresentar percentagem de sólidos igual ou superior ao limite estabelecido pelos órgãos responsáveis por este setor, que no caso do estado de São Paulo, por exemplo, é a CETESB (CETESB 2004).

Uma vantagem dos métodos mecânicos sobre o processo de secagem natural de lodo, que são as lagoas de sedimentação, é o tempo em que este processo ocorre, uma vez que o desaguamento mecânico permite que muitos metros cúbicos sejam desaguados em questão de horas e as lagoas concentram o material por meses ou até anos.

Os principais tipos de desaguamento mecânico são:

a) Desaguamento por centrifugação

As centrífugas são bastante usadas para desaguamento de lodo no meio industrial e os variados tipos e modelos permitem que sejam adequadas a cada tipo de material.

As centrífugas separam os sólidos da água por diferença de força centrífuga. Para que seja obtida uma água razoavelmente limpa, é necessário conservar no lodo uma porcentagem relativamente elevada de água, obrigando a uma secagem posterior por outro processo. O lodo molhado é introduzido axialmente e sob a influência da força centrífuga, os sólidos em suspensão se depositam na parede interna do tambor. Daí são empurrados pela rosca, que gira a uma velocidade um pouco maior, para a extremidade de menor diâmetro, onde saem da camada líquida, sendo então descarregados. O líquido intersticial sai do tambor pelo lado do diâmetro maior através de um vertedor em forma de disco (Chagas 2000).

A perspectiva de uma centrífuga decantadora do modelo Decanter tipo CA 505 pode ser vista na Figura 2.1, onde é mostrado o processo de entrada do material e saída do fluido filtrado (Reali et al 1999).

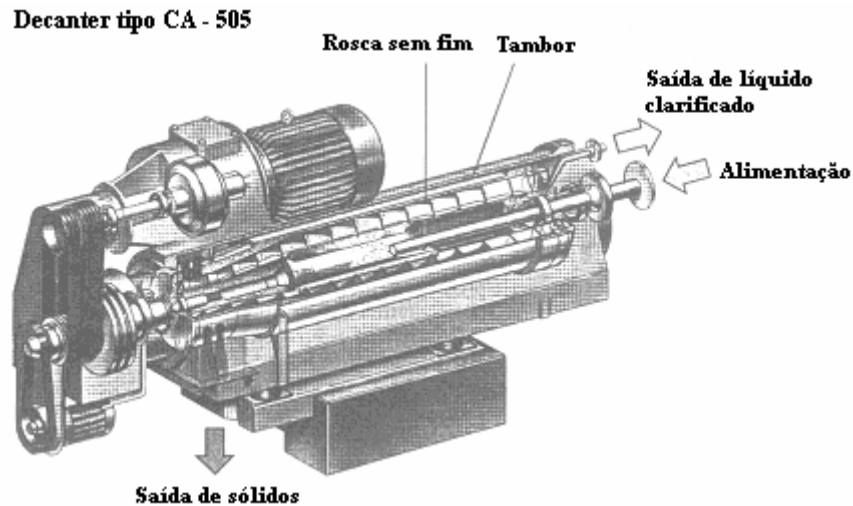


Figura 2.1: Perspectiva de uma centrífuga decantadora do modelo Decanter tipo CA 505  
(Fonte: Westfalia Separator do Brasil Ltda, citado por Reali et al 1999)

#### b) Desaguamento por filtro – prensa

Segundo Chagas (2000), os filtros-prensa são filtros de pressão constituídos de placas de ferro entre as quais se prendem os panos filtrantes.

O lodo é submetido durante algumas horas a uma pressão específica para as suas condições de umidade, sendo depois removido manual ou mecanicamente em estado sólido ou “tortas”. Durante a operação, o teor de umidade cai brutalmente, reduzindo o seu volume. Observa-se que as telas filtrantes devem ser limpas periodicamente. A Figura 2.2 mostra um tipo de filtro-prensa e a Figura 2.3 o seu mecanismo.



Figura 2.2: Filtro-prensa do tipo diafragma (Fonte: Netzsch)

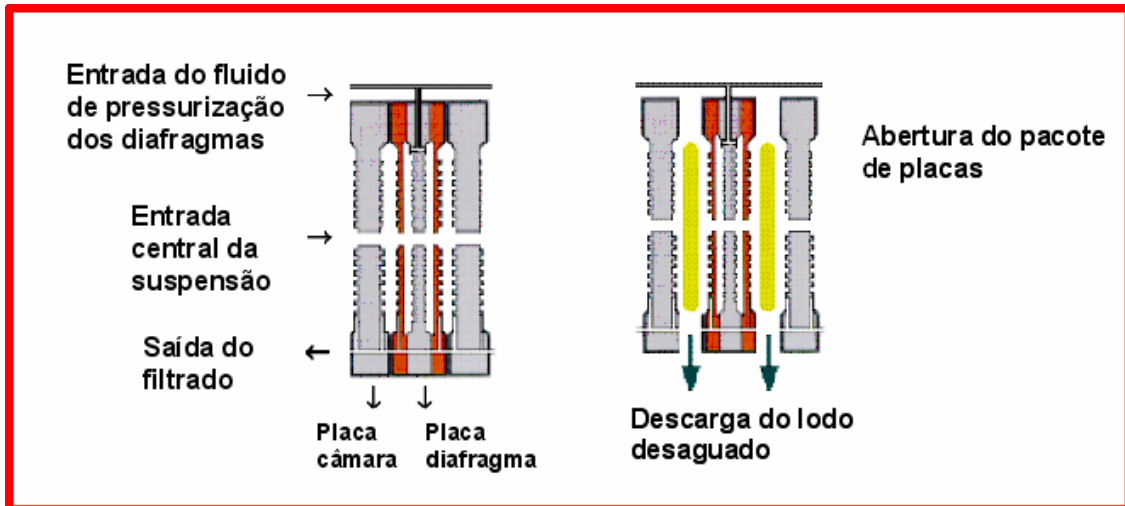


Figura 2.3: Mecanismo de funcionamento das câmaras de um filtro prensa do tipo diafragma  
(Fonte: Netzsch)

### c) Desaguamento por prensa contínua

A prensa contínua de esteiras possui geralmente duas correias “sem-fim” em movimento contínuo, das quais pelo menos uma é constituída por uma tela filtrante. As duas esteiras são progressivamente apertadas uma contra a outra por meio de roletes. O espaçamento entre elas e a velocidade de translação são reguláveis. O lodo é flocculado e espremido com pressão crescente entre as duas esteiras, saindo já com seu teor de umidade reduzido. A tela filtrante é lavada por esguichos durante o ciclo (Chagas 2000).

A Figura 2.4 exemplifica uma prensa desaguadora em que três operações básicas são efetuadas: a primeira é o condicionamento do material, a segunda é uma drenagem gravitacional e a terceira é a compactação do lodo, por meio de forças de compressão. O lodo é distribuído na esteira e dispositivos automáticos permitem o controle da seqüência operacional (Cordeiro 1999).

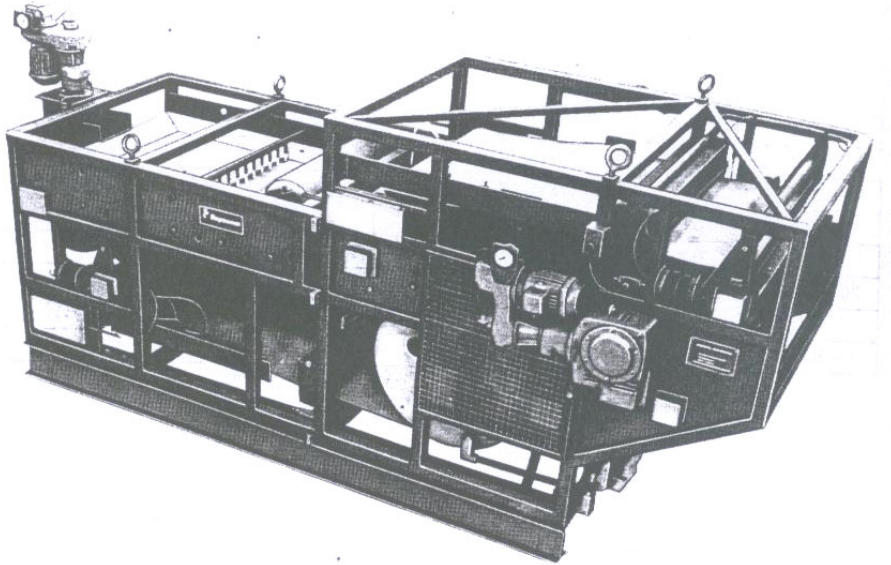


Figura 2.4: Prensa desaguadora (Fonte: Degremont, citado por Cordeiro 1999).

### 2.6.2 Disposição em lagoas e valas

As lagoas de sedimentação funcionam geralmente como reservatórios temporários para a contenção de resíduos, que são na sua grande maioria de origem industrial.

O tempo de permanência do resíduo nas lagoas é função do seu teor de umidade e das condições de decantação do material contido.

O projeto de uma lagoa engloba desde a fase de construção até o seu fechamento.

A fim de evitar a contaminação dos solos adjacentes à lagoa, lençóis freáticos e águas subterrâneas por meio de infiltração de poluentes, este projeto deve conter um sistema de barreira de fluxo baseado num estudo prévio do resíduo a ser depositado, incluindo também o que diz respeito ao monitoramento de vazamentos. A profundidade da lagoa deve ser dimensionada com base no volume depositado e levando em consideração os períodos de chuva.

A fase de fechamento de uma lagoa de sedimentação conta com duas opções. A primeira é a remoção dos resíduos e descontaminação total do local, tudo isso sob a responsabilidade do proprietário ou operadora. A segunda opção ocorre quando o resíduo não pode ser removido. Sendo assim, este é mantido no local e estabilizado de forma a reduzir ao máximo o seu teor de umidade e uma proteção para o local deve ser providenciada.

### 2.6.3 Leitões de secagem

Conforme explicado por Jordão (1975), leitões de secagem são unidades de tratamento, geralmente em forma de tanques retangulares, projetadas e construídas de modo a receber o lodo dos digestores (ou de unidades de oxidação total), onde se processa a redução de umidade com a drenagem e evaporação da água liberada durante o período de secagem.

Para a construção dos tanques, geralmente, de formas retangulares, são feitas as paredes (de alvenaria, concreto ou terra), a camada drenante e a cobertura (opcional). A camada drenante é constituída da camada suporte (geralmente feita de tijolos), do meio filtrante e de um sistema de drenagem.

O funcionamento dos leitões de secagem é um processo natural de perda de umidade que se desenvolve devido aos seguintes fenômenos:

- Liberação dos gases dissolvidos ao serem transferidos do digestor (pressão elevada) e submetidos à pressão atmosférica nos leitões de secagem;
- Liquefação devido à diferença de peso específico aparente do lodo digerido e o da água;
- Evaporação natural da água devido ao contato íntimo com a atmosfera;
- Evaporação devido ao poder calorífico do lodo

O lodo em condições normais de secagem poderá ser removido do leito de secagem após um período, que varia de 20 a 40 dias, cuja umidade atinge valores de 70 a 60%.

É importante lembrar que este tipo de disposição só deve ser carregado com lodo na fase final da digestão e que o lodo só é considerado seco quando possui boas qualidades de remoção (com pá) e transporte, o que somente é possível quando o lodo atinge teor de umidade em torno de 70%.

A ausência de equipamentos de remoção de lodo, nos leitões de secagem, reduz os cuidados com a segurança. A atenção maior quanto à contaminação é em relação ao manuseio do lodo seco devido à presença de microorganismos patogênicos (Jordão 1975).

## 3 SISTEMAS TUBULARES DE GEOTÊXTIL

### 3.1 Concepção

Um sistema tubular de geotêxtil destinado à contenção de material contaminado tem por objetivo reter a parte sólida deste material, permitindo a passagem do fluido. Paralelamente a isto, tem como compromisso resistir às elevadas tensões ao qual todo o sistema está submetido.

Um tubo para esta finalidade pode ou não ser confeccionado com duas camadas de geotêxtil, em função da solicitação. Em se tratando de um tubo com duas camadas, define-se a função da primeira camada, ou a mais interna como sendo a responsável pela filtração e a segunda, ou a mais externa, como sendo a responsável pela resistência às tensões geradas. Tem-se, em geral, um geotêxtil não tecido na camada interna e um geotêxtil tecido na camada externa (Pilarczyk 2000, Moo-Young e Tucker 2002).

As mantas de geotêxtil são costuradas com uma costura compatível com o meio ao qual será exposta e principalmente com uma resistência suficiente aos esforços gerados durante o processo de preenchimento (instante crítico) e consolidação (quando as tensões vão sendo aliviadas).

Estes tubos podem ser de vários tamanhos dependendo de alguns fatores tais como a quantidade de material a ser contido e a disponibilidade de espaço físico para acomodar os tubos durante o desaguamento.

O local para desaguamento também é função de algumas considerações, entre elas, o reaproveitamento ou não do fluido drenado e deve ser escolhido e preparado de acordo com a natureza dos contaminantes presentes. Para um eficiente sistema de coleta da parte líquida, seja ela para descarte ou reutilização, um pátio impermeabilizado deve ser providenciado para a acomodação dos tubos.

Um esquema geral é montado no sentido de otimizar ao máximo a seqüência do processo, desde o bombeamento do resíduo até o direcionamento do líquido coletado, conforme a Figura 3.1.

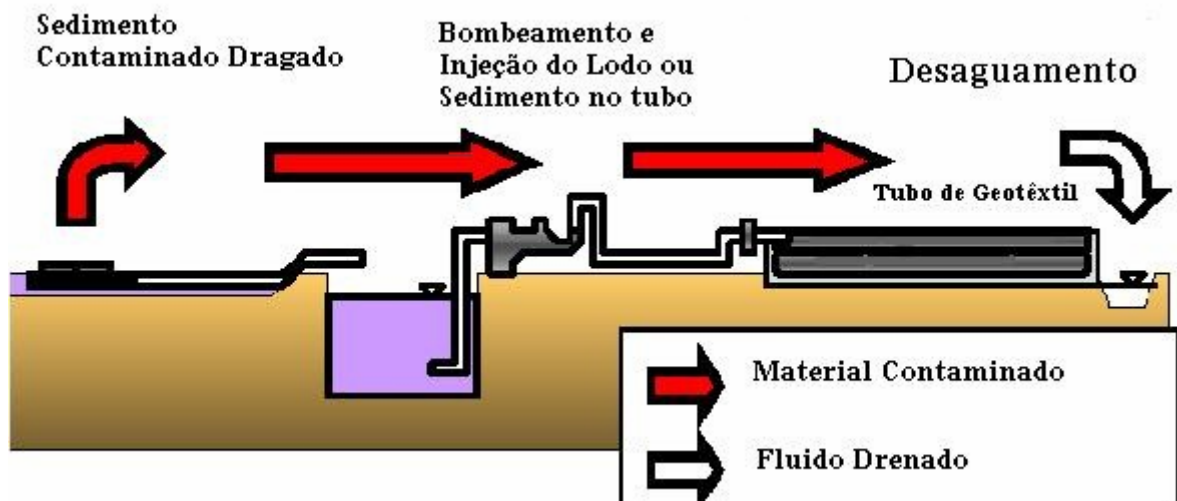


Figura 3.1: Esquema geral de enchimento e desaguamento (Mori et al 2002)

### 3.2 Aplicações em lodos de estações de tratamento de esgoto (ETEs)

Conforme publicação de Fowler et al (2002), um exemplo que se pode citar da aplicação de tubos de geotêxtil em estações de tratamento de esgoto é o que aconteceu na cidade de Vicksburg – Mississipi – EUA, onde o estímulo para a aplicação desta técnica foi o fato de a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) e o Departamento de Qualidade do Meio Ambiente do Estado do Mississipi limitarem o uso de lagoas de sedimentação de resíduos, em especial as utilizadas para a disposição de efluentes de esgotos. A proibição foi feita sem ser providenciada uma alternativa economicamente viável para os futuros resíduos gerados.

Desta forma, em 1995, foram desenvolvidos ensaios de filtração e consolidação para demonstrar que os tubos de geotêxtil seriam eficientes no processo de desaguamento e no que se refere à qualidade da água drenada. Estes testes foram direcionados a analisar resíduos de duas lagoas de sedimentação de esgoto da cidade de Vicksburg onde estavam presentes, entre outros componentes, cal e sulfato de alumínio em suas composições.

Foram realizados testes para a avaliação da eficiência da filtração e consolidação no desaguamento, para a verificação da presença de metais pesados no fluido drenado e, para completar o estudo, um tubo de geotêxtil em verdadeira grandeza foi construído para análise do seu comportamento no desaguamento.

O primeiro teste foi realizado em duas bolsas de geotêxtil (“bag test”), conforme ilustra a Figura 3.2, e teve por objetivo avaliar o desaguamento para percentagens de sólidos diferentes.

Não se observaram diferenças significativas no desempenho quanto à capacidade de desaguamento dos geotêxteis que se definiram por não-tecido de poliéster a amostra 1 e por não-tecido de polipropileno a amostra 2.

Os resultados destes ensaios estão expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resultados do ensaio de filtração (Fowler et al 2002)

|                  | <b>Percentagem de Sólidos Inicial (%)</b> | <b>Acréscimo na Percentagem de Sólidos (%)</b> | <b>Tempo de Desaguamento (dias)</b> |
|------------------|---|--|-------------------------------------|
| <b>Amostra 1</b> | 6,60                                      | 31,00  | 128                                 |
| <b>Amostra 2</b> | 14,90                                     | 33,00  | 132                                 |

Na água drenada também foi observado um decréscimo das colônias de coliformes fecais em menos de 29 minutos.



Figura 3.2: Esquema de montagem do “bag test” para duas amostras (Fowler et al 2002).



O segundo teste realizado se concentrou na a avaliação da presença de metais pesados no fluido drenado pelo ensaio de filtração.

A Tabela 3.2 mostra os resultados destes ensaios.

Tabela 3.2: Resultados da análise da presença de metais pesados (Fowler et al 2002).

|                 | <b>Antes do Desaguamento</b><br>(mg/L) | <b>Depois do Desaguamento</b><br>(mg/L) |
|-----------------|--|---|
| <b>Arsênico</b> | 1,40 – 1,52                            | 0,008 – ND                              |
| <b>Cromo</b>    | 1,90 – 4,80                            | ND                                      |
| <b>Níquel</b>   | 3,20 – 5,80                            | 0,13 - ND                               |

ND: Não detectado

Limites aceitáveis (mg/L): Arsênico – 0,005, Cromo – 0,04 e Níquel – 0,01

O terceiro e último teste consistiu na construção de um tubo de geotêxtil de pequeno comprimento, para análise de sua redução de volume em relação ao tempo, ou seja, para uma avaliação da consolidação. O tubo confeccionado para o teste apresentava duas camadas de geotêxtil. A camada externa era composta por um geotêxtil tecido de polipropileno e a camada interna por um geotêxtil não-tecido também de polipropileno, cada um com sua respectiva resistência a tração.

Foi construída uma armação de madeira, revestida com material impermeável para assentamento do “tubo” experimental e coleta do fluido drenado a partir do desaguamento. A pressão da bomba de preenchimento do “tubo” até uma altura de 1,5m foi calculada pelo programa computacional GeoCoPS<sup>TM</sup> (Fowler et al 2002).

A Tabela 3.3 mostra os resultados do ensaio em relação à percentagem de sólidos e densidade volumétrica do material. Após 65 dias de consolidação a altura do tubo passou de 1,5m para 0,44m; em resumo, 90% do adensamento ocorreu em 26 dias, conforme mostram as Figuras 3.3 e 3.4, prazo bem mais longo que o do ensaio com as bolsas (“geobag test”), que para o mesmo resultado levou de 4 a 5 dias (Fowler et al 2003).

Tabela 3.3: Resultados após 65 dias de consolidação (Fowler et al 2002).

|                                   | Situação Inicial | Após 32 dias | Após 65 dias |
|-----------------------------------|------------------|--------------|--------------|
| <b>Percentagem de sólidos (%)</b> | 8,0              | 19,20        | 21,40        |
| <b>Densidade Úmida (g/ml)</b>     | 1,05             | 1,13         | 1,27         |

Fowler et al (2002) comentam que o ensaio em bolsas não deve ser usado para previsão de comportamento em consolidação, uma vez que este processo está diretamente ligado à influência do peso próprio do material e do diâmetro do tubo. Cabe lembrar que o experimento realizado por estes autores para análise da consolidação aconteceu em “tubo” de pequeno comprimento, que não simula a condição de fluxo real de campo, o que também subestima o tempo de consolidação.



Figura 3.3: Tubo experimental preenchido até 1,5 m (Fowler et al 2002).



Figura 3.4: Tubo após 26 dias de consolidação (Fowler et al 2002)

Outro exemplo de aplicação desta técnica no desaguamento de efluentes de esgoto ocorreu em 1999, na cidade de Kansas City – Kansas – EUA, quando a empresa Enviro-Klean, Inc., visando a redução de peso e volume e, por conseguinte, a diminuição de custos de lançamento do material no seu estado final em aterros apropriados, patrocinou a aplicação desta técnica aos resíduos do esgoto municipal (Fowler et al 2002).

Para isto foram confeccionados 19 grandes tubos que se encarregaram de consolidar um total de  $2027\text{m}^3$  de resíduos bombeados do digestor.

Todos os tubos foram dispostos em uma grande área impermeabilizada com uma membrana de polietileno, visualizada nas Figuras 3.5 e 3.6, a fim de permitir a coleta do fluido drenado e sua condução à estação de tratamento dos efluentes.

Quando os tubos, devido à consolidação, chegavam à metade da altura inicial, eram novamente enchidos, sendo repetido este procedimento até 4 vezes.

