

**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 no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infra-Estrutura Aeroportuária.**

**Catarina Silveira Muñoz**

**Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente  
instáveis**

**Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:**



**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Delma de Mattos Vidal**  
**Orientadora**

**Prof. Dr. Homero Santiago Maciel**  
**Chefe da Divisão de Pós-Graduação**

**Campo Montenegro**  
**São José dos Campos, São Paulo – Brasil**  
**2005**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA**

Muñoz, Catarina Silveira

Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis / Catarina Silveira Muñoz.

São José dos Campos, 2005.

119f.

Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. Orientadora: Profª. Drª. Delma de Mattos Vidal.

1.Geotêxteis. 2.Filtração. 3.Solos internamente instáveis. I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica. II. Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA –**

MUÑOZ, Catarina Silveira. **Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis**. 2005. 119p. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS –**

NOME DO AUTOR: Catarina Silveira Muñoz

TÍTULO DO TRABALHO: Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis

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.

---

Catarina Silveira Muñoz

Av. 27 de janeiro, 651. Centro, Jaguarão, RS – CEP: 96300-000

# **Desempenho de Geotêxteis na Filtração de Solos Internamente Instáveis**

**Catarina Silveira Muñoz**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Régis Martins Rodrigues	Presidente - ITA
Profª. Delma de Mattos Vidal	Orientador - ITA
Prof. Paulo Ivo Braga de Queiroz	ITA
Profª. Denise de Carvalho Urashima	UNESP
Profª. Maria das Graças Gardoni Almeida	UFMG

**ITA**

## DEDICATÓRIA

*Ao meu pai Homero,  
com todo amor, orgulho e admiração.*

*Aos meus familiares,  
cujo estímulo viabilizou a realização deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente à minha família, minha mãe Olenca, meus irmãos Isaura e Gustavo, meus cunhados Adriana e Francisco e minha tia Nadir pelo apoio, incentivo e compreensão da ausência durante este período. Aos meus sobrinhos, Luiz Francisco e Henrique, agradeço os momentos de alegria.

À professora orientadora Delma pela dedicação com que se dispôs sempre a ajudar em todas as etapas da pesquisa, assim como, pelo exemplo de profissionalismo e confiança que manifestou em meu trabalho.

Ao professor Paulo Ivo pela amizade e constante ajuda em todo o período do mestrado e ao professor Akio pela amizade e cooperação. Às professoras Denise e Maria das Graças pela pronta disponibilidade de participação na banca examinadora e contribuições que enriqueceram este trabalho.

Ao meu namorado Clovis pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis.

À amiga Bárbara pela amizade e companheirismo desde o início do mestrado. Aos amigos Renato e Paula pela ajuda no desenvolver da tese e realização de ensaios. Aos amigos de São José dos Campos, Betânia, Denílson, Heloisa, Hudson, Marcus, Mariana, Mauro, Michela, Nathália, Nadiane, Renata, Ronaldo, Virgínia e Viviane.

Aos amigos do sul, Caroline, Laura, Ana Cristina e Paulo César, por manterem-se presentes apesar da distância.

Aos técnicos do laboratório de geotecnia Reinaldo e Guilherme pela atenção e colaboração na realização dos ensaios.

À equipe da biblioteca, principalmente Pedro e Elaine, pela prestativa ajuda sempre que necessária.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Finalmente, agradeço também a todos os demais que estiveram presentes durante esta etapa e me ajudaram de alguma forma e não foram citados.

## RESUMO

A filtração de solos com granulometria ampla pode apresentar problemas devido ao risco de ruptura da estrutura do solo ou de colmatação do filtro, pois este tipo de solo pode não ser capaz de reter suas próprias partículas finas, apresentando um comportamento internamente instável. Assim, um solo é descrito como tendo uma granulometria instável se apresentar carreamento de suas partículas finas devido à ação de algum agente perturbador. Esta pesquisa apresenta um estudo sobre o desempenho de geotêxteis não-tecidos agulhados aplicados na filtração desses solos críticos

A campanha experimental envolve ensaios de caracterização dos geotêxteis e ensaios de filtração de longa duração tipo Razão entre Gradientes para avaliação do comportamento dos sistemas solo/filtro, tendo sido testados dois geotêxteis não tecidos de massa por unidade de área diferentes e três materiais de base preparados com frações de pó de brita, a partir de curvas granulométricas específicas com formato côncavo.