A porcentagem de sólidos passou de 9,7% (início do processo de desaguamento nos tubos) para 24,8% e seu volume foi reduzido a  $1824\text{m}^3$ .

Ao fim do desaguamento foi constatada uma melhoria na qualidade do fluido drenado e uma redução na contagem de colônias de bactérias.

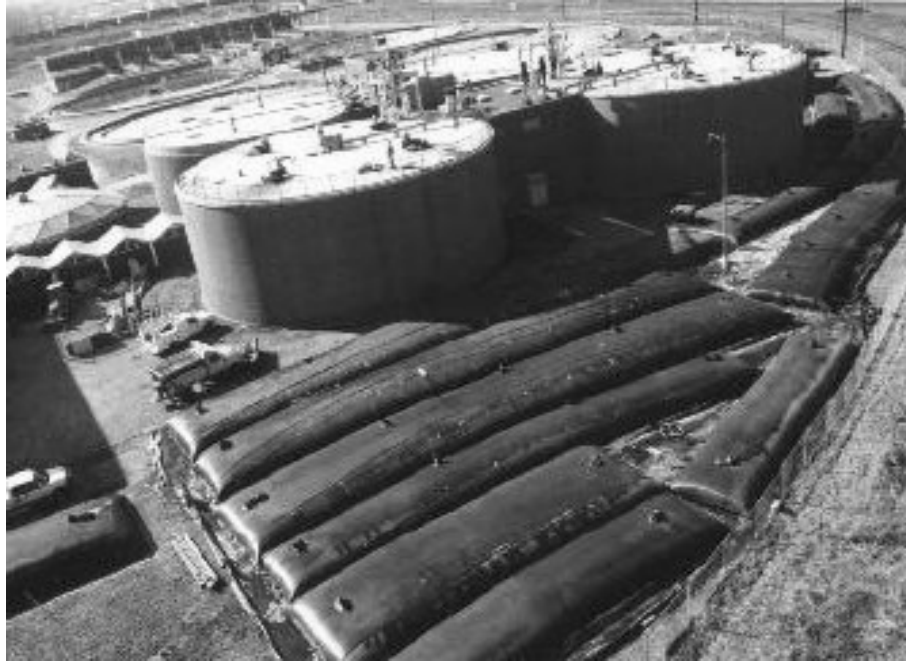


Figura 3.5: Os 19 tubos no pátio asfaltado (Fowler et al 2002).



Figura 3.6: Tubos preenchidos (Fowler et al 2002).

### 3.3 Aplicações em resíduos de refinaria de petróleo

Um bom exemplo de aplicação desta técnica a resíduos de petróleo é o que aconteceu em Catlettsburg – Kentucky – EUA, em 1999 (Fowler et al 2002).

A divisão responsável pelo gerenciamento de rejeitos do estado de Kentucky recebeu em setembro de 1998 a notificação do fechamento, em dezembro de 1999, de um aterro de resíduos, que funcionava há 22 anos dispendo material considerado perigoso de uma refinaria de petróleo.

A unidade de tratamento do fluido na superfície do resíduo consistia em um reservatório com base de concreto, onde era utilizado como método de tratamento a precipitação química, ozonização e processos de carbono granular ativado, antes do descarte em um riacho próximo ao local. Todo este processo era monitorado pelo Departamento de Segurança Ambiental do Estado do Kentucky, que exigiu a remoção dos sedimentos deste reservatório antes do fechamento do aterro.

Devido às limitações do local para a retirada do material, foi escolhida uma máquina especial de dragagem (Dry DREdge<sup>TM</sup>), conforme ilustra a Figura 3.7, que apresentava a vantagem de minimizar a ressuspensão dos sedimentos. Para a contenção do material removido foi utilizada a técnica de desaguamento com tubos de geotêxtil.

As propriedades do sedimento foram estudadas cuidadosamente a fim de caracterizá-lo granulometricamente e determinar seus Limites de Atterberg, averiguando a percentagem de sólidos e seu teor de umidade, detalhes importantes na utilização desta técnica. A Figura 3.8 apresenta a curva granulométrica das amostras retiradas do material (Fig.3.8 a) e apresenta os resultados obtidos (Fig.3.8 b).

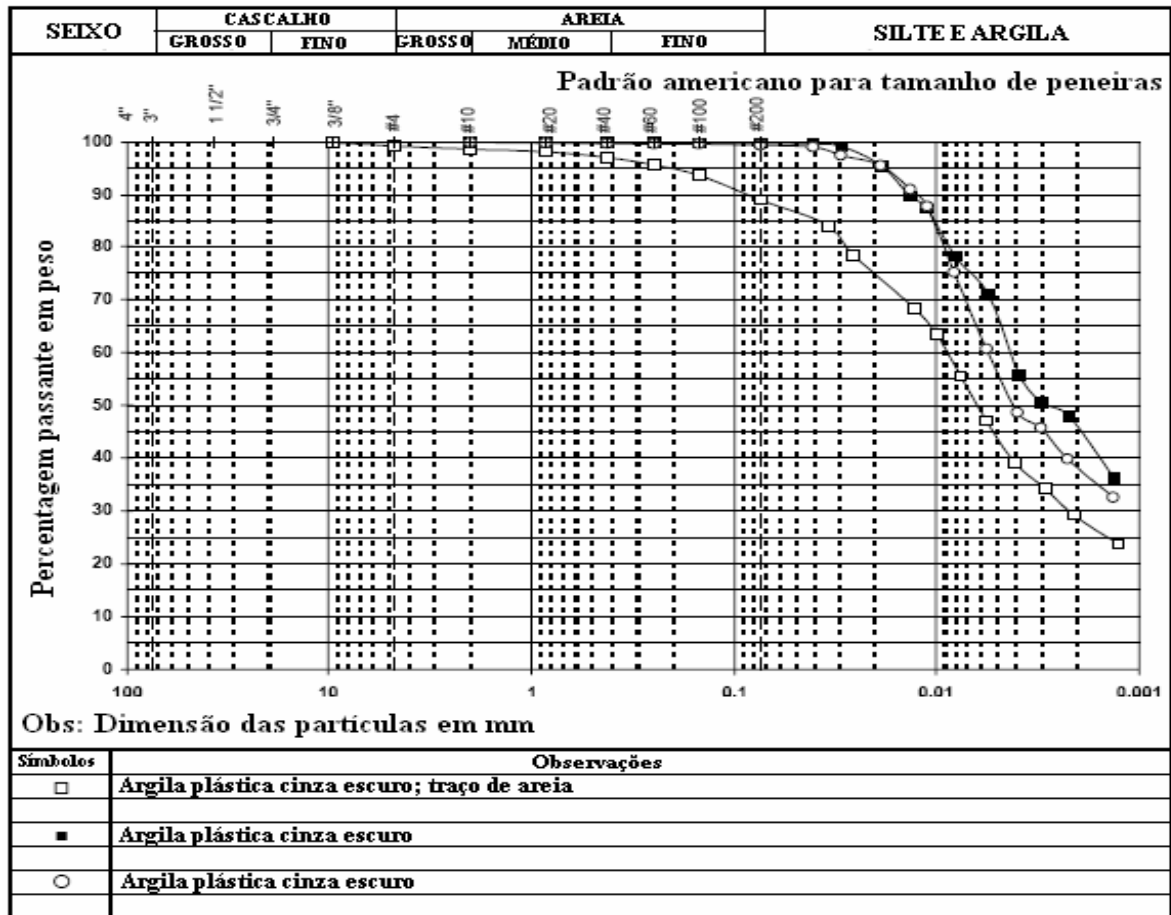
No projeto do tubo de geotêxtil estipularam-se medidas específicas para a geometria do tubo: circunferência (27,4 m), altura (1,5 m), comprimento (48,8 m), sendo sua densidade volumétrica e fatores de segurança para a costura, fluência do produto e degradação biológica obtidos utilizando um programa computacional (Geosynthetic Applications Program – GAP), que admitia como hipótese o tubo sendo preenchido por material fluido e a ausência de resistência ao cisalhamento. A Figura 3.9 apresenta uma foto do tubo de geotêxtil preenchido até a altura de 1,5m.



Figura 3.7: Dry DREdge™ removendo os sedimentos (Fowler et al).

Os resultados foram considerados satisfatórios do ponto de vista mecânico, pois para uma solicitação em tração de projeto calculada em  $45,4\text{kN/m}$  existia uma resistência disponível de  $52,5\text{kN/m}$ .

Este projeto teve seu início em abril de 1999 e estava completo em junho do mesmo ano. Aproximadamente  $3823\text{m}^3$  de material foram dragados do reservatório e imediatamente bombeados para cinco tubos de geotêxtil colocados ao lado do reservatório. O líquido filtrado do sistema de desaguamento foi encaminhado para um sistema de coleta e reconduzido ao reservatório. O uso da tecnologia da draga especial Dry DREdge™ e toda a praticidade e eficiência do desaguamento em tubos de geotêxtil, que conta com grande economia de tempo, evitando também o transporte, implicaram em uma economia de um milhão de dólares em relação a técnicas tradicionais (Fowler et al 2002).



(a) Curva granulométrica

| Tamanho Partículas (Peneira #)                  | Percentagem de finos |       |       |              |      |      |       |
|---|----------------------|-------|-------|--------------|------|------|-------|
|   | □                    | ■     | ○     | Símbolo      | □    | ■    | ○     |
| 4"  |                      |       |       | Amostra      | 1    | 2    | 3     |
| 3"  |                      |       |       | (%) cascalho | 0.7  |      |       |
| 1 1/2"  |                      |       |       | % areia      | 10.2 | 0.2  | 0.5   |
| 3/4"  |                      |       |       | % finos      | 89.1 | 99.8 | 99.5  |
| 3/8"  | 100.0                |       |       | % -2 $\mu$   | 29   | 45   | 38    |
| 4   | 99.3                 |       |       | Cc           |      |      |       |
| 10  | 98.7                 | 100.0 | 100.0 | Cu           | 45   | 57   | 60    |
| 20  | 98.2                 | 100.0 | 99.9  | LL           | 22   | 24   | 25    |
| 40  | 97.2                 | 100.0 | 99.8  | PI           | 23   | 33   | 35    |
| 60  | 95.7                 | 99.9  | 99.7  | USCS         | CL   | CH   | CH    |
| 100   | 93.8                 | 99.9  | 99.7  | w (%)        | 64.1 | 91.8 | 104.4 |
| 200   | 89.1                 | 99.8  | 99.5  |              |      |      |       |
| <b>DISTRIBUIÇÃO POR DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS</b> |                      |       |       |              |      |      |       |
| Ashland Rt. 3 Landfill                          |                      |       |       |              |      |      |       |
| <b>Projeto</b>                                  | <b>Março de 2000</b> |       |       |              |      |      |       |
| 38-08E06139                                     |                      |       |       |              |      |      |       |
| <b>URS Greiner Woodward Clyde</b>               |                      |       |       |              |      |      |       |

(b) Resultados de ensaio

Figura 3.8: Caracterização do material dragado (adaptado de Duke et al 2000).



Figura 3.9: Tubo de geotêxtil preenchido até a altura de 1,5 m (Fowler et al 2002)

### 3.4 Aplicações em sedimentos

#### 3.4.1 Contaminados

Assim como em outros países, no Japão é utilizada a dragagem de áreas alagadas para a manutenção da profundidade a fim de se evitar o transbordamento dessas áreas. Infelizmente, muitos contaminantes, entre eles, alguns metais pesados, vêm sendo encontrados misturados aos sedimentos.

Com a intenção de utilizar uma técnica mais viável economicamente em relação às técnicas convencionais de remediação deste tipo de material, decidiu-se efetuar alguns ensaios em laboratório de filtração em três amostras retiradas de duas diferentes regiões contaminadas, a título de estudo do comportamento desses resíduos.

O material das amostras foi peneirado no intuito de excluir grãos com diâmetros maiores do que 20mm. A amostra 1 estava contaminada com arsênico, chumbo e policlorinato bifenil; a amostra 2 estava contaminada com dioxinas e na amostra 3 foi adicionada areia limpa à amostra 2 a fim de criar uma terceira amostra com baixo teor de dioxinas.



No ensaio de lixiviação foi comprovado que os contaminantes eram de difícil dissolução em água e de fácil aderência às partículas de solo.

Para se fazer a escolha do geotêxtil mais adequado, alguns tubos foram confeccionados com diferentes produtos e testados. Foram analisadas espessura, massa por unidade de área e a turbulência das partículas mediante a aplicação de uma pressão de 10kPa.

O geotêxtil que obteve menor resultado no quesito turbulência foi o escolhido. A turbulência é fator de grande importância para esta aplicação, uma vez que está relacionada à aderência dos contaminantes às partículas.

A execução do ensaio de desaguamento procedeu da seguinte forma:

- Foi adicionada a todas as amostras água da torneira na percentagem de 600% a fim de se formar um lama e em alguns casos foi também adicionado um floculante, aumentando a adesão das partículas.
- O material foi injetado nos tubos de 0.2m<sup>3</sup> de volume com bomba elétrica.
- Os tubos foram deixados em repouso por várias horas até sua completa consolidação para, enfim, analisar a presença de contaminantes na água drenada.
- Foram efetuados seis casos, apenas variando os contaminantes, suas concentrações e a adição ou não de floculante.

Nos seis casos a concentração de contaminantes no fluido drenado, manteve-se abaixo dos limites impostos pelo órgão encarregado de administrar os padrões ambientais do Japão, sendo também constatada a eficiência da adição de floculante nos resultados dos ensaios, no que diz respeito à aderência dos contaminantes às partículas de solo, conforme ilustra a Figura 3.10 (Mori et al 2002).

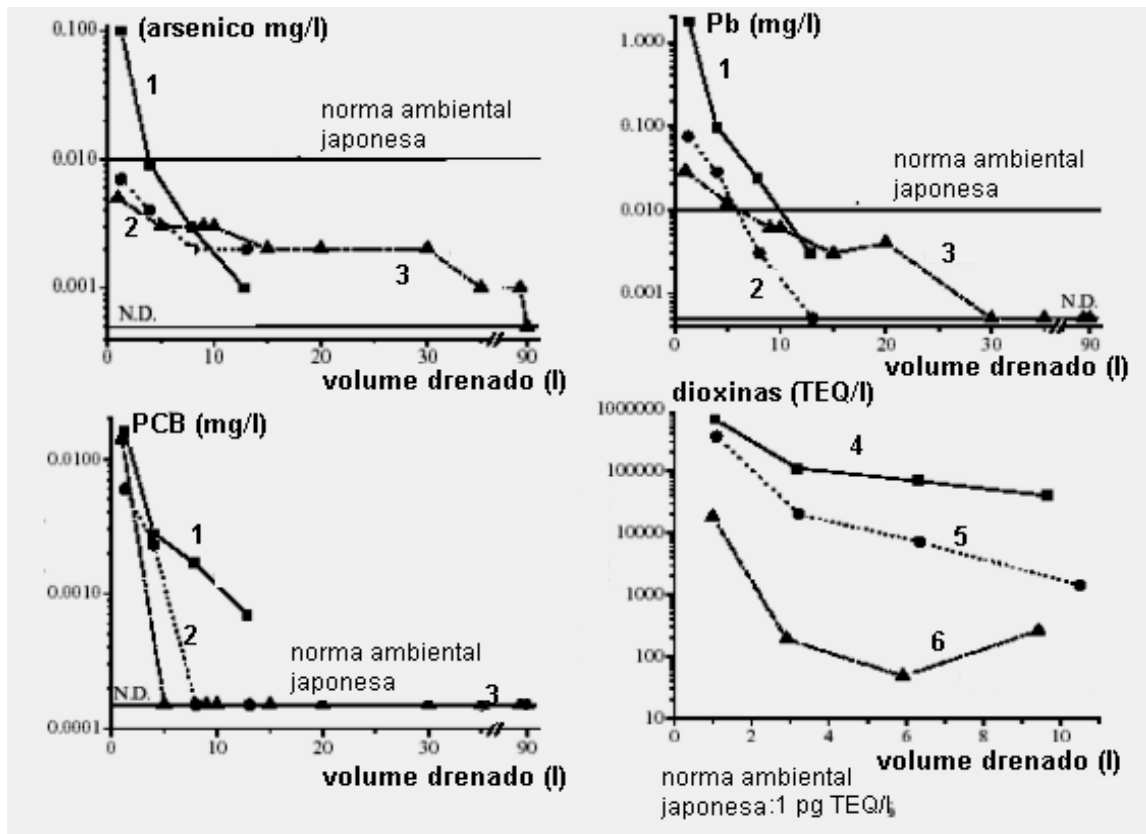


Figura 3.10: Eficiência de contenção dos tubos de geotêxtil para filtração (Mori et al 2002).

### 3.4.2 Não contaminados

O desaguamento por meio de tubos de geotêxtil muitas vezes se torna viável não somente para conter poluentes, mas também em casos de material dragado de granulometria fina e com características muito particulares, que é o caso descrito neste item.

Gaffney et al (2000) relatam que, em agosto de 1997, uma tempestade, que resultou em uma enchente, provocou a invasão da pequena baía de Nacote, costa atlântica de New Jersey – EUA por quase 18350m<sup>3</sup> de material arrastado pelas chuvas. Isto, obviamente, limitou a capacidade de escoamento das chuvas que o corpo d'água tinha anteriormente em virtude do assoreamento sofrido, além da grande quantidade de matéria orgânica que foi depositada, o que também afetou a qualidade da água.

Tanto a cidade como o estado de New Jersey e a Agência Federal de Gerenciamento de Emergências se dispuseram a trabalhar juntos na remoção do material a fim de restaurarem a profundidade original da baía.

Pouca areia foi encontrada na composição do material dragado que foi classificado como uma lama de cor marrom escuro com fragmentos de madeira. Estudos granulométricos

acusaram que quase 100% do material possuía partículas com diâmetro menor ou igual a 0,075mm.

O projeto inicial de retirada e desaguamento do material envolvia a escolha de um reservatório para a lama dragada com 800% de teor de umidade e uma tubulação que conduziria a água decantada que passaria por cima de uma barragem. Esta opção contava com um reservatório do corpo de bombeiros que estava situado em um parque da cidade e enfrentaria, além das medidas de segurança a serem tomadas em relação ao local, a formação de uma crosta superficial que dificultaria a eliminação da água do material o que poderia levar até anos para ser desaguado.

Diante destas dificuldades, surgiu a idéia do desaguamento em tubos de geotêxtil tecido de polipropileno e de alta resistência mecânica.

O projeto foi executado em duas fases com um intervalo de três meses, em virtude do período de desova dos peixes. A primeira fase contou com o preenchimento de 21 tubos que desaguaram durante o intervalo. Na segunda fase mais 8 tubos foram preenchidos.

Com isso foram feitos ensaios de filtração com o material dragado a fim de avaliar o seu comportamento em desaguamento. Observou-se a percentagem de sólidos em suspensão e a formação de “Filter cake”, película que se forma na interface do material que está sendo desaguado e o geotêxtil, dificultando a filtração. Este fenômeno será explicado melhor no capítulo 4.

A eficiência da filtração (EF) foi avaliada em 98,9%, o que indica que apenas uma pequena percentagem de partículas não foi retida pelo geotêxtil. A técnica se mostrou eficiente para o problema uma vez que aproximadamente  $12233\text{m}^3$  de material dragado foi reduzido a  $3823\text{m}^3$  após o desaguamento o que aumentou sua percentagem de sólidos de 11,2% para 37,3% (Gaffney et al 2000).

A Figura 3.11 mostra os tubos preenchidos no pátio revestido.



Figura 3.11: Tubos de geotêxtil preenchidos no pátio de desaguamento (Gaffney et al 2000).

## **4 DIMENSIONAMENTO FACE ÀS SOLICITAÇÕES HIDRÁULICAS**

### **4.1 Introdução**

O desaguamento de material do tipo lodo ou sedimentos dragados, utilizando tubos de geotêxtil, é possível devido à propriedade hidráulica de filtração deste geossintético. Esta propriedade é responsável pela retenção das partículas sólidas e, ao mesmo tempo, permite a livre passagem do fluido presente. Este capítulo trata dos critérios e mecanismos envolvidos neste processo, bem como particularidades de se conter um material de fina granulometria.

Observando a importância da função de conter a massa sólida com livre passagem do fluido em questão, é necessária atenção especial ao que diz respeito ao critério que determinará o nível de retenção e o critério de permeabilidade, buscando sempre uma maior confiabilidade dos métodos utilizados. O critério de sobrevivência será discutido no capítulo sobre solicitações mecânicas.

Alguns fatores gerenciam ou simplesmente exercem influência sobre os mecanismos de filtração do geotêxtil, seja ele tecido ou não tecido. Fatores como a estrutura do próprio geotêxtil, a estrutura do meio a filtrar e as condições de solicitação podem alterar o processo de filtração (Vidal e Urashima 1999).

### **4.2 Propriedades hidráulicas do geotêxtil**

#### **4.2.1 Abertura de filtração**

A abertura de filtração de um geotêxtil é definida como a abertura equivalente ao diâmetro da maior partícula que passa através de seus poros.

O ensaio para a determinação desta característica é o do tipo peneiramento por via úmida que foi adotado pela ISO/EN em 1999 (ISO 12956).

Este tipo de ensaio busca o diâmetro da maior partícula, impondo um número “infinito” de confrontos (cada partícula tenta atravessar o geotêxtil “n” vezes) e provocando situações que alteram a estrutura do geossintético face à repetição das solicitações. Os métodos de dimensionamento devem ter embutidos a experiência de seus autores com os produtos e com o tipo de ensaio que realizaram.

A condição de carregamento normal ao plano da manta, sem tração neste plano, leva geralmente a uma redução da abertura de filtração determinada sem carga normal. Ensaios realizados por Gourc e Faure (1990) mostram uma pequena redução nos valores com o aumento da tensão confinante. Palmeira e Fannin (1998) observam que, para geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos de poliéster, a redução da abertura de filtração é sensível até cerca de 25kPa de carga normal, estabilizando-se para tensões maiores. Estes efeitos estão geralmente a favor da segurança.

Fourie e Addis (1999) discutem as variações na abertura de filtração de geotêxteis tecidos submetidos à tração, mostrando que a abertura de filtração pode ser reduzida para geotêxteis espessos ou aumentada para geotêxteis de baixa massa por unidade de área.

#### **4.2.2 Condutividade hidráulica normal ao plano**

Segundo explicam Vidal e Urashima (1999), a condutividade hidráulica dos geotêxteis normal ao plano é geralmente muito elevada e o estudo de fluxo num corpo-de-prova isolado estaria quase sempre em situação de fluxo turbulento.

A norma proposta pela ISO 11058 (1999) é muito mais interessante, pois contorna o problema do fluxo ser laminar ou turbulento, definindo parâmetros que permitem estabelecer o comportamento do geotêxtil em função do gradiente hidráulico. O princípio do ensaio é bastante simples e as normas contemplam a possibilidade de realizar ensaio a carga constante e a carga variável. No caso de carga variável, o ensaio é muito rápido, exigindo grande precisão dos instrumentos e do sistema de aquisição de dados. O ensaio para a determinação das características do produto pode apresentar como resultado uma carga hidráulica versus velocidade de fluxo, obtendo-se a condutividade hidráulica para a situação que se desejar.

Estes ensaios tratam da condutividade hidráulica normal ao plano da manta, sem confinamento. Conforme comentado no item 4.2.1, geotêxteis compressíveis teriam redução de vazios quando submetidos à tensão normal. A condutividade hidráulica de geotêxteis não tecidos agulhados pode ser estimada a partir da equação similar a proposta por Kozeny-Carman para areias, conhecendo-se o valor para a situação nominal e a variação da porosidade a cada nível de tensão confinante (Vidal e Urashima 1999, Vidal e Righetti 1990).

### **4.3 Mecanismos de filtração**

#### **4.3.1 Influência da estrutura do geotêxtil**

Segundo Vidal e Urashima (1999), a estrutura do geotêxtil interfere no processo de filtração no que diz respeito à sua espessura e ao tipo e dimensão de seus poros, que seria o espaçamento entre as fibras ou filamentos.

Em se tratando de um geotêxtil tecido constata-se um único confronto entre a partícula e o geossintético, o que já determina se a partícula passa ou fica retida. Os poros neste tipo de geotêxtil têm praticamente a mesma forma e dimensão.

O que acontece num não tecido já é um pouco mais complexo, pois além do confronto de superfície, a partícula enfrentará outros confrontos durante sua trajetória ao longo da espessura do geotêxtil. Em se tratando de um não tecido termoligado, as fibras ou filamentos estão em contato direto, devido à fusão parcial que as une, reduzindo a espessura e formando poros de contorno fechado, sendo assim, apesar dos poros serem de dimensão variável, este caso assemelha-se com o que acontece com os tecidos.

Os geotêxteis não tecidos agulhados possuem estrutura tridimensional, ou seja, as fibras ou filamentos praticamente não se tocam (num corte transversal), a menos sob condições de confinamento significativas. Estas condições conferem a estes tipos de geotêxteis uma porosidade de cerca de 90% e a probabilidade do surgimento de novos confrontos para uma suposta partícula que esteja atravessando sua espessura (Vidal e Urashima 1999).

#### **4.3.2 Influência da estrutura do meio a filtrar – filtração de um meio poroso**

Segundo Vidal e Urashima (1999), as condições de um meio poroso podem ser divididas em três situações: material a reter uniforme, material bem graduado e material mal graduado não uniforme.

No caso de material uniforme, conforme ilustra as Figuras 4.1 e 4.2, o comportamento em filtração está diretamente ligado ao sentido do fluxo. Caso o fluxo atue no sentido da gravidade, mesmo que inicialmente ocorra perda de partículas, o movimento destas partículas em direção ao geotêxtil acaba fazendo com que elas tendam a formar um arco sobre o poro,

estabilizando o sistema, desde que os poros não sejam muito maiores do que as partículas, entretanto o fluxo no sentido inverso pode provocar perda contínua de partículas.

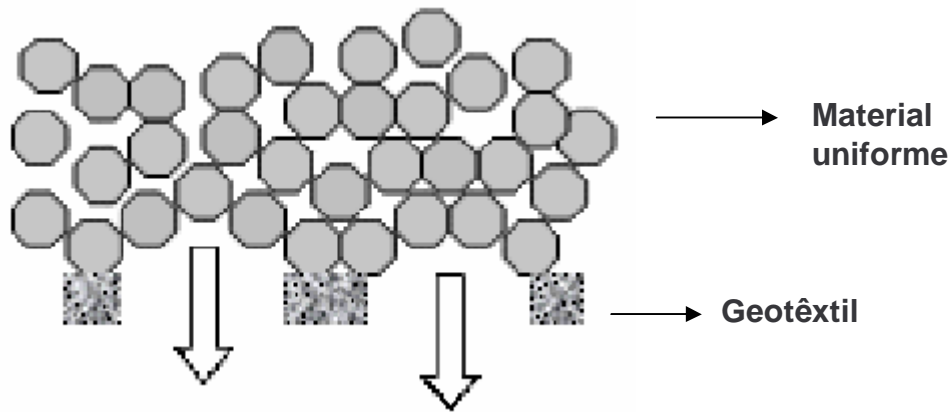


Figura 4.1: Formação de arco devido à direção do fluxo ser a mesma da força da gravidade (Vidal e Urashima 1999).

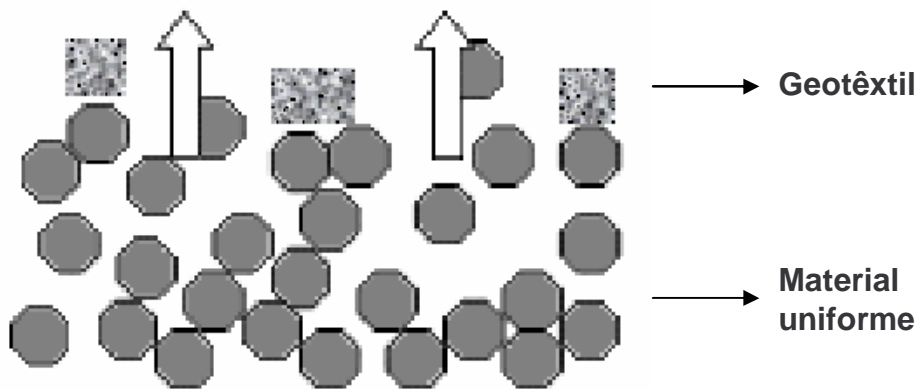


Figura 4.2: Perda de partículas devido à direção do fluxo ser inversa à da força da gravidade (Vidal e Urashima 1999)

No caso de material bem graduado, a eventual movimentação de partículas causada pelo fluxo ocasiona um pré-filtro quando encontra o geotêxtil, pois, à medida que as partículas vão se aproximando dos poros, alguma partícula que seja maior que seu tamanho bloqueia a passagem, retendo as menores, conforme é mostrado na Figura 4.3.



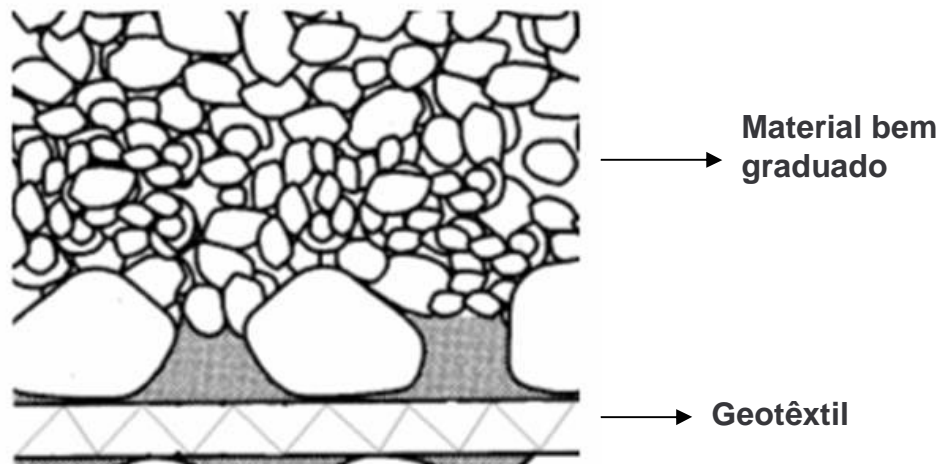


Figura 4.3: Formação de pré-filtro na filtração de material bem graduado (Vidal e Urashima 1999)

Os materiais mal graduados não uniformes (apresentando curva granulométrica com coeficiente de curvatura fora do intervalo entre 1 e 3) podem apresentar sufusão, ou seja, passagem livre das partículas mais finas através da estrutura do solo ou erosão interna, em função das condições do fluxo, conforme é mostrado na Figura 4.4.

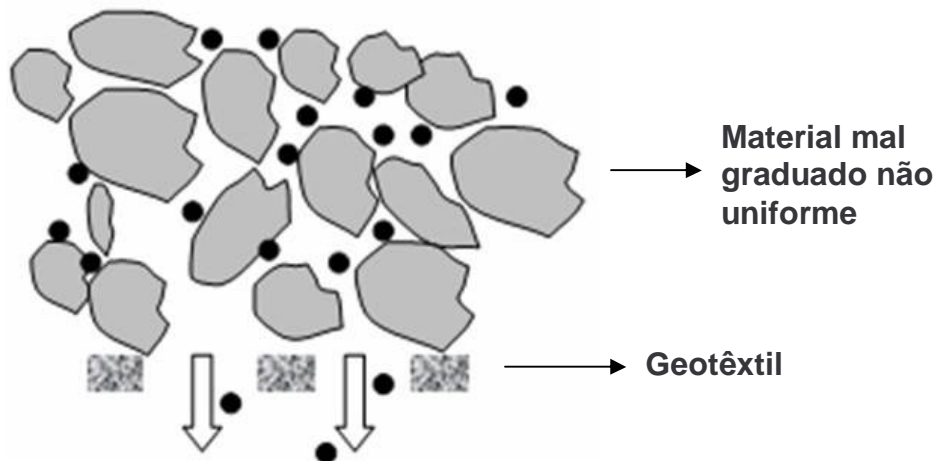


Figura 4.4: Perda de partículas ou sufusão na filtração de material mal graduado não uniforme (Vidal e Urashima 1999)

Em se tratando de um lodo ou sedimento contaminado submetido a um desaguamento, não é interessante que haja esta perda de partículas, mesmo aumentando as poro-pressões e

reduzindo a velocidade de fluxo, ou seja, aumentando o tempo de desaguoamento, pois a intenção deste procedimento é conter o material particulado.

### 4.3.3 Influência da estrutura do meio a filtrar – filtração de partículas em suspensão

Vidal e Urashima (1999) comentam que a filtração em suspensão é um problema crítico, pois, conforme se pode observar na Figura 4.5, devido à perda de carga que ocorre quando a partícula carregada encontra o geotêxtil, mesmo esta sendo muito menor que a abertura de filtração da manta, ela tende a se depositar em sua superfície. Os casos de colmatagem física observados referem-se quase sempre a situações deste tipo.

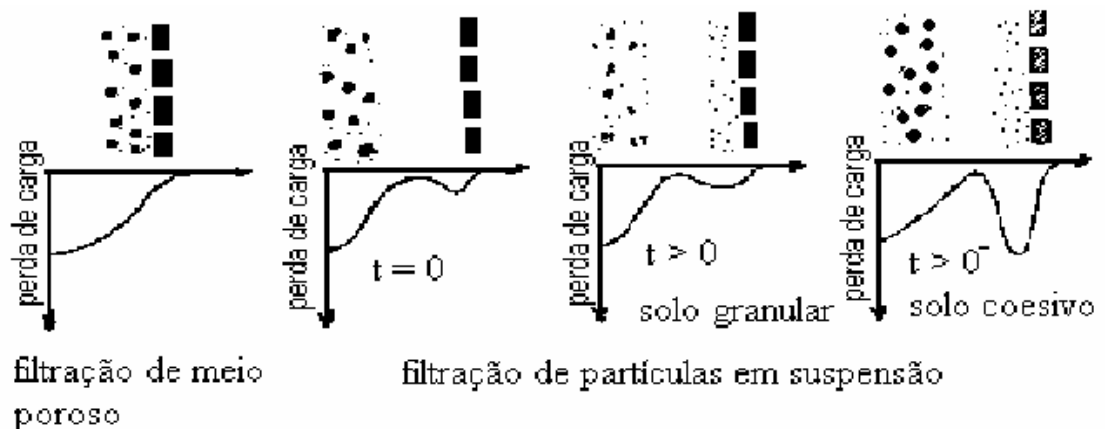


Figura 4.5: Mecanismos de filtração – influência do meio a filtrar (Vidal e Urashima 1999).

Considerando o que ocorre no interior do tubo de geotêxtil, conforme a Figura 4.6 observam-se zonas de filtração em suspensão nas laterais no momento do preenchimento do tubo enquanto que as partículas maiores se depositam mais na região inferior do tubo (Gaffney et al 1999, Moo-Young e Tucker 2002). Esta área das laterais do geotêxtil seria provavelmente colmatada mais rapidamente.

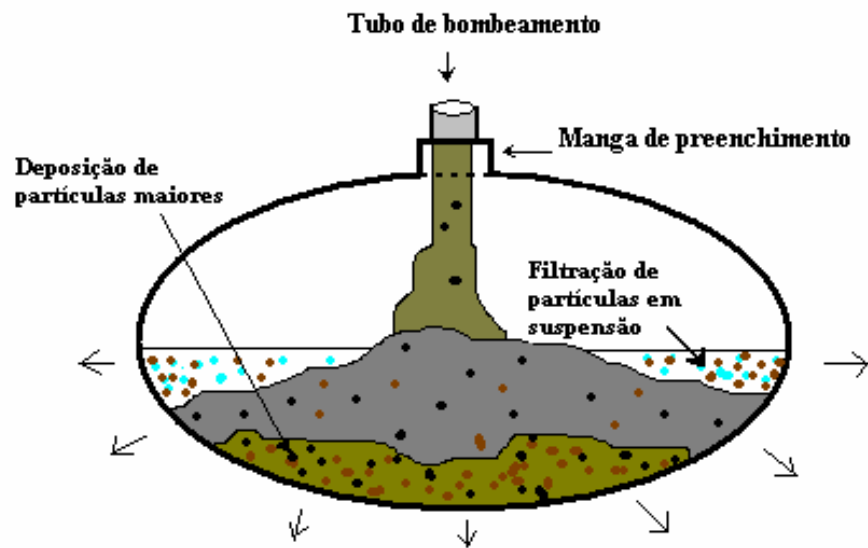


Figura 4.6: Zonas de deposição do material durante o bombeamento

#### 4.4 Critérios de retenção

##### 4.4.1 Critério de retenção convencional

Segundo Vidal e Urashima (1999), um grande número de critérios relacionados à retenção tem sido proposto apresentando diferentes considerações. Christopher et al (1992) expõem a discussão da diversidade de critérios propostos baseados na relação a seguir:

$$O_n < x d_m \quad (4.1)$$

sendo:

$O_n$  = Diâmetro equivalente do poro do geossintético

$n$  = Porcentagem de poros menor do que  $O_n$  (geralmente representada pela abertura de filtração do geotêxtil)

$x$  = Fator semi-empírico estabelecido pelo autor da proposta

$d_m$  = Diâmetro da partícula a reter tal que  $m\%$  das partículas sejam menores do que ela

Como os valores de abertura de filtração necessários ao dimensionamento são função do ensaio realizado, os critérios propostos devem indicar qual o método de ensaio a ele relacionado.

Um dos critérios baseados nesta consideração mais aplicados é o do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG 1986), dado pela equação 4.2.

$$O_{95} < C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot d_{85} \quad (4.2)$$

sendo:

$O_{95}$  = Abertura de filtração do geotêxtil obtida por peneiramento hidrodinâmico

$d_{85}$  = Diâmetro equivalente do solo tal que 85% (em peso) de todas as partículas são inferiores a ele

$C_1, C_2, C_3, C_4$  = Coeficientes dados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Coeficientes para o critério de retenção do CFGG (1986), citado por Vidal e Urashima (1999).

| Coeficiente | Valor | Caso                         |
|-------------|-------|------------------------------|
| <b>C1</b>   | 1,00  | Solo bem graduado            |
|             | 0,80  | Solo mal graduado            |
| <b>C2</b>   | 1,25  | Solo denso e confinado       |
|             | 0,80  | Solo fofo desconfinado       |
| <b>C3</b>   | 1,00  | Gradiente hidráulico $i < 5$ |
|             | 0,80  | $5 < i < 20$                 |
|             | 0,60  | $20 < i < 40$                |
| <b>C4</b>   | 1,00  | Somente para filtração       |
|             | 0,30  | Filtração e drenagem         |

Koerner (1998) sugere como parâmetro de análise da retenção em geotêxteis tecidos a percentagem de área aberta (PAA). O autor recomenda um PAA maior do que 4-6 % para satisfazer os critérios de colmatação. Entretanto, em se tratando de tubos de geotêxtil, Moo-Young e Tucker (2002) comentam que este parâmetro pode ser inferior a estes valores, uma vez que a preocupação maior em aplicações como esta é a retenção e a colmatação pode vir a ser benéfica em alguns casos.

Vidal et al (1999) comentam que Lafleur (1999) propõe para solos não uniformes com risco de instabilidade interna adotar-se abertura de filtração por peneiramento hidrodinâmico entre 1 e 5 vezes o  $d_{30}$  do solo a filtrar.

#### 4.4.2 Critério de retenção racional ou por teoria probabilística

A limitação dos critérios convencionais, baseados na proposta de Terzaghi, tem levado os especialistas a procurarem avaliar a capacidade de retenção de um filtro por Teoria Probabilística. Urashima (1996) propõe um método de dimensionamento para filtros têxteis baseado no estudo probabilístico desenvolvido por Silveira (1965), enfocando aspectos do problema relativo ao carreamento de partículas, em que a espessura requerida do filtro ( $T_{GT}$ ) é tal que seja nula a probabilidade de uma partícula atravessá-la em toda a sua extensão, dentro um nível de confiança ( $P'$ ) preestabelecido o qual pode ser calculado a partir da equação 4.3.

$$P' = 1 - P^N \quad (4.3)$$

onde:

$P$  é a probabilidade de uma partícula de diâmetro  $d'$  encontrar (em um confronto) um poro de diâmetro  $d > d'$  e  $N$  é o número de confrontos.

A análise do comportamento do filtro pela teoria proposta nos permite determinar o nível de confiança de retenção de uma dada partícula.

Vários métodos experimentais vêm sendo propostos para a obtenção da curva de distribuição de poros com resultados discutíveis (Urashima e Vidal 1995, Urashima et al 1999, Urashima 1996), devendo ser avaliada a aplicabilidade dos métodos utilizados. Para não-tecidos agulhados, na ausência de uma curva de distribuição de poros obtida por método experimental ou análise de imagem, pode-se empregar um modelo teórico como o proposto por Gourc (1982) no qual a curva de distribuição de poros, que representa a probabilidade acumulada  $P$  de se encontrar um poro de diâmetro  $d$  maior ou igual a  $d'$  é dada pela equação 4.4.

$$P = \exp \left[ - \frac{\left( \frac{\eta \pi d^2}{4 + \lambda \frac{d}{2}} \right)}{\eta_{GT}} \right] \quad (4.4)$$

com:

$$\eta = 8 \frac{(1 - \eta_{GT})}{\pi^2 d_f^2}$$

$$\lambda = \frac{\left(2 + \frac{4}{\pi}\right) \cdot (1 - \eta_{GT})}{d_f}$$

onde:

$\lambda$  = Perímetro da fibra do geotêxtil por unidade de seção

$\eta$  = Número de fibras por unidade de seção

$\eta_{GT}$  = Porosidade do filtro

$d_f$  = Diâmetro da fibra do geotêxtil

De acordo com a proposta apresentada por Urashima (1996), para dimensionar filtros, inicialmente deve-se estabelecer o diâmetro da partícula do material a ser retido. Com as curvas de distribuição de poros e as respectivas distâncias médias entre confrontos dos geotêxteis disponíveis para o projeto, calcula-se P (a probabilidade da partícula escolhida encontrar, em um confronto, um vazio de diâmetro maior que o seu) para o diâmetro escolhido.

Para o caso dos tubos de geotêxtil pode-se fixar o nível de confiança para otimizar o projeto, entretanto, necessita-se de trabalhar com uma linha de produtos que mantenham as características (mesmas distâncias médias entre confrontos), de modo a escolher o produto que melhor se adapte ou solicitar a fabricação de um produto situado no intervalo de espessuras fabricadas, quando se tratar de grandes obras.

#### 4.4.3 Processo de Colmatação

Quando um material do tipo lodo, seja ele um sedimento argiloso ou resíduo industrial, passa por um processo de filtração com geotêxtil, a experiência mostra que a perda de partículas através do geossintético pára rapidamente e a água drenada torna-se mais limpa. Provavelmente, isto se dá devido à colmatação física ou biológica do geotêxtil e este processo em um tubo de geotêxtil é chamado de “Filter Cake”, o qual aumenta a filtração, porém diminui a permeabilidade (Leshchinsky 1992, Gaffney et al 1999).