O trabalho analisa a condição de estabilidade interna dos solos de base e discute a aplicabilidade dos métodos de classificação para solos granulares. O desempenho dos filtros é avaliado considerando critérios de retenção, colmatação e permeabilidade, aplicáveis a solos instáveis. Um critério de retenção racional, baseado em análises probabilísticas, é também considerado.

Os resultados obtidos nos ensaios demonstram a influência da intensidade e do modo de aplicação do gradiente hidráulico no comportamento de um geotêxtil como elemento filtrante, sendo no caso estudado, a colmatação do sistema agravada com o aumento do gradiente. Dos solos utilizados apenas o de estrutura mais aberta e curva granulométrica com concavidade mais acentuada apresenta colmatação ao longo do tempo, enquanto os dois outros apresentam pouca variação do GR no decorrer do ensaio.

## ABSTRACT

Broadly graded soils filtering may be a problem due to the risk of soil structure rupture or filter clogging, because this soil type some times isn't able to retain its own fine particles presenting an internal unstable behavior. Thus, a soil is described as having an unstable gradation when its fine particles could be washed out due to some disturbing agent's action. This research presents a study about performance of nonwoven geotextiles acting as filtering element of these critical soils.

The experimental analysis involves geotextiles index tests and long time filtration tests, type Gradient Ratio, for evaluation of the soil/filter systems behavior. For this, two geotextiles with different mass by unit of area and three base materials were considered. The base materials were prepared from stonebreaker powder fractions, to be close with specific concave upward grain size distribution curves.

The work analyses the internal stability condition of the base soils and consider the applicability of some granular soils classification methods presented in literature. The filters performance is evaluated considering some retention, clogging and permeability criteria applicable to unstable soils. A rational retention criterion, based on probabilistic analysis is too considered.

The tests results evince the influence of the hydraulic gradient intensity and the applied method to get it, in the behavior of a geotextile acting as a filtering element. In these tests, the system clogging worsened with the gradient increase. Considering the soils tested, only the soil with a much opened fabric and the more upwardly concave grain size distribution curve presents clogging. The others soils base present little variation of the GR values during the test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Geotêxtil tecido (a) e geotêxtil não-tecido (b). .....	19
Figura 2.2. Erosão interna e sufusão do solo (Adaptação: John, 1987). .....	26
Figura 2.3. Arranjo de partículas e formação de pré-filtro (Adaptação: Urashima, 2002). .....	27
Figura 2.4. Colmatação em filtros geotêxteis (Fonte: Palmeira, 2003). .....	28
Figura 2.5. Constrição (Fonte: Giroud et al., 1998). .....	30
Figura 2.6. Canal de fluxo em um geotêxtil formado por sucessão de poros (Adaptação: Palmeira, 2003). .....	31
Figura 2.7. Curva de distribuição de tamanho de constrições e curva de distribuição de aberturas de filtração (Adaptação: Giroud et al., 1998). .....	31
Figura 2.8. Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla (Adaptação: Lafleur, 1999). .....	39
Figura 2.9. Obtenção de P a partir da curva de distribuição de poros de um determinado geotêxtil (Fonte: Urashima, 2002). .....	44
Figura 3.1. Método de análise do formato das curvas granulométricas (Adaptação: Kenney e Lau, 1985). .....	52
Figura 3.2. Forma das curvas de granulometria estável e instável (Adaptação: Kenney e Lau, 1985). .....	53
Figura 3.3. Curvas granulométricas típicas de solos amplamente graduados (Adaptação: Lafleur et al., 1993). .....	54
Figura 3.4. Curvas granulométricas (Adaptação: Lafleur et al., 2002). .....	55
Figura 3.5. Curvas utilizadas por Lafleur (1999) no método gráfico proposto por Kenney e Lau. ....	59
Figura 4.1. Curvas granulométricas dos solos de base utilizados. ....	63
Figura 4.2. Análise dos materiais de base pelo Método Gráfico de Classificação Kenney e Lau (1985). .....	63
Figura 4.3. Equipamento para ensaio de abertura de filtração por peneiramento via úmida. ..	66
Figura 4.4. Esquema do equipamento de filtração à carga variável (Fonte: URASHIMA, 2002). .....	67
Figura 4.5. Equipamento de ensaio de razão entre gradientes. ....	70
Figura 4.6. Detalhes do permeâmetro. ....	71