O “Filter Cake” é uma película que se forma na interface do geotêxtil com o material que está sendo desaguado. Esta película dificulta a passagem do fluido que está no interior do tubo através do geotêxtil. Isto pode ser observado na Figura 4.7.

Segundo estudos feitos por Moo-Young et al (2002), a quantidade de sólidos em suspensão durante a filtração ou TSS (Total Suspended Solids) é alta no início do processo, mas diminui sensivelmente assim que se forma o “Filter Cake”.

Todos estes fenômenos que dificultam a saída do fluido costumam reter ainda um alto teor de umidade no interior dos tubos de geotêxtil, o que, em alguns casos, é necessário que seja feito um dessecamento, ou seja, a abertura dos tubos para que a parte úmida no seu interior seja exposta ao ar e para que haja, por evaporação, uma diminuição ainda maior do teor de umidade (Gaffney et al 1999, Fowler et al 2002).

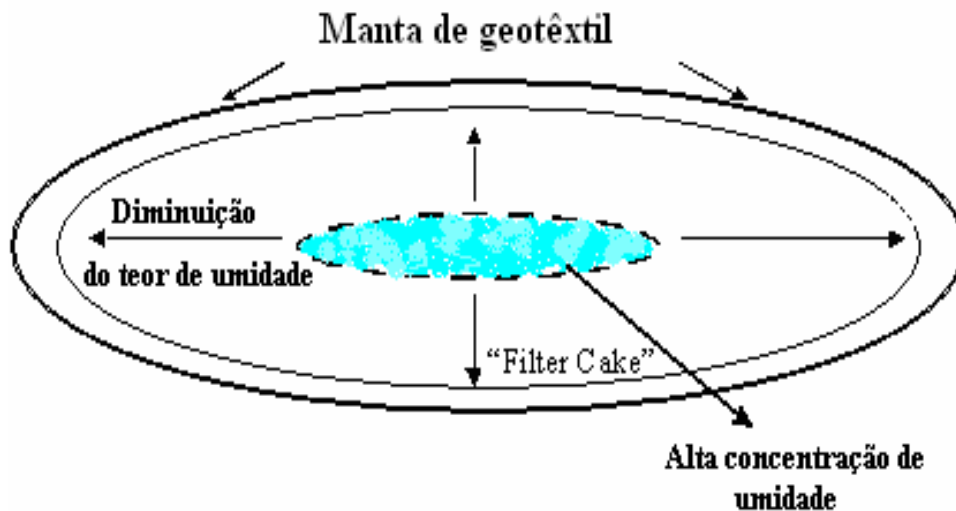


Figura 4.7: Distribuição da umidade e formação do “Filter cake” (Gaffney et al 1999)

Como esta técnica se propõe desaguar materiais de diferentes origens, mas principalmente os que contêm contaminantes como, por exemplo, coliformes fecais e agentes patogênicos em geral, devido à possibilidade de aplicação em lodos de estações de tratamento de esgoto, o risco de colmatção biológica deve ser também estudado. Este problema pode ser avaliado por ensaios como o estabelecido pela ASTM 1987 (1991).

#### 4.4.4 Aditivos

A adição de substâncias floculantes ao material que necessita ser desaguado é uma prática bastante comum. Estas substâncias químicas são chamadas de aditivos ou simplesmente floculantes e, por meio de reações químicas, combinam-se aos componentes do material a ser

desaguado formando grumos ou "flocos", o que permite que a retenção seja mais eficiente e também diminui o risco de colmatação do geotêxtil por partículas finas (comuns em material do tipo lodo) (Vidal 2003).

#### 4.5 Critérios de permeabilidade

Segundo Vidal et al (1999), os critérios de permeabilidade, em geral, baseiam-se na relação a seguir:

$$K_{nGT} > y K_{solo} \quad (4.5)$$

onde:

$K_{nGT}$  = Condutividade hidráulica normal ao plano do geotêxtil

$y$  = Fator proposto pelo autor do critério

$K_{solo}$  = Condutividade hidráulica do solo a reter.

Conforme expõe Vidal et al (1999), o critério proposto por Christofer et al (1992) mostra que o valor de “y” pode variar entre 0,1 e 10. Já Lafleur (1999) propõe o valor de “y” igual a 20 para solos não uniformes com risco de instabilidade interna. A proposta de Fannin et al (1998) discute que a evolução da permeabilidade seja avaliada através de ensaios de razão de gradiente, analisando-se o excesso de perda de carga.

O CFGG (1986) considera a seguinte relação:

$$\frac{K_{nGT}}{T_{GT}} > A \cdot K_{solo} \quad (4.6)$$

onde:

$T_{GT}$  = Espessura nominal do geotêxtil (m)

$A = 10^3$  para gradientes baixos e solos abertos e limpos

$A = 10^4$  para gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa

$A = 10^5$  para gradientes elevados e obras de grande responsabilidade.

Não foi encontrada na literatura proposta específica para desaguamento em tubos de geotêxtil. No caso dos tubos para desaguamento a condutividade hidráulica do material retido



varia em função do modo de deposição das partículas, da posição no tubo e do tempo de desaguamento.

No início do bombeamento e no topo do tubo ocorre filtração de partículas em suspensão, que seria a condição mais crítica. Para esta condição seria ideal que:

$$\frac{K_{GT}}{T_{GT}} \Delta h A \geq Q \quad (4.7)$$

onde  $K_{GT}$  = Condutividade hidráulica do geotêxtil (cm/s)

$T_{GT}$  = Espessura do geotêxtil (cm)

$\Delta h$  = Carga hidráulica (em cm de coluna d'água)

$A$  = Área de filtração (cm<sup>2</sup>)

$Q$  = Vazão de entrada (cm<sup>3</sup>/s).

As maiores cargas hidráulicas acontecem na base, mas esta região terá rapidamente deposição de partículas e o fluxo passará a ser condicionado por este material.

O geotêxtil mais adequado seria capaz de satisfazer o critério de retenção e a equação 4.7.

É importante lembrar que o processo de retenção rapidamente altera a condição inicial em relação à permeabilidade. Nesta fase poderia ser avaliada a condutividade hidráulica em função dos critérios propostos para a filtração de meios porosos, considerando como condutividade hidráulica do solo, a condutividade hidráulica do material obtida a partir de ensaio realizado em corpo-de-prova depositado no permeâmetro em forma de lama e adensado sob peso próprio, por exemplo.

## 4.6 Eficiência do processo

### 4.6.1 Eficiência na filtração

A eficiência da filtração, segundo Moo-Young et al (2002), é determinada pela comparação da percentagem total de sólidos em suspensão final  $TSS_{final}$  (TSS – Total Suspended Solids), com a percentagem total de sólidos em suspensão inicial  $TS_{inicial}$  (mg/L) da amostra, assim como pode ser visto na equação 4.8 (Gaffney e Moo-Young 2000, Moo-Young e Tucker 2002).

$$EF = \frac{TS_{inicial} - TSS_{final}}{TS_{inicial}} \times 100(\%) \quad (4.8)$$

#### 4.6.2 Eficiência no desaguamento

Utilizando o mesmo conceito do item anterior, Moo-Young et al (2002) apresentam a equação 4.9 para o cálculo da eficiência do desaguamento que é determinada fazendo-se uma comparação entre a percentagem de sólidos final ( $PS_{final}$ ) e a percentagem de sólidos inicial ( $PS_{inicial}$ ).

$$ED = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} \times 100(\%) \quad (4.9)$$

Esta eficiência está na relação do tempo que um material leva para desaguar e atingir uma determinada percentagem de sólidos.

#### 4.7 Exemplo de aplicação

Para análise e dimensionamento de um tubo de geotêxtil quanto ao seu comportamento em filtração, é proposto o caso de tubo com camada simples de geotêxtil não-tecido, perímetro  $S = 4,0\text{m}$  e comprimento de  $10\text{m}$ , considerando o tubo preenchido por um material fino mal graduado (não uniforme) com  $d_{85} = 0,003\text{mm}$  e  $d_{30} = 0,0013\text{mm}$  e pressão de enchimento de  $20\text{ kPa}$ , para uma vazão de entrada prevista de  $50\text{L/s}$ .

Solução do problema:

Utilizando o critério baseado nas considerações propostas pelo Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG 1986), tem-se que a abertura de filtração deve ser (equação 4.2):

$$O_{95} < C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot d_{85}$$

Pela Tabela 4.1 têm-se os seguintes coeficientes:  $C_1 = 0,80$ ;  $C_2 = 0,80$ ;  $C_3 = 1,00$  e  $C_4 = 1,00$ .

sendo assim:

$$O_{95} < 0,0024\text{mm}$$

Segundo critério proposto por Lafleur (1999) tem-se que para solos não uniformes com risco de instabilidade interna a abertura de filtração deve estar entre 1 e 5 vezes o  $d_{30}$  do solo a filtrar, ou seja,  $0,0013\text{mm} < O_{95} < 0,0065\text{mm}$ .

Quanto à análise dos critérios de permeabilidade, tem-se para a condição inicial, da equação 4.7, assumindo a carga hidráulica a meia altura do tubo, e altura inicial de 1 m (o cálculo da altura inicial será discutido no cap 5):

$$\frac{K_{GT}}{T_{GT}} (s^{-1}) \geq \frac{50000}{(400)(1000)(250)} = 0,0005$$

O valor encontrado pode ser facilmente satisfeito por produtos encontrados no mercado.

#### 4.8 Comentários

Nos tubos de geotêxtil, tem-se uma situação de tração e de carregamento normal ao plano da manta, que pode ter influência sobre as propriedades hidráulicas. Conforme discutido no item 4.2.1, as solicitações em tração e compressão da manta podem alterar a abertura de filtração. Geralmente estas alterações implicam uma redução desta abertura, mas para geotêxteis tecidos de baixa massa por unidade de área a solicitação em tração pode implicar num aumento da abertura de filtração.

Quanto ao critério de retenção, pode-se observar no exemplo de aplicação (item 4.7) que as estimativas a partir do critério do CFGG (1986) estão dentro do intervalo sugerido por Lafleur (1999).

É importante ressaltar que os ensaios de bolsa devem acompanhar esta análise. Isto permite avaliar de maneira mais precisa o comportamento do geotêxtil escolhido quanto à retenção de partículas e de contaminantes e, por conseguinte, a qualidade do fluido drenado.

Não foram encontradas discussões sobre o critério de permeabilidade na literatura. Talvez isto se deva ao fato de que é comum que esta avaliação seja desprezada na análise de filtração de solos em virtude da permeabilidade do geotêxtil ser geralmente bastante superior à do solo. No caso da retenção de material em forma de lama, tem-se geralmente materiais finos com permeabilidade extremamente baixa, possibilitando que a permeabilidade do geotêxtil ( $K_{nGT}$ ) seja sempre maior do que a do material em desaguamento, desde que haja material depositado na interface com o geotêxtil. Este capítulo discute no item 4.5 uma proposta de critério de permeabilidade para a condição inicial de preenchimento. O tipo de bombeamento terá grande influência no processo de deposição.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é que, no caso de o material desaguado ter origem orgânica ou constatar-se a presença de agentes patogênicos, devido ao risco de colmatção biológica, a parceria com químicos e biólogos é sempre importante.

## 5 DIMENSIONAMENTO FACE ÀS SOLICITAÇÕES MECÂNICAS

### 5.1 Introdução

Atualmente os estudos desenvolvidos em relação ao dimensionamento de tubos de geotêxtil se referem, na sua grande maioria, a elementos tubulares para contenção de material granular com a finalidade de serem empregados em diques para aterros hidráulicos e obras do mesmo gênero. Apesar da granulometria do material do tipo lodo e de um sedimento dragado ser muito mais fina, é possível encontrar alguns aspectos semelhantes no que diz respeito ao comportamento diante das tensões sofridas pelo geossintético. Isto é o que se observa na publicação de Pilarczyk (2000), onde estão reunidas algumas propostas de dimensionamento de tubos de geotêxtil e seus respectivos critérios e hipóteses.

O objetivo deste capítulo é analisar as tensões envolvidas durante a solicitação e os fatores intervenientes neste processo, tais como a costura para a confecção do tubo, as mangas de preenchimento e, em termos de resistência, os fatores de redução por fluência, por danos de instalação, por danos ambientais e referentes à execução da costura.

Conforme Pilarczyk (2000), os primeiros cálculos estão voltados para a forma da seção transversal assumida pelo tubo quando está totalmente preenchido, momento em que, em geral, estará sendo mais solicitado. Também se considera que estes esforços atuantes são consequência de um conjunto de fatores, tais como o material de preenchimento, razão de preenchimento (quando o material é bombeado) e a própria pressão de bombeamento.

Um tubo vazio estaria submetido apenas às solicitações da fase de instalação, bem inferiores às da fase de enchimento. Após ser posicionado, a solicitação transversal, inicialmente nula, começaria a aumentar durante o enchimento, até alcançar o seu valor máximo quando do completo preenchimento do tubo. Ao longo do desaguamento, as pressões internas se reduzem até a condição das solicitações impostas pelo peso próprio do material desaguado.

## 5.2 Análise da forma

As hipóteses mais freqüentes para a forma da seção transversal do tubo após o enchimento por bombeamento são: elíptica, elíptica achatada, falsa elipse e retangular, conforme é apresentado nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. A forma circular seria assumida para a seção transversal de um tubo com enchimento máximo ( $\varphi = 1$ ), dificilmente conseguido (Pilarczyk 2000).

Resumindo a literatura que utiliza as equações do círculo para efeitos de cálculo, pode-se dizer que a altura de enchimento (H) em cada caso seria dada por:

i) Elipse (Figura 5.1):

Das equações da elipse vem que:

$$S_e = \pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (5.1)$$

$$A_e = \frac{\pi ab}{4} \quad (5.2)$$

onde  $S_e$  é o perímetro aproximado da elipse e  $A_e$  é a área da elipse com dimensões mostradas na Figura 5.1.

O mesmo perímetro em um enchimento pleno ( $\varphi = 1$ ) implicaria em uma seção transversal circular com os seguintes perímetro (S) e área ( $A_0$ ):

$$S = \pi D \quad (5.3)$$

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.4)$$

Considerando que o perímetro da seção transversal do tubo permanece o mesmo independente da área assumida, tem-se que  $S = S_e$ , ou seja:

$$\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} = \pi D \quad (5.5)$$

onde:

$$b = \sqrt{2D^2 - a^2} \quad (5.6)$$

Formando um sistema de equações, a razão de preenchimento é função da relação entre a área da seção transversal assumida após o enchimento e a área da seção totalmente preenchida, ou seja:

$$\varphi = \frac{A_e}{A_0} \quad (5.7)$$

onde:

$$\varphi = \frac{\frac{\pi ab}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{ab}{D^2} \quad (5.8)$$

Substituindo 5.6 em 5.8 e considerando  $a = H$ , então:

$$H = \pm D \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \varphi^2}} \quad (5.9)$$

Fazendo  $D = \frac{S}{\pi}$ , tem-se que:

$$H = \pm \frac{S}{\pi} \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \varphi^2}} \quad (5.10)$$

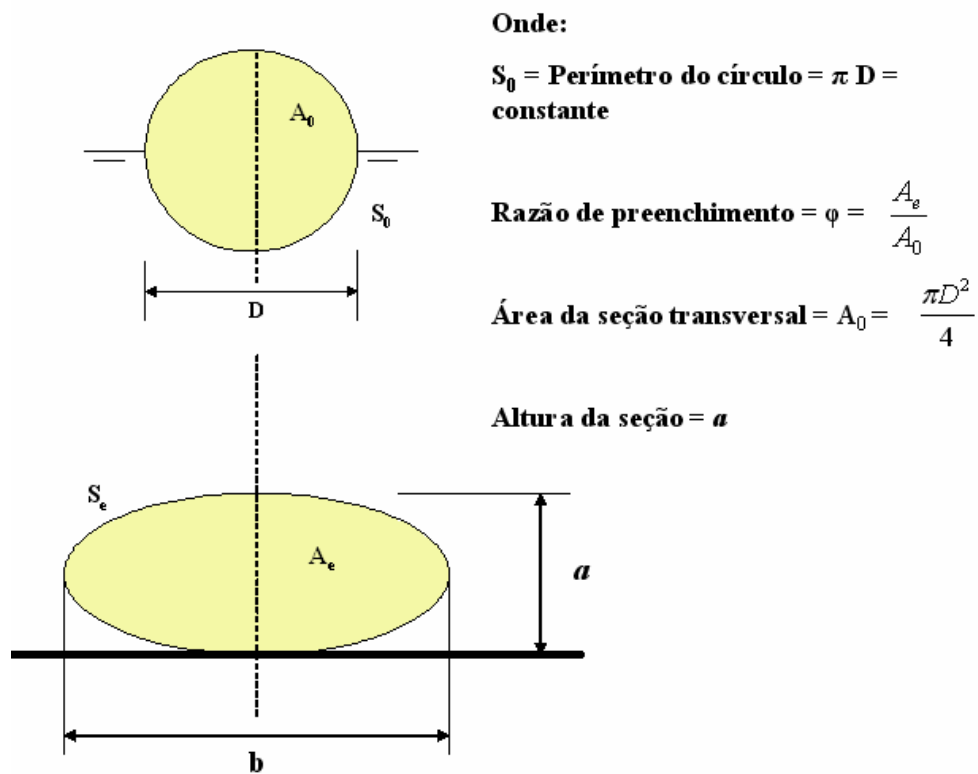


Figura 5.1: Seção transversal em forma de elipse (Pilarczyk 2000)

ii) Falsa elipse (Figura 5.2):

Analisando a forma proposta na Figura 5.2 tem-se que:

$$S_{fe} = 2(b - a) + \pi a \quad (5.11)$$

$$A_{fe} = (b - a)a + \pi \frac{a^2}{4} \quad (5.12)$$

Onde  $S_{fe}$  é o perímetro da falsa elipse e  $A_{fe}$  a sua área.

Assim fazendo  $S = S_{fe}$ , tem-se  $b$ :

$$b = \frac{\pi(D - a) + 2a}{2} \quad (5.13)$$

Sendo  $\varphi = \frac{A_{fe}}{A_0}$ ,  $a = H$  e  $D = \frac{S}{\pi}$ , então:

$$H = \frac{S}{\pi} (1 \pm \sqrt{1 - \varphi}) \quad (5.14)$$

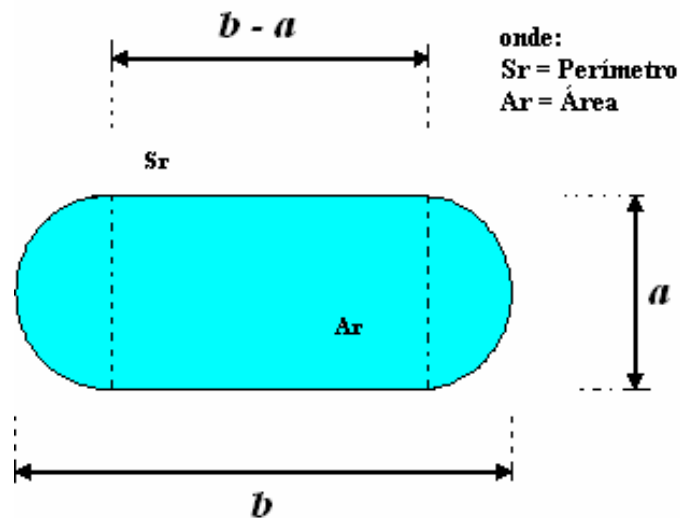


Figura 5.2: Seção transversal em forma de falsa elipse

Se a mesma análise for feita para um retângulo, ou seja, com as dimensões  $a$  e  $b$  (Figura 5.2), têm-se, para a altura  $H$ , sendo

$$S_r = 2(a + b) \quad (5.15)$$

$$A_r = ab \quad (5.16)$$

e fazendo  $S = S_r$ , tem-se:



$$b = \frac{\pi D - 2a}{2} \quad (5.17)$$

Sendo  $\varphi = \frac{A_r}{A_0}$ ,  $a = H$  e  $D = \frac{S}{\pi}$

então:

$$H = 0,25S_0 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4\varphi}{\pi}} \right) \quad (5.18)$$

Considerando que, através de observação experimental, a largura varia pouco em relação à diminuição da altura com o adensamento, Leshchinsky et al (1996, citado por Gaffney et al 1999) propõem, para a estimativa da variação da altura,  $\Delta h$  como adensamento, relação mostrada na equação 5.19:

$$\Delta h = H \cdot G_s \frac{(w_0 - w_f)}{1 + w_0 G_s} \quad (5.19)$$

sendo:

$G_s$  = Densidade dos sólidos

$w_0$  = Teor de umidade inicial do material bombeado

$w_f$  = Teor de umidade final do material bombeado

Na realidade, a forma do tubo é função das pressões, velocidade de enchimento, do material de enchimento e seu adensamento. A forma de um tubo preenchido com concreto, por exemplo, estará associada às características do concreto, tanto no ponto de lançamento, como no endurecimento deste material. Pilarczyk (2000) comenta que para tubos grandes com baixas taxas de enchimento a forma tenderia mais para a retangular.

Um tubo preenchido com material fino, com baixos ângulo de atrito interno e coesão inicial, com o adensamento lento, tenderá a assumir uma forma mais achatada como as observadas nas Figuras do capítulo 3.

A deformabilidade do geossintético também interfere na forma da seção transversal. Materiais mais deformáveis provavelmente tenderiam a formas que se aproximam da falsa elipse.

Pilarczyk (2000) afirma que o problema de variação da seção transversal é matematicamente complexo, sendo resolvido atualmente por rotinas de análise numérica, como o programa GeoCoPS<sup>TM</sup> (Geosynthetic Confined Pressurized Slurry), que tem apresentado bons resultados no que diz respeito ao dimensionamento de tubos de geotêxtil para desaguamento de sedimentos e material granular, comprovados pela comparação com ensaios de laboratório. Conforme a bibliografia, este tem sido o método de dimensionamento mais utilizado atualmente (Leshchinsky e Leshchinsky 1996, Leshchinsky e Leshchinsky 2002, Fowler et al 2002).

A Figura 5.3 (Leshchinsky e Leshchinsky 2002) mostra graficamente os resultados do trabalho desenvolvido por Leshchinsky e Leshchinsky (2002) e Liu (1981).

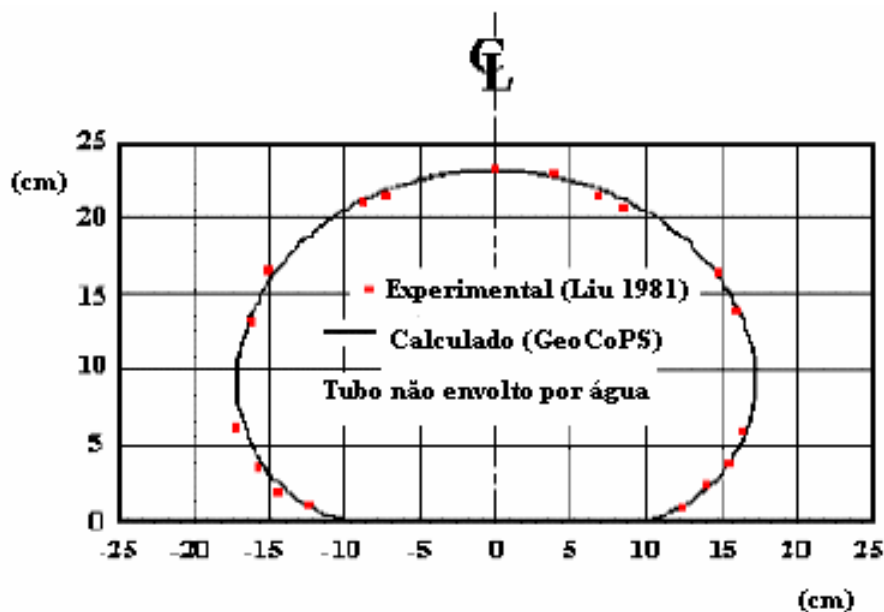


Figura 5.3: Pontos medidos experimentalmente ao longo do perímetro (Liu 1981) versus geometria calculada (elipse achatada) pelo programa GeoCoPS<sup>TM</sup> (Leshchinsky e Leshchinsky 2002)

A Figura 5.4 (Leshchinsky e Leshchinsky 2002) ilustra o efeito de pressão de enchimento na seção transversal do tubo. Pode-se observar nesta figura que uma pressão de enchimento mais baixa leva a um aproveitamento menor da área disponível, mas reduz sensivelmente as solicitações em tração no geotêxtil, reduzindo os custos do tubo.

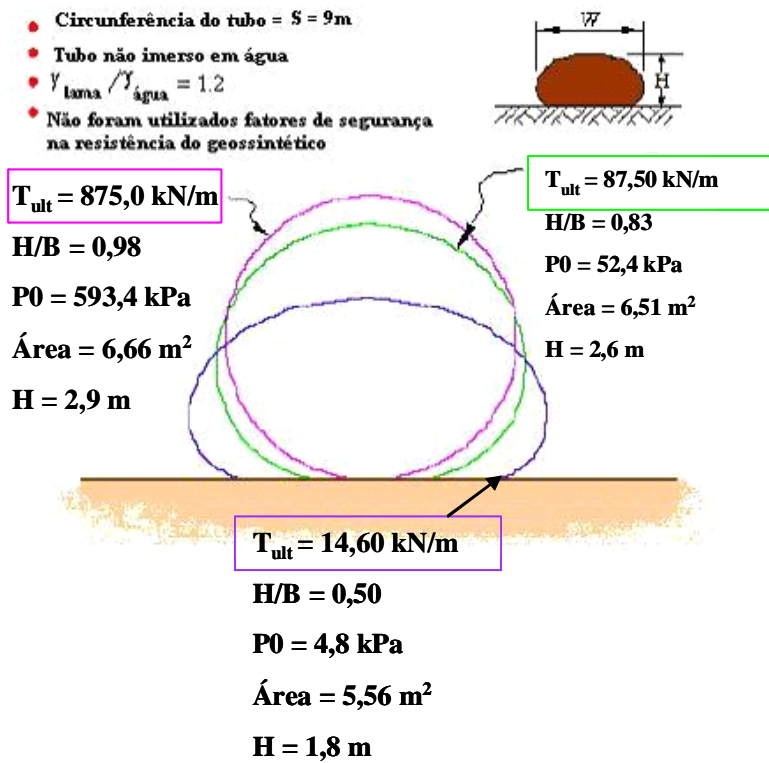


Figura 5.4: Efeitos da pressão de enchimento sobre a forma do tubo e sobre a solicitação em tração (Leshchinsky e Leshchinsky 2002)

### 5.3 Cálculos em termos de tração

#### 5.3.1 Proposta de Leshchinsky e Leshchinsky (2002) - GeoCoPS™

Segundo Leshchinsky e Leshchinsky (2002), a formulação dos cálculos de um tubo de geossintético, preenchido com lodo ou fluido pressurizado, é baseada no equilíbrio de uma casca flexível. Os resultados desta formulação são a força de tensão circunferencial dentro da casca e a geometria cilíndrica do material da casca encapsulada. Deve ser mencionado que esta formulação é citada em diversos outros artigos (Liu 1981, Kazimierowicz 1994, Carroll 1994).

As hipóteses consideradas para o desenvolvimento dos cálculos segundo esta proposta são:

1) O problema é bidimensional (deformações planas), ou seja, o tubo é extremamente longo e todas as seções transversais ao eixo longitudinal são idênticas em termos de geometria

e material. Portanto, a perda de pressão devido à drenagem através do tubo durante o preenchimento é ignorada; a pressão nas aberturas de entrada (a pressão de bombeamento) é a base para a análise.

2) A casca de geossintético é fina, flexível e possui peso desprezível por unidade de comprimento.

3) O material de preenchimento é uma lama ou praticamente um fluido, existindo, dessa forma, um estado hidrostático de tensão dentro do tubo.

4) Não existem tensões cisalhantes entre a lama e o geossintético.

O tubo é considerado envolto por ar e é preenchido por um único tipo de lodo. Entretanto, estender a formulação para incluir camadas de fluido externamente é mais exato.

A seção transversal é simétrica tendo uma altura máxima de “H” no eixo central, uma largura máxima “W” e uma base achatada em contato com o solo de fundação “b”. A pressão de bombeamento é “ $p_0$ ”. A densidade média da lama é “ $\gamma$ ”. Por conseguinte, a pressão hidrostática da lama em qualquer profundidade “x” medida do ponto 0 é expressa pela equação 5.20:

$$p(x) = p_0 + \gamma x \quad (5.20)$$

A geometria da casca de geossintético é definida por uma função desconhecida  $y = f(x)$ . Em um ponto de contato  $S(x,y)$  e o raio de curvatura do geossintético é “r”. O centro desta curvatura é no ponto  $C(x_c,y_c)$ . Tanto “r” quanto “C” variam com a função  $y(x)$ . Considerar as forças atuando num comprimento de arco infinitesimal “ds”, do geossintético em S e  $\theta$  é o ângulo tangente a este comprimento de arco infinitesimal (ver Figura 5.5). Uma vez assumido que o problema é bidimensional e que não existem tensões de cisalhamento entre o lodo e o geotêxtil, tem-se que a tensão “T” no geossintético é constante ao longo da circunferência.

Montando uma equação de equilíbrio de forças, tanto na direção x quanto em y, implica na relação mostrada a seguir na equação 5.21:

$$r(x) = T / p(x) \quad (5.21)$$

A equação 5.21 é válida em qualquer ponto ao longo de  $A_1OA_2$ . A fim de simplificar a análise, assume-se (de maneira conservadora) que nenhuma porção de  $T$  (calculado na equação 5.21) é transferida para o solo de fundação, ou seja, esta solicitação atua entre o geossintético e a base “b”, isto ocorre devido ao cisalhamento ao longo da interface entre o geossintético e o solo.

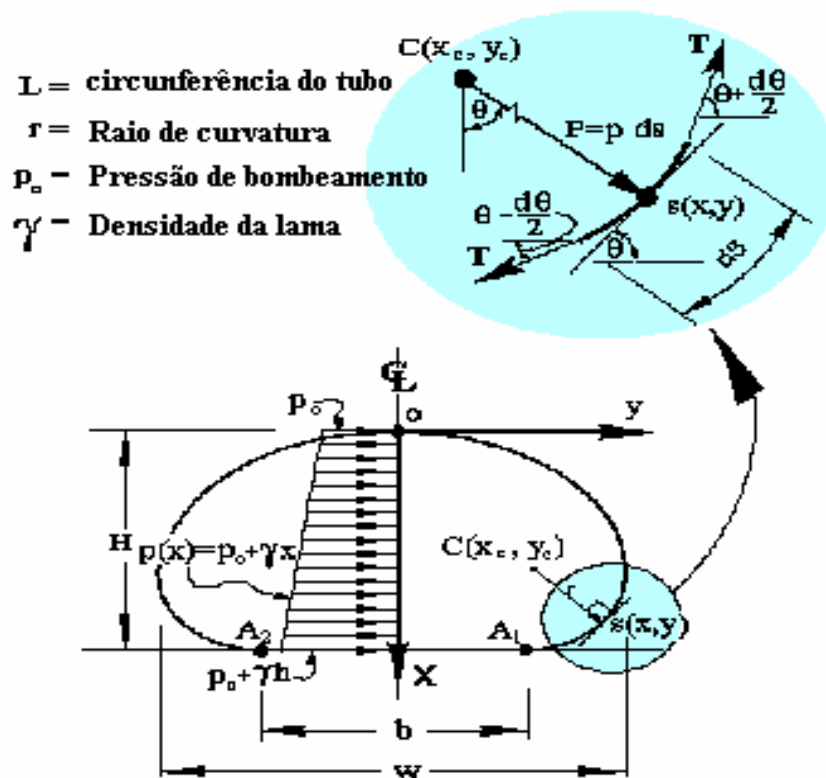


Figura 5.5: Seção transversal do tubo de geotêxtil: convenções e notações (Leshchinsky e Leshchinsky 2002)

Através de cálculos diferenciais e rotinas matemáticas complexas, Leshchinsky e Leshchinsky (2002) apresentam a solução para a equação 5.21 que seria a solução do problema.

### 5.3.2 Proposta de Liu, Goh e Silvester

Através de ensaios com tubos preenchidos por água, Liu, Goh e Silvester (Silvester 1990, citado por Pilarczyk 2000) encontraram relações matemáticas para a forma do tubo sujeito a diferentes pressões e também para a tração.

Convém observar que este estudo foi feito na intenção de avaliar tubos para contenção de material granular, mas permite uma boa análise preliminar em caso de contenção de material fino.

O ábaco mostrado na Figura 5.7 é referente às dimensões mostradas na Figura 5.6 e permite que se tenha uma estimativa para os cálculos. Os autores da proposta comentam que este ábaco apresenta melhores resultados para pressão de enchimento imposta superior a 150% da altura do tubo, ou seja, para  $b_1/S$  (onde  $S$  é o perímetro do tubo) maior ou igual a 0,35.

Convém ressaltar que o peso específico ( $\gamma$ ) utilizado no cálculo da tração pelo ábaco da Figura 5.7 é o da água, ou seja,  $\gamma = 9,8 \text{ kN/m}^3$  e que para o dado de entrada  $b_1/S$  tem-se que  $b_1$  é dado pela equação 5.22:

$$b_1 = \frac{p_0 + \gamma_{material} H}{\gamma_{água}} \quad (5.22)$$

Onde:

$p_0$  = Pressão de enchimento

$H$  = Altura do tubo ao final do enchimento

Este método de cálculo consiste em um procedimento iterativo em que uma altura inicial é arbitrada e calculada em seguida a partir dos resultados retirados das curvas do ábaco até que estes valores tenham convergido a um valor de  $H$ .

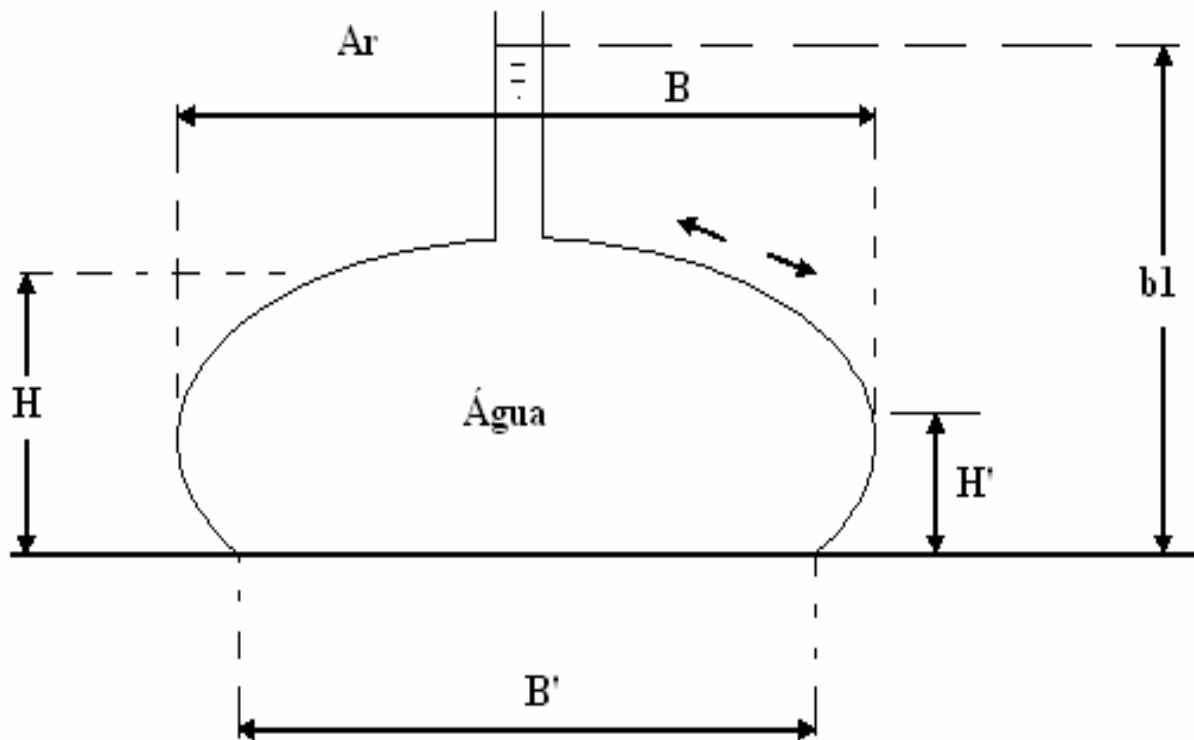


Figura 5.6: Esquema de ensaio de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000).

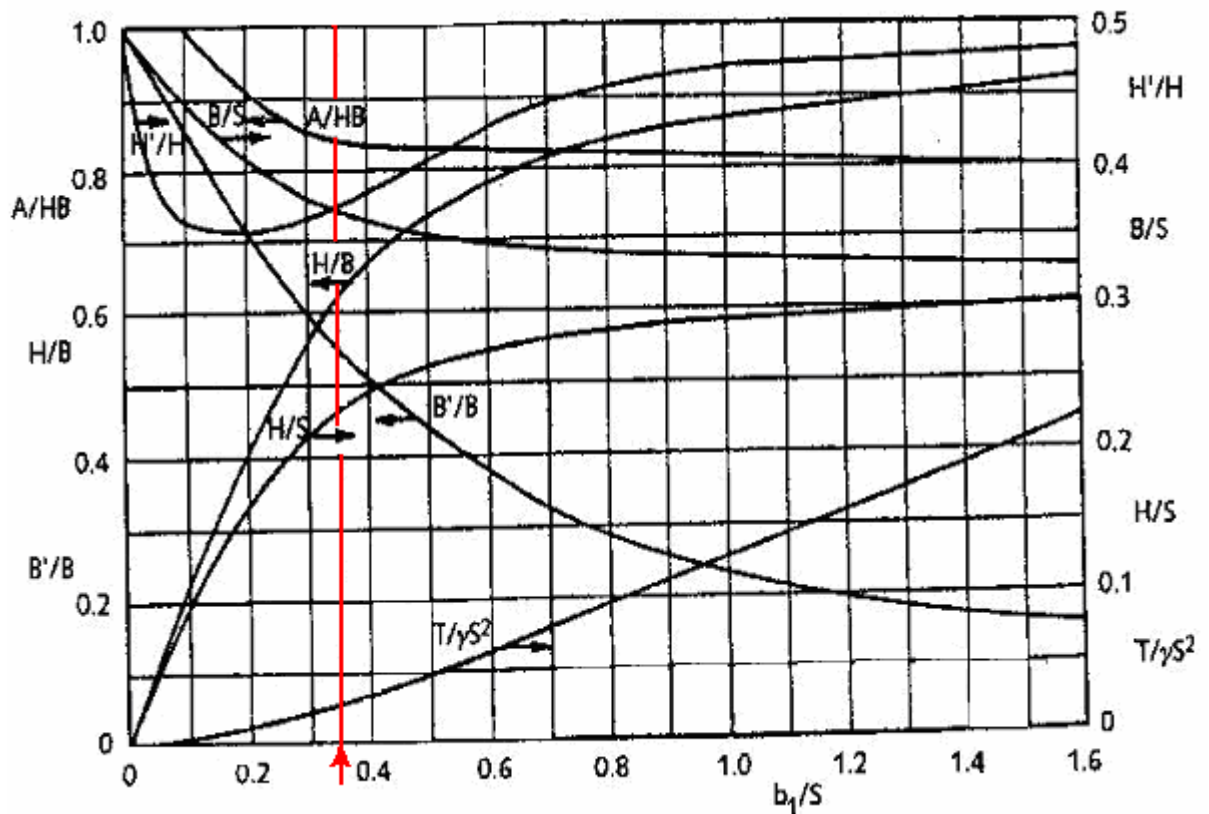


Figura 5.7: Ábaco para estimativa de forma e em termos de tração (Pilarczyk 2000)

### 5.3.3 Proposta de Kazimierowicz

As hipóteses assumidas por Kazimierowicz (1994) são:

- Existe apenas o estado de tensões da membrana sendo analisado.
- É considerado um estado de deformações planas.
- Não existem forças concentradas atuando.
- O peso próprio da casca é desprezado.
- O tubo é preenchido por material de peso específico conhecido
- Não existe atrito entre o solo e a base do tubo.

A partir dessas hipóteses foram feitas análises em função da pressão de preenchimento ou “ $p_0$ ”, em que se considerou três situações:  $p_0 \gg \gamma H$ ;  $p_0 \neq 0$  e  $p_0 = 0$ , onde “ $\gamma$ ” é o peso específico do material e “ $H$ ” é a altura do tubo preenchido. Esta análise é mostrada na Figura 5.8.

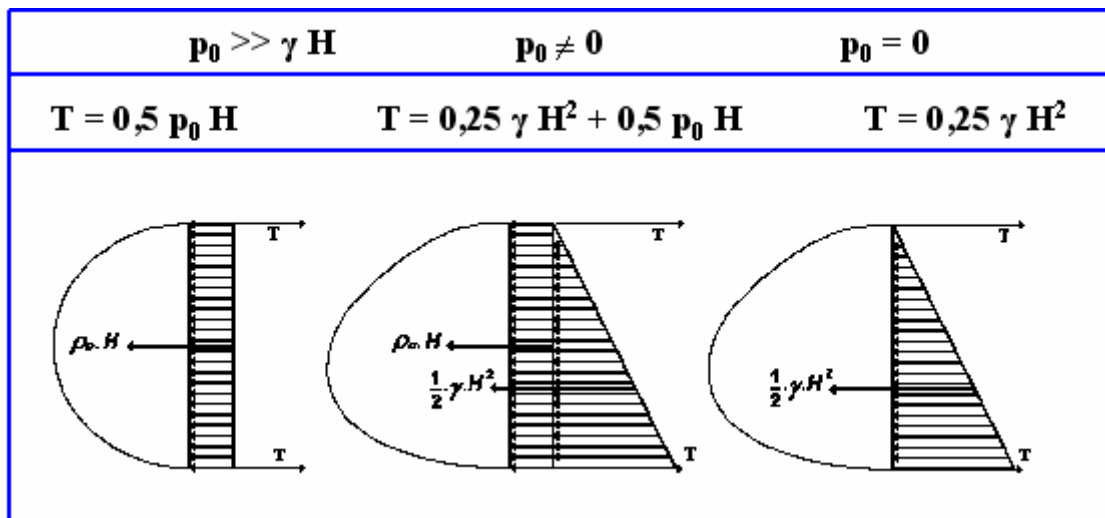


Figura 5.8: Análise das tensões pela proposta de Kazimierowicz (1994)

## 5.4 Fatores de redução

### 5.4.1 Introdução

Segundo Vidal et al (1999), os fatores de redução indicam a relação entre a propriedade índice e a propriedade funcional do geossintético em consequência das condições específicas do projeto. Estas condições incluem fenômenos como: o tempo de aplicação das solicitações mecânicas e hidráulicas consideradas no dimensionamento, as solicitações físico-químicas



como a temperatura e a química dos meios adjacentes, eventuais danos causados no processo de instalação, emendas, etc. Assim sendo, o fator de redução total é composto pelo conjunto dos fatores de redução parciais obtidos para cada condição.

Os fatores de redução são função do processo de fabricação, do tipo e da qualidade do polímero e dos aditivos utilizados na composição do geossintético, devendo ser determinados para cada produto.

No caso dos tubos de geotêxtil, os fatores de redução envolvidos no dimensionamento vão variar de acordo com: o tempo de consolidação total do material, o qual depende das características do lodo ou sedimento, o tipo de contaminante presente e o procedimento de instalação.

Para as situações nas quais o geossintético esteja submetido a solicitações de tração os principais fatores de redução a serem aplicados à propriedade índice são:

- Fator de redução para deformações por fluência em tração ( $FR_r$ )
- Fator de redução devido a danos de instalação ( $FR_{di}$ )
- Fator de redução parcial devido à degradação pelo meio ambiente (química e biológica) ( $FR_{da}$ )
- Fator de redução parcial para eventuais emendas ( $FR_{em}$ )

Para situações que envolvam a capacidade de fluxo através do geossintético tem-se que:

- Fator para a redução de vazios por fluência em compressão / cisalhamento ( $FR_{fc}$ )
- Fator de redução devido a danos de instalação ( $FR_{di}$ )
- Fator de redução devido a colmatção ou bloqueios físico, químico e biológico ( $FR_c$ )

Deve-se aplicar aos fatores de redução um fator de segurança englobando efeitos dificilmente quantificáveis, tais como a extrapolação de dados, comumente necessária quando o tempo de solicitação no campo é maior do que o tempo de ensaio em laboratório; a heterogeneidade do produto; as variações no processo de fabricação e a sinergia entre os fatores. A norma britânica BS8006 (1995) apresenta propostas para determinar estes fatores de segurança parciais.

A temperatura exerce influência no comportamento reológico dos geossintéticos. A variação da temperatura induz variações volumétricas (contração e dilatação), que ao mesmo tempo podem levar a fadiga das fibras, influencia no comportamento em fluência e acelera os processos de degradação química e biológica.

O efeito da temperatura é relativamente pequeno para variações abaixo da temperatura de transição vítrea do polímero, mas acentua-se em materiais trabalhando acima de sua temperatura de transição vítrea.

A forma de minoração da resistência máxima (ou de ensaio) é apresentada pela equação 5.23 (Leshchinsky e Leshchinsky 2002, Vidal et al 1999).

$$T_{\text{trabalho}} \leq T_{\text{ult}} / (FR_{di} \cdot FR_{da} \cdot FR_f \cdot FR_c \cdot FR_{em}) \quad (5.23)$$

onde:

$T_{\text{ult}}$  = A resistência característica do geossintético

$T_{\text{trabalho}}$  = Tensão calculada no projeto

#### 5.4.2 Fluência

Segundo Vidal et al (1999), os materiais poliméricos estão sujeitos à fluência, devendo-se considerar este efeito sobre os valores de resistência à tração observados em ensaios de caracterização (ensaios rápidos). O nível de fluência que um material apresenta está diretamente ligado à porcentagem de carga máxima a que ele está submetido e à temperatura em que ele se encontra (Bush 1990, Greenwood 1990, Rochholz e Kirshner 1990).

A fluência de um material é tanto mais importante quanto menor for a relação entre a sollicitação que suporta num tempo “t” e o valor da máxima sollicitação que ele suportaria em ensaio rápido (resistência máxima).

O ensaio normalizado (ISO/NBR) para geotêxteis e produtos correlatos submetidos à tração propõe métodos para a determinação do comportamento em deformação e da ruptura por fluência, em tração não confinada (ISO 10319 1993, NBR 12824 1993).

A análise do risco de fluência em compressão tem importância primordial no caso de geossintéticos utilizados em drenagem.

O ensaio de fluência em tração já possui norma internacional (ISO13431 1998).

#### 5.4.3 Danos de instalação

Em geral, o fator de redução por danos de instalação é função do tipo do material com o qual o geossintético encontra-se em contato, do tipo de obra e do processo de instalação

adotado. Isto diz respeito ao dano que o geossintético sofre antes mesmo de atuar em sua função, ou seja, suas qualidades podem ser alteradas e, por consequência, não ter o desempenho esperado.

Devido a grande variabilidade de parâmetros envolvidos, a simulação em laboratório dos danos possíveis durante a instalação teve, durante anos, diferentes propostas de ensaio, sendo que até o momento a única proposta aceita é a da ISO / TR 10722 – 1 (1998), a qual considera condição de material bastante contundente (Vidal et al 1999).

Este fator pode ser obtido para as condições da obra em questão, desde que a realização de ensaios especiais se mostre economicamente interessante. O profissional poderá também se valer de solicitações mais próximas das suas, desde que suficientemente documentados para permitir uma correta avaliação.

No contexto de tubos de geotêxtil, este fator se refere a um aumento acidental na pressão de bombeamento o que pode até ser considerado um fator de redução para a incerteza da pressão de bombeamento,  $FR_{ipb}$ .

Segundo Leshchinsky e Leshchinsky (1996), um pequeno aumento na pressão de bombeamento a partir de um certo valor implica num aumento exponencial das tensões. A experiência de campo, entretanto, mostra que altas pressões de bombeamento estão freqüentemente associadas a um baixo controle da qualidade do serviço por parte do empreiteiro. Esta excessiva pressão pode causar rupturas locais ou do próprio geossintético em regiões danificadas. Diante disso é recomendado que se utilize, neste caso, um fator de redução por danos de instalação mínimo de 1,3 ( $FR_{di} = FR_{ipb} = 1,3$ ).

#### **5.4.4 Danos ambientais**

O meio ambiente pode produzir a degradação dos geossintéticos durante a sua vida útil. O Guia de Durabilidade de Geotêxteis e Produtos Correlatos (ISO/EN 13434, 1998) apresenta como fatores intervenientes no processo de degradação: o pH do meio, a presença de íons metálicos e de matéria orgânica, a pressão parcial de oxigênio, o teor de umidade e a temperatura do meio. Nas condições normais de serviço consideradas no Guia: tempo de utilização de 25 anos, pH entre 4 e 9, temperatura do solo menor do que 25°C e solo natural sem contaminantes, os geossintéticos apresentam baixa degradação. Para condições de serviço diferentes destas, deverão ser utilizados os fatores de redução adequados (Vidal et al 1999).

No caso de tubos de geotêxtil, deve-se prever a degradação por raios ultra-violeta pelo motivo de estarem geralmente expostos ao ar livre enquanto deságuam.

Vidal et al (1999) comentam que o processo de hidrólise, que ocorre nos materiais de poliéster, pode acarretar em perda de massa molecular do polímero para o meio em que se encontra e uma erosão superficial das fibras do geossintético. A consequência desse processo é a perda de resistência por enfraquecimento das fibras que compõem o produto (Salman et al 1997), porém este processo ocorre de forma muito lenta e em meios neutros com temperatura próxima de 20°C, não é necessária a adoção de fatores de redução para tempos abaixo de 25 anos. Entretanto em meios alcalinos, sobretudo na presença de cálcio e para situações de pH superior a 9, a utilização deste polímero deve ser cuidadosamente estudada. Vidal et al (1991) discutem a metodologia de ensaio mais adequada.

Um outro agente de degradação ambiental é o oxigênio, o qual afeta, sobretudo o polipropileno e o polietileno. A oxidação provoca a corrosão das fibras do geossintético, causando sua ruptura, ou seja, ocasionando a redução de suas propriedades. Langenhove (1990, citado por Vidal et al 1999) detectou em seus estudos que a perda de resistência é diretamente proporcional ao aumento da pressão parcial de oxigênio. A temperatura e a presença de certos íons metálicos (sendo o mais comum o  $Fe^{+++}$ ), são agentes catalisadores de processo de degradação.

A influência destes fatores é geralmente verificada em laboratório através de processos de degradação acelerados pela imposição de altas temperaturas, submetendo-se a amostra degradada a ensaios referentes a propriedade estudada (Salman et al 1997, 1998, citado por Vidal et al 1999).

Os efeitos causados pela radiação solar podem ser verificados através do *xenon-arc* test (ASTM D4355 1992) que apresentou uma boa aproximação com valores medidos no campo (Baker 1997, citado por Vidal et al 1999).

#### **5.4.5 Emendas**

Segundo Vidal et al (1999), as emendas em geossintéticos geram uma região menos resistente. As emendas são executadas basicamente por quatro processos: solda ou colagem, costura, travamento simples e superposição de camadas.

Os fatores de redução para emendas em geotêxteis e correlatos são obtidos através de ensaios de tração em emenda, tendo-se as normas NBR 13134 (1993) e ISO 10321 (1993).

No caso dos tubos de geotêxtil, as emendas são feitas por costura e uma costura mal dimensionada pode comprometer todo o processo de desaguamento, conforme pode ser visto

na Figura 5.9. Leshchinsky e Leshchinsky (2002) recomendam a adoção de um fator de redução devido a emendas de  $FR_{EM} = 2,0$ , no caso de costuras com controle de qualidade.

Leshchinsky e Leshchinsky (2002) ainda recomendam obter a eficiência da costura a partir de resultados de ensaios de tração virgem e com emendas através da equação 5.24.

$$\text{Eficiência da costura} = 1 / FR_{em} \quad (5.24)$$

## 5.5 Costuras

### 5.5.1 Introdução

Os geotêxteis, como a maioria dos geossintéticos, são fabricados em bobinas com largura e comprimento limitados. No caso da utilização deste produto para a cobertura de grandes áreas, torna-se necessário o traspasse ou, dependendo da solicitação, a costura. Em se tratando dos tubos de geotêxtil, em que se tem um elemento fechado de formato tubular e sujeito a grandes tensões a costura é indispensável para a sua confecção.



Figura 5.9: Exemplo de falhas na costura de um tubo de Geotêxtil em Mobile-Alabama /EUA (Leshchinsky e Leshchinsky 2002).

As costuras em geossintéticos podem ser unicamente para unir elementos que não estão submetidos a grandes tensões, entretanto quando a costura é estrutural, ou seja, necessita de uma certa resistência, o mais importante a se garantir é que esta costura seja capaz de transferir as tensões de uma seção de geotêxtil à seção vizinha.

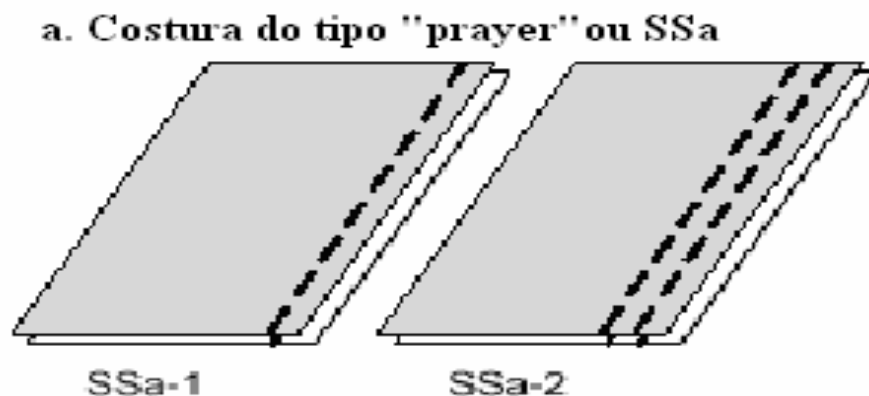
Os componentes e variáveis na confecção de uma costura são (Amoco 2000, Diaz et al 1990):

- Tipo da costura
- Número de carreiras de pontos
- Localização da costura
- Tipo de ponto
- Número de pontos
- Tipo da linha a ser utilizada
- Equipamento para se executar a costura

Além de cada um destes fatores também não se pode excluir a grande influência que as propriedades do geotêxtil a ser costurado tem na resistência final da costura.

### 5.5.2 Tipos de costuras

A maioria das costuras feitas no campo são costuras sobrepostas (SS), formadas pela colocação de duas seções de geotêxtil superpostas unidas por uma ou mais carreiras de pontos, conforme ilustra a Figura 5.10 (Amoco 2000, Diaz et al 1990).



### b. Costura do tipo "J" ou SS<sub>n</sub>

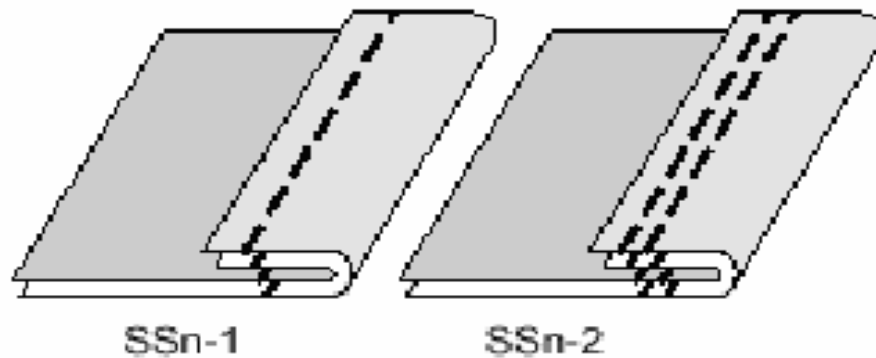


Figura 5.10: a) Tipo de costura simples; b) Tipo de costura com geotêxtil sobreposto (Amoco 2000, Diaz et al 1990).

A costura SS<sub>a</sub> ou “prayer” é o tipo mais simples e é a que requer menos manipulação do material que está sendo costurado.

O tipo SS<sub>n</sub> ou “J” é confeccionada sobrepondo-se duas seções de geotêxtil e os dobrando a fim de se criar uma espessura de quatro camadas., Este tipo de costura é mais resistente que a SS<sub>a</sub>, quando feita de maneira correta, porém é mais difícil de ser bem feita nas condições de campo.

#### 5.5.3 Número de carreira de pontos

A costura também é definida pela quantidade de carreiras de pontos que se vai fazer. As costuras SS<sub>a</sub> e “J” são geralmente feitas com uma ou duas carreiras de pontos. Como é mostrado na Figura 5.10, ao se definir a costura que vai ser utilizada e para que um projeto esteja completo, deve-se especificar o número de carreiras.

Os aparelhos manuais de costura são os mais comuns em se tratando de costuras executadas no campo. Estas máquinas costuram apenas uma carreira de pontos e as costuras duplas feitas com máquinas que possuem uma única agulha não têm uma boa resistência ao tracionamento, servindo apenas para reparar algum problema que tenha ocorrido na primeira carreira, que na verdade será a que terá a resistência final.

O ideal é recomendar tubos que tenham costura realizada em ambiente com controle de qualidade industrial, o que permite uma costura de melhor qualidade e agiliza o sistema. Existem atualmente empresas especializadas nestes serviços bem como alguns fabricantes oferecem esta possibilidade, como comentado no item 5.5.8.

#### 5.5.4 Localização da costura

A localização da costura em relação à borda do geotêxtil também pode influenciar na sua resistência.

Os geotêxteis não-tecidos devem ser costurados a uma distância de 2,5 a 5 cm de sua borda.

Em relação aos geotêxteis tecidos, estes comumente possuem uma faixa mais espessa em sua borda que seria um acabamento vindo de fábrica, que consiste basicamente em uma borda virada, ou seja, os fios da trama voltados para dentro do tecido. Isto não acontece com os não-tecidos por não ser necessário. Enfim, os geotêxteis tecidos devem ser costurados pelo menos 2,5 a 3,8 cm de distância da borda e, se o tecido não possui um acabamento de borda, este deve ser dobrado, criando-se uma região de maior espessura e dessa forma executar-se a costura sobre a dupla camada e a uma distância de 2,5 a 3,8 cm de distância da nova borda.

#### 5.5.5 Tipos de pontos

Os tipos de pontos mais comuns estão ilustrados nas Figuras 5.11 e 5.12 (Amoco 2000, Diaz et al 1990). O Federal Stitch tipo 101 Chainstitch (ponto em corrente) (Figura 5.10) é formado com linha simples. Um único ponto que se arrebeste em qualquer localização da costura pode comprometer a integridade de toda a carreira de pontos.

O Federal Stitch tipo 401 Chainstitch (Figura 5.11) é feito com linha dupla que oferece resistência superior ao tipo de ponto citado anteriormente e este ponto, inclusive, não se desmancha caso a linha se rompa em algum ponto da carreira.

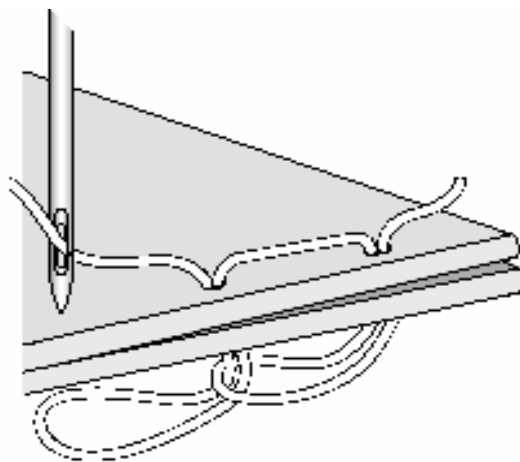


Figura 5.11: Ponto com linha simples (Amoco 2000, Diaz et al 1990).



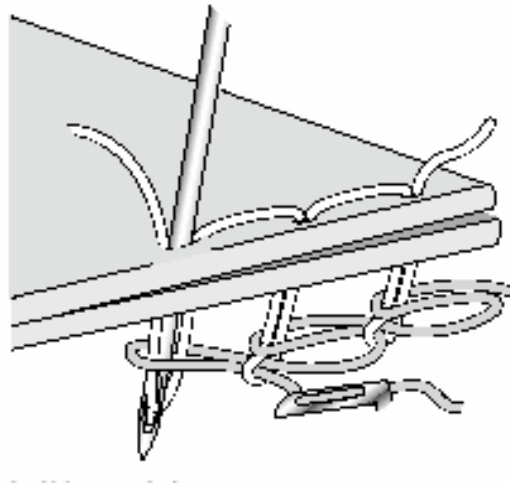


Figura 5.12: Ponto com linha dupla (Amoco 2000, Diaz et al 1990).

### 5.5.6 Número de pontos

O número de pontos é descrito em termos de pontos por polegada (spi – Stitch per inch). Os geotêxteis são costurados com um número de pontos que varia geralmente entre 3 a 7 spi.

Em geral, preparando-se a máquina de costura para um alto número de pontos é gerada uma resistente costura até certo ponto que é chamado de “ponto ótimo”, a partir disto os pontos adicionais quebram cada vez mais as fibras do geotêxtil, o que na verdade, resulta em uma diminuição da resistência da costura.

### 5.5.7 Tipo da linha

Deve-se lembrar que a linha da costura será de maneira igual exposta às condições que o geotêxtil e, portanto, esta deve apresentar similar ou até maior durabilidade sob tais circunstâncias.

Como exemplo pode-se citar o caso dos aterros sanitários que impõem condições de ataque químico e raios UV aos geossintéticos o que não é diferente com os tubos de geotêxtil para contenção de resíduos industriais que tanto a costura quanto o geotêxtil estarão expostos a um meio tão agressivo quanto.

O material apropriado componente das linhas, geralmente, são o polipropileno e o poliéster.

É muito importante uma criteriosa seleção do tamanho e tipo da linha a ser utilizada, uma vez que a costura não pode ser mais forte do que a linha escolhida para confeccioná-la.

Um fabricante de linhas deve ser consultado como forma a orientar a escolha da linha adequada para o equipamento e geotêxtil que serão utilizados. Para isto pode-se solicitar ao distribuidor do geotêxtil uma lista de fornecedores recomendáveis.

### **5.5.8 Equipamentos de costura**

As costuras em geotêxteis podem ser feitas no próprio campo ou virem prontas de fábrica.

Na fábrica, o equipamento mais sofisticado e pesado permite o uso de linhas mais pesadas e a execução de múltiplas carreiras de pontos, combinando em suas operações resistência e durabilidade. Num ambiente controlado em termos de qualidade também é possível garantir a uniformidade do processo e controle das operações. Os fabricantes podem normalmente costurar até mais de três painéis ao mesmo tempo com essas máquinas industriais o que também não deixa de trazer alguns problemas a cada painel anexado tais como a dificuldade de transporte e manuseio.

A costura de campo é feita com máquina de costura que pode ser tanto manual quanto montada no terreno, em veículo ou em qualquer outro local que se adapte às condições de campo. Estes equipamentos são projetados com operação pneumática, hidráulica e elétrica e o número de pontos (spi) e tensão nos pontos são ajustáveis. Esta preparação deve ser checada no campo periodicamente para se ter certeza de que os pontos estão uniformes e apertados corretamente.

As máquinas para costuras manuais têm as desvantagens de terem limitações quanto ao peso e tamanho da linha e de serem uma opção mais cara, além de não contarem com um controle de qualidade industrial.

### **5.5.9 Mangas**

O tubo de geotêxtil é totalmente costurado e preenchido através das chamadas “mangas” ou, na língua inglesa, “inlet sleeves”.

As mangas são elementos de extrema importância e é necessária uma atenção especial à costura que as une ao tubo, por se tratar do ponto de preenchimento e, por conseguinte, sujeito a esforços gerados pelo manuseio da bomba que funcionará sob alta pressão (Pilarczyk 2000). É possível visualizar a localização das mangas de preenchimento dos tubos de geotêxtil na Figura 5.13.

Freqüentemente, o dimensionamento das mangas é crucial em se tratando da pressão máxima de acomodação do material bombeado no interior do tubo. A fim de se alcançar uma melhor relação entre o formato do tubo desejado e a pressão de bombeamento aplicada é mais adequado que, em função do comprimento longitudinal do tubo, sejam usadas mais de uma manga de preenchimento espaçadas entre si de uma distância pré-determinada. Pilarczyk (2000) sugere uma distância de 15 metros ao longo do comprimento do tubo e 500mm de diâmetro, o que também vai depender do diâmetro do tubo de preenchimento da bomba disponível.

Após o total preenchimento do tubo de geotêxtil estas mangas são fechadas e, em alguns casos, após algum tempo de consolidação do material, elas são novamente abertas para um novo preenchimento (Fowler et al 2002).

No caso de tubos preenchidos por material granular, ou seja, bastante permeável, costuma-se costurar ao tubo as “outlet sleeves” (Figura 5.13), que seriam orifícios de saída para a água, uma vez que apenas a permeabilidade do geotêxtil poderia não ser suficiente para expulsar a água drenada. Um detalhe importante a respeito das mangas de saída (no caso de existirem) é o geotêxtil utilizado, que deve ter uma permeabilidade um pouco maior a fim de servir como um ponto de alívio e drenagem para a água gerada pela consolidação do material (Pilarczyk 2000).

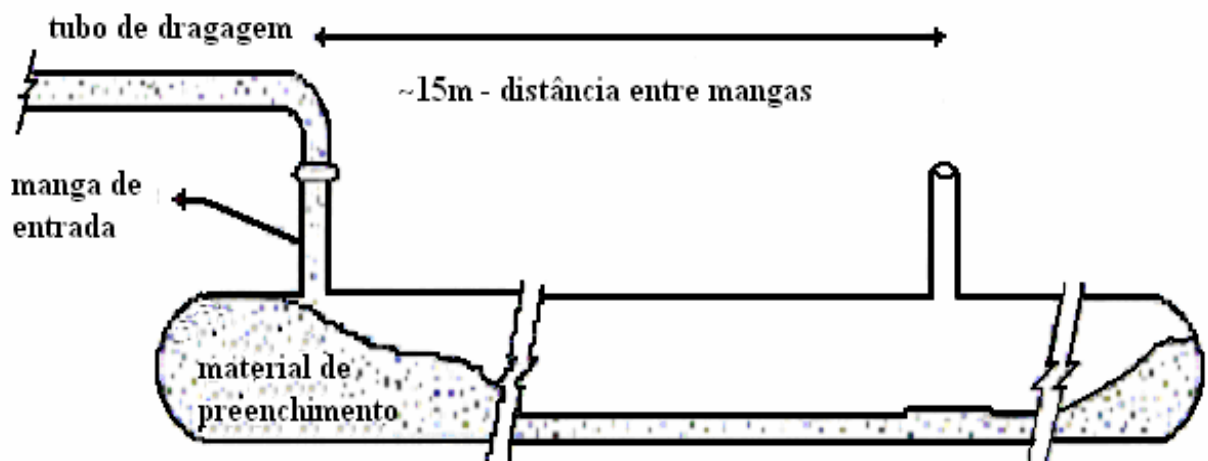


Figura 5.13: Esquema da localização das mangas ao longo do comprimento do tubo de geotêxtil (Pilarczyk 2000).

## 5.6 Comparação numérica das propostas de dimensionamento

Leshchinsky e Leshchinsky (2002) apresentam tabelas comparativas dos métodos de cálculo em termos de forma e de tração em relação ao programa computacional GeoCoPS™, conforme é mostrado nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, com os parâmetros definidos na Figura 5.6.

Tabela 5.1: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS™ e do método proposto por Liu (1981) (Leshchinsky e Leshchinsky 2002).

| N°               | Dados de entrada |        | $\gamma_{\text{material}}(\text{kN/m}^3)$ | Resultados         |      |       |      |                      |
|------------------|------------------|--------|---|--------------------|------|-------|------|----------------------|
|                  | S(m)             | P(kPa) |   | Proposta           | H(m) | B'(m) | B(m) | H'(m) <sup>(1)</sup> |
| 1 <sup>(3)</sup> | 0,93             | 3,86   | 1,00                                      | Liu <sup>(2)</sup> | 0,23 | 0,18  | 0,34 | 0,09                 |
|                  |                  |        |   | GeoCoPS            | 0,23 | 0,16  | 0,34 | 0,09                 |
| 2 <sup>(3)</sup> | 0,93             | 1,76   | 1,00                                      | Liu <sup>(2)</sup> | 0,16 | 0,31  | 0,38 | 0,05                 |
|                  |                  |        |   | GeoCoPS            | 0,16 | 0,29  | 0,38 | 0,05                 |
| 3 <sup>(4)</sup> | 1,04             | 3,44   | 2,00                                      | Liu <sup>(2)</sup> | 0,24 | 0,25  | 0,41 | 0,09                 |
|                  |                  |        |   | GeoCoPS            | 0,25 | 0,24  | 0,41 | 0,09                 |

(1) H' = Altura acima da base em que a maior largura B ocorre

(2) Valores extraídos graficamente

(3) Caso em que o tubo não está envolto por água

(4) Tubo preenchido por argamassa e submerso em água

Tabela 5.2: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS™ e do método proposto por Silvester (1986), considerando  $\gamma_{\text{material}} = 20\text{kN/m}^3$  (Leshchinsky e Leshchinsky 2002).

| N° | Dados de entrada |         | Proposta  | Resultados |        |       |                        |          |
|----|------------------|---------|-----------|------------|--------|-------|------------------------|----------|
|    | S (m)            | P (kPa) |           | H (m)      | H' (m) | B (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | T (kN/m) |
| 1  | 3,6              | 44,6    | Silvester | 1,00       | 0,48   | 1,27  | 1,05                   | 17,50    |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 1,00       | 0,46   | 1,27  | 1,04                   | 17,40    |
| 2  | 3,6              | 30,2    | Silvester | 0,90       | 0,65   | 1,32  | 0,99                   | 10,10    |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 0,91       | 0,64   | 1,32  | 1,00                   | 9,70     |
| 3  | 3,6              | 22,2    | Silvester | 0,80       | 0,82   | 1,38  | 0,95                   | 5,80     |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 0,82       | 0,83   | 1,38  | 0,94                   | 5,80     |
| 4  | 3,6              | 18,1    | Silvester | 0,70       | 0,94   | 1,45  | 0,89                   | 4,20     |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 0,75       | 0,95   | 1,42  | 0,90                   | 4,20     |
| 5  | 3,6              | 13,7    | Silvester | 0,60       | 1,05   | 1,50  | 0,81                   | 2,80     |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 0,63       | 1,15   | 1,52  | 0,81                   | 2,40     |
| 6  | 3,6              | 11,6    | Silvester | 0,51       | 1,21   | 1,55  | 0,74                   | 2,00     |
|    |                  |         | GeoCoPS   | 0,55       | 1,25   | 1,56  | 0,74                   | 1,70     |

Tabela 5.3: Comparação dos resultados obtidos a partir do GeoCoPS<sup>TM</sup> e do método proposto por Kazimierowicz (1994), considerando  $\gamma_{\text{material}} = 14\text{kN/m}^3$  (Leshchinsky e Leshchinsky 2002).

| N° | Dados de Entrada |         | Resultados    |       |       |          |
|----|------------------|---------|---------------|-------|-------|----------|
|    | S (m)            | P (kPa) | Proposta      | H (m) | B (m) | T (kN/m) |
| 1  | 3,6              | 17,5    | Kazimierowicz | 1,00  | 0,46  | 11,80    |
|    |                  |         | GeoCoPS       | 1,00  | 0,46  | 12,20    |
| 2  | 3,6              | 20,4    | Kazimierowicz | 0,90  | 0,64  | 6,80     |
|    |                  |         | GeoCoPS       | 0,91  | 0,65  | 6,90     |
| 3  | 3,6              | 4,6     | Kazimierowicz | 0,80  | 0,84  | 4,00     |
|    |                  |         | GeoCoPS       | 0,82  | 0,82  | 4,20     |
| 4  | 3,6              | 3,0     | Kazimierowicz | 0,70  | 0,96  | 2,70     |
|    |                  |         | GeoCoPS       | 0,77  | 0,93  | 3,20     |

As Tabelas 5.1 a 5.3 mostram uma boa aproximação do GeoCoPS<sup>TM</sup> com os métodos comparados. Os valores da solicitação em tração calculados por Kazimierowicz (1994) já haviam sido comparados pelo autor aos de Silvester (1986), apresentando diferenças inferiores a 3%.

Os valores das Tabelas 5.1 e 5.3 podem ser recuperados aplicando-se as expressões indicadas nos itens 5.3.2 e 5.3.3. As solicitações em tração apresentadas na Tabela 5.2 são muito próximas às que seriam calculadas considerando a proposta de Kazimierowicz (1994) (item 5.3.3) para as alturas de preenchimento indicadas. Entretanto, quando se tenta recuperar estes valores a partir da proposta citada por Pilarczyk (2000), considerando-se o método desenvolvido por Liu, Goh e Silvester, apresentado por Silvester (1990), tem-se uma divergência nos valores obtidos através de Silvester (1986) ou pelo GeoCoPS<sup>TM</sup>, como se pode observar na Tabela 5.4, que reproduz os valores médios da Tabela 5.2, acrescentando os calculados a partir do ábaco apresentado na Figura 5.7. Pode-se observar uma tendência do método proposto na Figura 5.7 de apresentar uma maior altura de enchimento com conseqüente aumento da solicitação em tração, para os níveis de pressão analisados na tabela.

Tabela 5.4 Comparação entre a proposta de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) e os resultados médios indicados na Tabela 5.2.

| número | L(m) | p(kPa) | fonte   | H(m) | B'(m) | B (m) | T(kN/m) |
|--------|------|--------|---------|------|-------|-------|---------|
| 1      | 3,6  | 44,6   | Tab.5.2 | 1,0  | 0,47  | 1,27  | 17,5    |
| 1      | 3,6  | 44,6   | Fig.5.7 | 1,01 | 0,20  | 1,19  | 21,5    |
| 3      | 3,6  | 22,2   | Tab.5.2 | 0,81 | 0,82  | 1,38  | 5,8     |
| 3      | 3,6  | 22,2   | Fig.5.7 | 0,98 | 0,42  | 1,22  | 9,5     |
| 5      | 3,6  | 13,7   | Tab.5.2 | 0,62 | 1,1   | 1,51  | 2,6     |
| 5      | 3,6  | 13,7   | Fig.5.7 | 0,86 | 0,67  | 1,33  | 3,8     |

A Tabela 5.5 apresenta uma comparação entre os resultados do GeoCoPS<sup>TM</sup> para os valores indicados na Figura 5.4, considerando as propostas indicadas nos itens 5.3.2 e 5.3.3. Como se pode observar, a proposta de Kazimierowicz (1994) prevê solicitações em tração muito próximas as previstas pelo GeoCoPS<sup>TM</sup> enquanto que o ábaco da Figura 5.7 (Silvester 1990) se mostraram superiores conforme já haviam sido observado na Tabela 5.4.

Tabela 5.5: Comparação dos valores de tração entre as propostas de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000), Kazimierowicz (1994) e do programa computacional GeoCoPS<sup>TM</sup>.

| P <sub>o</sub> (kPa) | Tração GeoCoPS <sup>TM</sup><br>(kN/m) | Tração Liu, Goh e<br>Silvester (kN/m) | Tração<br>Kazimierowicz<br>(kN/m) |
|----------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 593,4                | 875,0                                  | NA                                    | 860,4                             |
| 52,4                 | 87,5                                   | 95,0                                  | 88,0                              |
| 4,8                  | 14,6                                   | 15,9                                  | 13,9                              |

NA: Valor não compreendido no intervalo atendido pela proposta ( $0 \leq b1/S \leq 1,6$ )

## 5.7 Exemplo de aplicação

Considerando o exemplo de aplicação do capítulo 4, dá-se continuidade à análise, porém em relação às solicitações mecânicas.

- O caso proposto tem como dado de entrada o perímetro do tubo  $S = 4,0\text{m}$ , pressão de enchimento -  $p_0$ , peso específico do material -  $\gamma_{\text{material}} = 14\text{kN/m}^3$ , peso específico da água -  $\gamma_{\text{água}} = 9,8\text{kN/m}^3$  e uma taxa de preenchimento -  $\phi = 95\%$ .

Solução do problema:

- Cálculo da tração a partir da formulação de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000):

Para uma pressão de preenchimento  $p_0 = 20\text{kPa}$  e  $H = 0,95 D$  (como estimativa de  $H$ , para uma taxa de preenchimento de  $\phi = 95\%$ , onde  $D$  é o diâmetro do tubo quando totalmente preenchido, ou seja, a máxima altura), tem-se pela Equação 5.20 que:

$$b_1 = 3,77\text{mca} \text{ (metros de coluna d'água)}$$

Para valor de entrada no ábaco (Figura 5.7), tem-se que  $\frac{b_1}{S} = 0,94$ , então:

$$B = 1,40\text{m}$$

$$B' = 0,36\text{m}$$

$$H' = 0,57\text{m}$$

$$H \cong 1,20\text{m}$$

$$\mathbf{T = 19,35\text{kN/m}}$$

As dimensões calculadas a partir do ábaco (Figura 5.7) estão representadas na Figura 5.13.

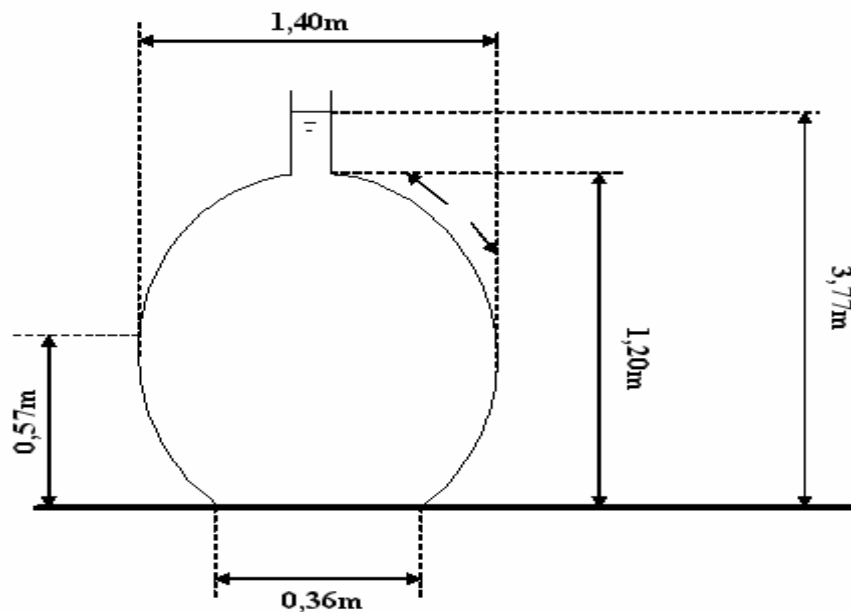


Figura 5.13: Representação das dimensões calculadas pelo método proposto por Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) para uma pressão de enchimento de 20kPa (sem escala).

Para uma pressão de preenchimento  $p_0 = 40\text{kPa}$ , tem-se que:

$$b_1 = 5,82\text{mca} \text{ (metros de coluna d'água)}$$

Para valor de entrada no ábaco (Figura 5.7) tem-se que  $\frac{b_1}{S} = 1,46$ , então:

$$B = 1,36\text{m}$$

$$B' = 0,22\text{m}$$

$$H \cong 1,22\text{m}$$

$$H' = 0,58\text{m}$$

$$T = 44,8\text{kN/m}$$

As dimensões calculadas a partir do ábaco (Figura 5.7) estão representadas na Figura 5.14.

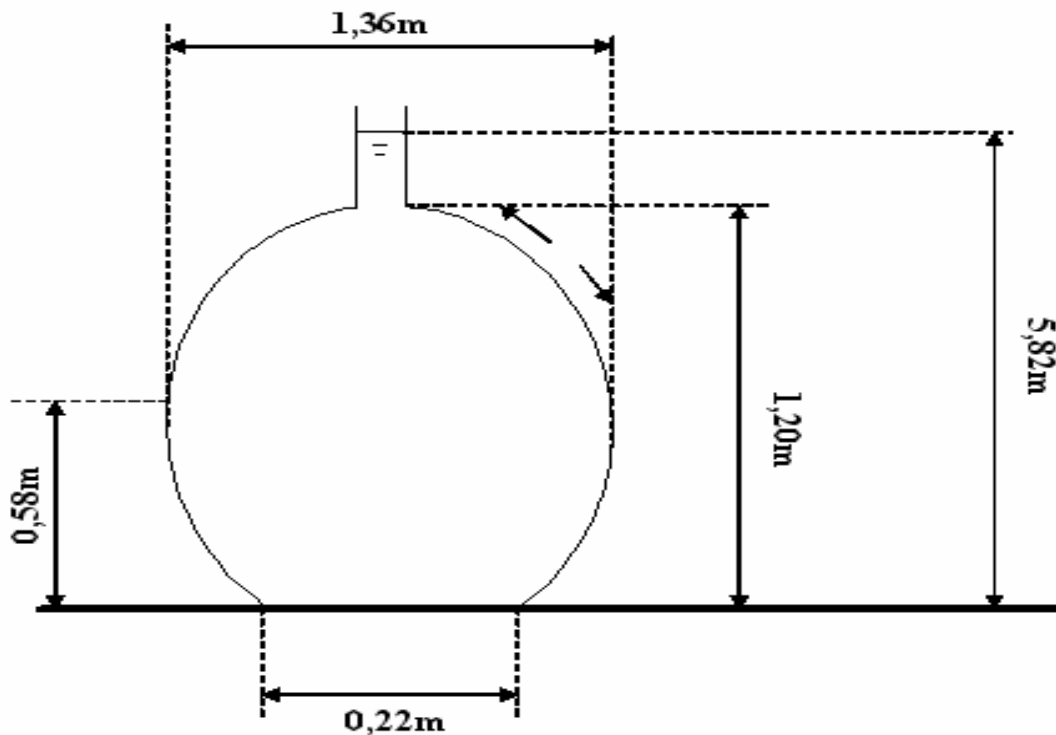


Figura 5.14: Representação das dimensões calculadas pelo método proposto por Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) para uma pressão de enchimento de 40kPa (sem escala).

- Cálculo da tração a partir da formulação de Kazimierowicz (1994):

Segundo Kazimierowicz (1994), a solicitação em tração é calculada pela equação da Figura 5.18, na condição de  $p_0$  diferente de zero. Para uma pressão de preenchimento  $p_0 = 20\text{kPa}$ ,



considerando a forma da Figura 5.2, uma altura de enchimento 1,0m (pela equação 5.14) e para uma taxa de preenchimento  $\varphi = 95\%$ , tem-se que:

$$\mathbf{T = 13,5kN/m}$$

Para uma pressão de preenchimento  $p_0 = 40\text{kPa}$  e considerando a mesma forma e taxa de preenchimento  $\varphi = 95\%$ , tem-se que:

$$\mathbf{T = 23,5kN/m}$$

Na realidade, um aumento na pressão de enchimento implica em um aumento da taxa de preenchimento e também um aumento na altura do tubo preenchido. Considerando a altura de 1,2m, obtida por Liu, Goh e Silvester, para uma pressão de enchimento de 40kPa, tem-se uma taxa de enchimento de 99,7% (equação 5.14) e a pressão calculada por Kazimierowicz (Figura 5.18 –  $p_0 \neq 0$ ) é de:

$$\mathbf{T = 29,0kN/m}$$

Ao mesmo tempo, se houver um aumento na pressão de enchimento, porém sendo mantida a mesma taxa de preenchimento de 95% e, por conseguinte, uma mesma altura de enchimento, a tração no geotêxtil aumenta consideravelmente.

A Tabela 5.6 resume os resultados de solicitação em tração obtidos para um tubo de perímetro igual a 4m, 95% de preenchimento e peso específico aparente total de 14kN/m<sup>3</sup>. Como previsto pela análise realizada no item 5.6, o método apresentado por Silvester (1990) superestima as solicitações em tração. Por outro lado, se a altura de preenchimento adotada para o cálculo por Kazimierowicz (1994) for subestimada, as solicitações em tração também o serão.

## 5.8 Comentários

Os melhores resultados para previsão da solicitação em tração seriam obtidos utilizando o ábaco da Fig. 5.7 (Silvester 1990) para calcular a forma ao fim do preenchimento e a partir do valor de H estimar a solicitação em tração por Kazimierowicz (1994). Deste modo o resultado fica bastante próximo dos valores obtidos pelo GeoCoPS<sup>TM</sup>.

Tabela 5.6 Resumo dos resultados

| <b>P<sub>o</sub> (kN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Liu, Goh e Silvester<br/>(Silvester 1990)</b> |                | <b>Kazimierowicz (1994)</b> |                |             |                |
|---|--|----------------|-----------------------------|----------------|-------------|----------------|
|   | <b>H(m)</b>                                      | <b>T(kN/m)</b> | <b>H(m)</b>                 | <b>T(kN/m)</b> | <b>H(m)</b> | <b>T(kN/m)</b> |
| 20                                      | 1,2  | 19,4           | 1,0                         | 13,5           | 1,2         | 17,0           |
| 40                                      | 1,2  | 44,8           | 1,0                         | 23,5           | 1,2         | 29,0           |

A proposta de Liu, Goh e Silvester (Pilarczyk 2000) foi a única encontrada na literatura que permite estimar a altura final de enchimento, necessária para o cálculo da sollicitação em tração, a partir da pressão de enchimento..

Desse modo, também pode ser concluído que estabelecer uma taxa de enchimento, o que indicaria a altura máxima a ser atingida, exigiria o controle da pressão de enchimento.

Cabe lembrar que, conforme já discutido anteriormente neste mesmo capítulo, estas sollicitações calculadas (requeridas) devem ser confrontadas às propriedades funcionais (propriedades características minoradas), através do emprego de fatores de redução conforme cada fator interveniente na resistência do geossintético.

## 6 CONCLUSÕES

Tubos de geotêxtil podem ser utilizados em processos de desaguamento de resíduos como sistema único ou otimizando o sistema já existente, a fim de aumentar a percentagem de sólidos, diminuindo o volume do rejeito, o que traz economia no transporte e no aterramento. Este sistema também é de grande interesse no confinamento e desaguamento de sedimentos dragados, contaminados ou com partículas em suspensão, reduzindo risco de contaminação e alteração do meio ambiente.

A pesquisa realizada mostra que não há uma concepção padrão dos tubos. Ela depende de cada caso proposto, devendo ser considerados, por exemplo, o volume de material, sua granulometria, tipo de contaminante (se houver), área disponível para desaguamento, bomba para preenchimento etc. Como pôde ser visto no capítulo 3, a técnica de desaguamento por tubos têxteis tem a possibilidade de ser aplicada em diferentes tipos de materiais com diferentes composições e a sua viabilidade econômica e contribuição ambiental são indiscutíveis em vários casos.

Os tubos podem ter uma ou duas camadas de geotêxtil, em função das pressões impostas e das deformações permitidas. Em alguns casos, apenas um geotêxtil não tecido é suficiente para resistir aos esforços e garantir a retenção. Em outros casos apenas uma camada de um geotêxtil tecido pode responder às necessidades de resistência à tração e capacidade de retenção. Nos casos onde as solicitações são mais elevadas ou há necessidade de garantir o funcionamento do filtro em pequenas deformações e a eficiência na retenção é somente mantida pelas propriedades de um geotêxtil não tecido, geralmente são utilizadas duas camadas de geotêxtil, uma de produto tecido, para resistir às solicitações mecânicas, e uma de não tecido para o elemento de filtro.

Um ensaio prévio com bolsas de geotêxtil é fundamental para a análise da retenção das partículas e do comportamento durante a filtração do material, permitindo também a avaliação da retenção dos contaminantes (se houver) através do fluido drenado que deve ser coletado durante o ensaio. Este ensaio, porém, não permite a análise do desaguamento por completo, uma vez que este processo está diretamente ligado ao peso próprio do material e à área filtrante.

Durante o desaguamento de materiais finos, uma película se forma na interface geossintético/material, conhecida por "Filter Cake". O seu aparecimento traz benefícios ao processo de retenção das partículas, em contrapartida, diminui a permeabilidade, o que

dificulta a eliminação do fluido existente. Isto provoca o surgimento de um núcleo com alto teor de umidade, tornando-se, algumas vezes, necessária a abertura dos tubos para que haja uma melhor evaporação do fluido. Na situação atual, apenas experimentos em verdadeira grandeza, pelo menos em termos da secção transversal, poderiam permitir avaliar a eficiência do desaguamento.

Em relação à colmatação química e biológica do geotêxtil utilizado, é importante ressaltar que deve sempre haver uma parceria com químicos e biólogos para se ter um maior domínio da situação. Além disto esta parceria facilita aplicar técnicas que melhorem a eficiência do desaguamento ou da retenção, como por exemplo, o emprego de flocculantes.

O estudo da forma que o tubo de geotêxtil vai assumir ao ser preenchido é fundamental. Para diferentes níveis de pressão de enchimento, a forma pode ser alterada e com isso a área ocupada pelo tubo também varia, estes efeitos são claramente verificados nas discussões do capítulo 5. Apesar de algumas propostas simplificadas, a forma mais observada em experimentos tende a ser uma elipse com a base achatada.

Na realidade o problema é complexo e o estudo da forma e das solicitações mecânicas durante o enchimento exigem cálculos que necessitam de uma rotina computacional. Apesar do programa GeoCoPS<sup>TM</sup> (2.0) ser o método mais aplicado atualmente e ter apresentado maior precisão nos resultados, as propostas de Kazimierowicz (1994) e de Liu et al (Silvester 1990) também permite encontrar valores razoáveis em termos de tração.

Um detalhe importante para o bom desempenho dos tubos é a costura. Recomenda-se que os tubos cheguem costurados de fábrica ao local de desaguamento, para que seja garantido um controle de qualidade industrial. A linha para a costura deve ser compatível com o tipo de meio adjacente ao qual será exposta, são informações, por exemplo, que devem ser passadas ao fabricante.

A utilização de tubos de geotêxtil para desaguamento de material fino com alto teor de umidade, seja contaminado ou não, é relativamente recente e ainda há uma série de fatores a serem estudados. Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a análise mais aprofundada do processo de desaguamento e do próprio adensamento, através de ensaios de bolsa ou “Bag test” como um estudo preliminar de modo a compreender melhor o processo de retenção de contaminantes, inclusive para materiais submetidos à ação de flocculantes.

Outra linha de pesquisa que pode trazer muitos esclarecimentos em relação a este mesmo tema é a questão do processo de sedimentação do material no interior do tubo de geotêxtil. Seria relevante o estudo das zonas de deposição das partículas à medida que o material vai sendo bombeado, procurando observar a alteração no tempo de desaguamento

através de modelos reduzidos e em verdadeira grandeza, onde seria possível também avaliar as deformações no geotêxtil e alterações em suas características relativas à capacidade de filtração. Associados a essa análise poderiam ser feitos ensaios de filtração em fluxo unidirecional, tanto no sentido horizontal como no vertical, complementando a avaliação do arranjo das partículas em relação ao tempo, permitindo observar a evolução da condutividade hidráulica e a formação do “Filter Cake”.

Para isso, as futuras pesquisas podem trabalhar com geotêxteis tecidos e não tecidos. Os não tecidos, geralmente considerados mais eficientes como filtro, apresentam grandes deformações quando submetidos à tração, podendo ter suas características hidráulicas muito alteradas pelas solicitações mecânicas ou não suportá-las. Assim sendo, freqüentemente são propostas bolsas duplas, compostas de geotêxtil tecido para suportar as solicitações mecânicas e de um não tecido para a função de filtração. O trabalho proposto pode analisar a eficiência de bolsas simples e duplas.

Seria de grande importância o desenvolvimento de formulações baseadas no comportamento em desaguamento de material fino (contaminado ou não), utilizando, por exemplo, a teoria de cascas, em virtude de atualmente apenas haver propostas de análise numérica em relação ao dimensionamento face às solicitações mecânicas direcionadas a contenção de material granular. A proposta atual que permite o cálculo da pressão de preenchimento do tubo, da altura de enchimento e tração no geotêxtil, entre outras características geométricas do tubo, é voltada para materiais granulares, permitindo apenas um estudo preliminar no caso de lodos e sedimentos finos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. J., P. C., Oliveira, S. L., Capítulo. In: Oliveira, A. M. S. e Brito, S. N. A. (Editores), **Geologia de Engenharia – ABGE**. Capítulo 26 “Mineração”, pp 432-438. Oficina de Textos, SãoPaulo, Brasil, 1998.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D 4884**, Standard Test Method for Seam Strength of Sewn Geotextiles, Estados Unidos, 1990.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM 1987**: Standard Test Method for Biological Clogging of Geotextile or Soil/Geotextile Filters. Estados Unidos, 1991.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4355**: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Exposure to Ultraviolet Light and Water (Xenon Arc Type Apparatus). Estados Unidos, 1992.

AMOCO FABRICS AND FIBERS COMPANY, **Stabilization – Application Guidelines**, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12824**: Geotêxteis – Determinação da Resistência em Tração Não Confinada em Ensaio de Faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13134**: Geotêxteis – Determinação da Resistência em Tração Não Confinada de Emendas em Ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10006**: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

BAKER, T. L. Long term relationship of outdoor exposure to xenon-arc test apparatus exposure. In: GEOSYNTHETICS'97, 1997, Long beach, EUA, p. 177-190.

BOGOSSIAN, F., SMITH, R.T., VERTEMATTI, J.C., E YAZBEK, O. Continuous retaining dikes by means of geotextiles. 2<sup>ND</sup> INT. CONF. ON GEOTEXTILES, 1982, Las Vegas, Nev., p. 211-216.

BORMA, L. S. Acidificação e liberação de metais pesados em sedimentos dragados, Tese D.Sc., COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

BORMA, L. S., EHRLICH, M., BARBOSA, M. C. Caracterização de um sedimento lagunar para efeito de dragagem e disposição em terra, In: 4<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL - REGEO'99, dezembro de 1999, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ITA, 1999. p. 275-285.

BRITISH STANDARD. **BS 8006**: Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills. Inglaterra – RU, 1995.

BUSCH, D. I. Variation of long term design strength of geosynthetics in temperature up to 40°C, 4<sup>TH</sup> INTERN. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 1990, The Hague, Holanda, p. 673-676.

CARROLL, R.P. Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes. geotechnical fabrics report, IFAI, 1994, 12(8). p. 4-15.

CHAGAS, W. F. Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2000. Dissertação de Mestrado defendida pela Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública.

CHRISTOPHER, B.R., HOLTZ, R.D., FISHER, G.D. Research needs geotextile filter design, INTERNATIONAL CONFERENCE ON FILTERS AND FILTRATION PHENOMENA IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 1993, Karlsruhe, Germany, p.19-20.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Disponível em: [http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/legis\\_licenc.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/legis_licenc.htm) Acesso em: 22 de maio de 2004 às 15h e 20min..

CORDEIRO, J. S. **Noções de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Capítulo 5: Remoção de água de lodos de ETA's através de filtração forçada Série Lodo das publicações do Programa de Pesquisa em saneamento Básico – PRSAB. Marco Antônio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro, 1999.

DIAZ, V., Myles, B. **Field sewing of geotextiles**, Industrial Fabrics Association International, 1990, St. Paul, 29 p.

DUKE, M. L., Fowler, J., Schmidt, M. L., Askew, A. C. Dredging and Dewatering of hazardous impoundment sediment using the Dry Dredge™ and geotubes. Junho de 2000. Disponível em: <<http://geotecassociates.com/publications/publications.htm>>. Acesso em: 15 de março de 2003 às 11h 25min.

FANNIN, R. J. , SHI, Y. C. , VAID, Y. P. Permeability requirements for geotextile filter design, SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1998, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1009-1012.

FORRIE, A. B. e Addis, P. C. Changes in filtration opening size of woven geotextiles subject to tensile loads. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 17, p. 331-334, 1999.

FOWLER, J., DUKE, M., SCHMIDT, M.L., CRABTREE, B., BAGBBY, R.M., E TRAINER, E. Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes. GEOSYNTHETICS - 7<sup>TH</sup> ICG, 2002, Nice. **Anais...Nice**, 2002. p. 1007-1012.

FURTADO, J. S., Margarido, A. C., Silva, E. R. F., Silva, M. L. P., Straube, C. D., Suzuki, S. M., Yamada, A. H. **Prevenção de Resíduos na Fonte & Economia de Água e Energia**.



Programa de Produção Limpa. Depto de Engenharia de Produção & Fundação Vanzolini, Escola Politécnica USP, novembro de 1998, São Paulo.

GAFFNEY, D.A., Martim, S.M., Maher, M.H., Bennert, T.A. **Dewatering contaminated, fine-grained material using geotextiles**. SI Geosolutions, 1999.

GAFFNEY, D. A., Moo-Young, H. K. **Dewatering highly organic, fine-grained dredge material using geotextile tubes - technical note**. SI Geosolutions, agosto de 2000.

GOURC, J.P. E FAURE, Y.H. Soil particles, water and fibers – a fruitful interaction now controlled. IV INT. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. 1990, The Hague, Holanda, Balkema, p. 947-972.

GOURC, J.P. Quelques aspects du comportement des géotextiles en mécanique des sols. Tese de Doutorado. Université Joseph Fourier, Grenoble, França, 1982

GREENWOOD, J. H. The creep of geotextiles. 4<sup>TH</sup> INTERN. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. 1990, The Hague, Holanda, p. 645-650.

HERTLE, A. R. H., Norrish, A. M. Sludge ponds versus mechanical dewatering for a wastewater treatment plant with biological phosphorus removal.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION - IMO. Report of the nineteenth consultative meeting of contracting parties to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter. 1995, Marine Division, Londres, Reino Unido.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10319**: Geotextiles and geotextiles related products – wide-width tensile test. 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10321**: Geotextiles and geotextiles related products – tensile tests for joints/seams by wide-width method. 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11058:** Geotextiles and geotextiles related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load. (1999)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13431:** Geotextiles and geotextiles related products – determination of tensile creep and creep rupture behavior. 1998, 16 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12956:** Geotextiles and geotextiles related products – determination of the characteristics opening size. 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO / EN 13434:** Geotextiles and geotextiles related products – guidelines on durability, Technical Report. 1998, 34 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO / TR 10722 – 1:** Geotextiles and geotextile-related products – procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials, Technical Report. 1998, 7 p.

JORDÃO, E. P., Pessoa, C. A., **Tratamento de esgoto doméstico**. 628.3 J82t V.1. Capítulo 10, pp. 185-203. Rio de Janeiro, Brasil, 1975

KAZIMIEROWICZ, K. Simple Analysis of Deformation of Sand-Sausages. In: 5<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILE, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. 1994, Singapore, p. 775-778.

KOERNER, R. M. **Design with geosynthetics**. 1998, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

LAFLEUR, J. Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils, **Geotextiles & Geomembranes**, v. 17, p.299-312, 1999.

LANGENHOVE, L. V. Conclusions of an extensive BRITE-research programme on ageing. In: IV INT. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. 1990, The Hague, Holanda, Balkema, p. 703-707.

LESHCHINSKY, D., Leshchinsky, O. **Geosynthetic Confined Pressurized Slurry (GeoCoPS): Supplemental Notes. Technical Report CPAR-GL-96-1**, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 54 p., 1996.

LESHCHINSKY, D., Leshchinsky, O. ADAMA Engineering, Inc., **GeoCoPS (2.0): Supplemental Notes**, 2002.

LESHCHINSKY, D. Issues in geosynthetic-reinforced soil. In: Int. SYMP. ON EARTH REINFORCED PRACT. 1992, Kyushu, Japan. Balkema, Rotterdam, pp. 871-897.

LIU, G.S. Design criteria of sand sausages for beach defences. In: 19<sup>TH</sup> CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. 1981, New Delhi, India. Subject B (b), Paper n°6. p.123-131.

MOO-YOUNG, H. K., Tucker, W. R. Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, p. 191-212, 2002.

MOO-YOUNG, H. K., Gaffney, D. A., Mo, X. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, p. 289-303, 2002.

MORI, H., MIKI, H., E TSUNEOKA, N. The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredge soil. In: GEOSYNTHETICS - 7<sup>TH</sup> ICG, 2002, Nice. **Anais...Nice**, 2002. p. 1017-1020.

NETZSCH. Disponível em: <<http://www.netzsch.com.br/filtros/download/it0009.pdf>>. Acesso em: 5 de março de 2005 às 14h e 25min.

OBLADEN, N. L. **Aterro Sanitário para Resíduos Sólidos Urbanos**. Programa de Treinamento Novas Tendências Profissionais promovido pela Federação das Associações de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado do Paraná – FEAPAR, 2004, Curitiba.

PALMEIRA, E. M. E FANNIN, R.J. Abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento. In: XI CONG. BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. 1998, Brasília, p.657-659.

PILARCZYK, K. W. **Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering.** ISBN-9058093026. 2000, Balkema.

REALI, M. A., Patrizzi, L. J., Cordeiro, J. S. **Noções de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Capítulo 4: Desidratação de lodo por centrifugação. Série Lodo das publicações do Programa de Pesquisa em saneamento Básico – PRSAB. Marco Antônio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro, 1999.

RITCHIE, A. I. M. **Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport, MAC short course handbook.** Waterloo, Ontario, Canadá: Jambor, J. L. & D. W. Blowes, maio de 1994, v. 22, p. 201-246. .

ROCHHOLZ, J. M. E KIRSHNER, R. Creep of geotextiles at different temperatures. In: 4<sup>TH</sup> INTERN. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. 1990, The Hague, Holanda, p. 657-659.

SALMAN, A., ELIAS, V., JURAN, I., LU, S. E PEARCE, E. Durability of geosynthetics based on accelerated laboratory testing. In: GEOSYNTHETICS'97. 1997, Long Beach, EUA, p. 217-234.

SALMAN, A., ELIAS, V., DIMILLIO, A. The effect of oxygen pressure, temperature and manufacturing Processes on laboratory degradation of polypropylene geosynthetics. In: 6<sup>TH</sup> INT CONF. ON GEOSYNTHETICS. 1998, Atlanta, EUA, p. 683-690.

SILVEIRA, A. An analysis of the problem of washing through in protective filters. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 1965, Montreal, Canadá, p.551-555.

SILVESTER, R. Use of grout-filled sausages in coastal structures. **Journal of Waterway Post Coastal and Ocean Engineering**, ASCE. 112 (1), pp. 95-114.

SILVESTER, R. Flexible membrane units for breakwaters. **Handbook of Coastal and Ocean Engineering**. 1990, John B. Herbich., Vol. 1, p. 921-938.

SYNTHETICS INDUSTRIES COMPANY. **Geotextile tubes for industrial /agricultural dewatering**. 2003.

TRESSOLDI, M., Consoni, Capítulo. In: Oliveira, A. M. S. e Brito, S. N. A. (Editores), **Geologia de Engenharia – ABGE**. Capítulo 21 “Disposição de Resíduos”, pp 333-360. Oficina de Textos, SãoPaulo, Brasil, 1998.

U.S. ARMY OPERATIONS SUPPORT COMMAND. U.S. Army Attributes Success of Dredging Clean-Up Project to "Innovative Technology", New Mud Cat™ MC-2000 Auger Dredge Used, By Gale Smith. Disponível em: <http://www.mudcat.com/environmental/us-army-success-1.htm>. Acesso em: 30 de março de 2003 às 15h e 35min.

URASHIMA, D.C. Dimensionamento de Filtros Têxteis por teoria Probabilística, Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 1996.

URASHIMA, D., VIDAL, D. E BENARDES, G. Abertura de filtração de geotêxteis: Determinação das características do produto e critérios de dimensionamento. 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Rio de Janeiro, 1999.

VIDAL, D., RIGHETTI, C.C. Propriedades hidráulicas dos geotêxteis. In: VI CBGE / XI COBRAMSEF. 1990, Salvador, p.35-44.

VIDAL, D., VIEIRA, B. M., MELLO, J. L. Metodologia para análise da durabilidade de geossintéticos frente a agentes químicos. In: II SIMPÓSIO DE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS. Novembro de 1991, Rio de Janeiro, p. 295-304.

VIDAL, D., FABRIN, T. W., MONTEZ, F. T. O conceito de fatores de redução aplicados às propriedades dos geossintéticos. In: GEOSSINTÉTICOS'99. Outubro de 1999, Rio de Janeiro.

VIDAL, D., URASHIMA, D. C. Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos. In: GEOSSINTÉTICOS'99. Outubro de 1999, Rio de Janeiro.

VIDAL, D. Aplicações Especiais de Geossintéticos. In: 4° SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. 2003, Porto Alegre.

WATTS, R. J. **Hazardous Wastes: Sources, Pathways, Receptors.** Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| 1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO<br><p style="text-align: center;">TM</p>  | 2. DATA<br><p style="text-align: center;">31 de março de 2005</p> | 3. DOCUMENTO N°<br><p style="text-align: center;">CTA/ITA-IEI/TM-002/2005</p> | 4. N° DE PÁGINAS<br><p style="text-align: center;">103</p> |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br>Sistemas Tubulares para Contenção de Lodo e Sedimentos Contaminados   |   |   |  |
| 6. AUTOR(ES):<br><b>Nathalia Paiva Barbosa de Castro</b>  |   |   |  |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI   |   |   |  |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br>Tubos de geotêxtil, desaguamento, lodos, sedimentos contaminados, solicitações mecânicas, solicitações hidráulicas, filtração, disposição de resíduos, retenção, contenção, fluido drenado, teor de umidade, tração.   |   |   |  |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br>Geossintéticos; Filtragem; Desaguamento (Geotecnia); Rejeitos sólidos; Engenharia geotécnica.  |   |   |  |
| 10. APRESENTAÇÃO:<br>ITA, São José dos Campos, 2005 103 páginas   |   |   |  |
|   |   | <b>X Nacional</b>   | <b>Internacional</b>                                       |
| 11. RESUMO:<br>O trabalho faz uma análise da técnica de desaguamento de lodo e sedimentos dragados (contaminados ou não), por meio de tubos de geotêxtil, através da abordagem de suas características mais relevantes, apresentando exemplos de aplicação e avaliando o processo de desaguamento face às solicitações mecânicas e hidráulicas às quais todo o sistema está submetido. Este estudo é justificado pelo dilema enfrentado atualmente em relação a como, onde e por quanto tempo dispor os resíduos gerados pelas atividades humanas. O desaguamento é uma etapa pela qual os resíduos e sedimentos dragados devem ser submetidos em função do grande volume apresentado e a dificuldade de serem transportados e aterrados. A técnica de desaguamento por tubos de geotêxtil vem ao encontro desta necessidade de redução do teor de umidade, mostrando, em alguns casos, um melhor desempenho em relação a técnicas convencionais ou até mesmo podendo ser aproveitada como um recurso de otimização do processo de desaguamento sem abandonar a técnica já empregada para tal fim. Esta técnica teve seu início nos anos 80 com a finalidade de empregar tubos de geotêxtil para conter material granular, a fim de criar diques para a construção de aterros hidráulicos ou para controle de erosão. A partir do mesmo princípio, experiências voltadas para a questão ambiental, na contenção de material contaminado e material dragado fino foram surgindo e, desde então, tem-se confirmado que, se dimensionados corretamente, os tubos de geotêxtil para desaguamento de materiais finos são uma alternativa viável, principalmente do ponto de vista econômico. |   |   |  |
| 12. GRAU DE SIGILO:<br><b>(X) OSTENSIVO</b> ( ) RESERVADO      ( ) CONFIDENCIAL      ( ) SECRETO  |   |   |  |