Figura 4.7. Ensaio realizado com fluxo ascendente com elevação do particulado fino.....	72
Figura 4.8. Cargas piezométricas versus distância da superfície do geotêxtil. ....	73
Figura 4.9. Tubos internos das entradas piezométricas. ....	74
Figura 4.10. Esquema dos piezômetros usados na campanha de ensaio (escala indicada em centímetros). ....	75
Figura 4.11. Efeito do uso de CO <sub>2</sub> na permeabilidade do sistema no tempo (Adaptação: Fischer et al., 1999). ....	76
Figura 4.12. Saturação do sistema. ....	78
Figura 5.1. Curva granulométrica padrão utilizada nos ensaios de abertura de filtração.....	80
Figura 5.2. Curva granulométrica do material passante no ensaio de abertura de filtração – Geotêxtil G <sub>1</sub> e G <sub>2</sub> . ....	81
Figura 5.3. Furo de agulhagem geotêxtil G1 e partícula entre peneiras 140 e 170. ....	81
Figura 5.4. Furo de agulhagem geotêxtil G2. ....	82
Figura 5.5. Curva de resultados do ensaio de filtração à carga variável. ....	82
Figura 5.6. Curva de distribuição de poros obtida com proposta teórica de Gourc (1982). ....	83
Figura 5.7. Vazão versus tempo para ensaios M1 e E1. ....	89
Figura 5.8. Condutividades hidráulicas em diferentes camadas do solo base. ....	90
Figura 5.9. Gráficos representando as cargas piezométricas ao longo da altura do material de base a partir da superfície do geotêxtil nos ensaios M1 e E1. ....	90
Figura 5.10. Oscilação da Razão entre Gradientes no tempo, ensaio M1. ....	91
Figura 5.11. Razão entre Gradientes no tempo, ensaio M2 e E6. ....	91
Figura 5.12. Dados de vazão versus tempo para ensaios com geotêxtil G1. ....	92
Figura 5.13. Dados de vazão versus tempo para geotêxtil G2. ....	93
Figura 5.14. Razão entre gradientes versus tempo com material de base A. ....	94
Figura 5.15. Razão entre Gradientes versus tempo com material de base B. ....	95
Figura 5.16. Razão entre Gradientes versus tempo com material de base C. ....	95
Figura 5.17. Indicação das camadas de material de base consideradas para cálculo das condutividades hidráulicas parciais. ....	96
Figura 5.18. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E1. ....	97
Figura 5.19. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E2. ....	97
Figura 5.20. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E3. ....	97
Figura 5.21. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E4. ....	98
Figura 5.22. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E5. ....	98

Figura 5.23. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E6. ....	98
Figura 5.24. Curvas granulométricas inicial e de duas camadas do material de base após ensaio E3. ....	99
Figura 5.25. Curvas granulométricas inicial e de duas camadas do material de base após ensaio E4. ....	100
Figura 5.26. Gráficos das cargas piezométricas ao longo do material de base a partir da superfície do geotêxtil no início e fim de ensaio. ....	101
Figura 5.27. Imagem parte inferior do geotêxtil G1 após ensaio E1. ....	102
Figura 5.28. Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E4. ....	102
Figura 5.29. Imagem parte inferior do geotêxtil G1 após ensaio E2. ....	102
Figura 5.30. Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E5. ....	102
Figura 5.31. Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E6. ....	102
Figura 5.32. Imagens da superfície de interface do geotêxtil com o solo após ensaio. ....	104
Figura A.1. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E1. ....	116
Figura A.2. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E2. ....	116
Figura A.3. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E3. ....	117
Figura A.4. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E4. ....	117
Figura A.5. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E5. ....	118
Figura A.6. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E6. ....	118
Figura A.7. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio M1. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores das condições de contorno e suas aplicações .....	37
Tabela 2.2. Valores de coeficiente A, onde $t_g$ é a espessura do geotêxtil em metros.....	38
Tabela 2.3. Critério de Retenção – FHWA. ....	41
Tabela 2.4. Critério de prevenção à colmatação – FHWA.....	41
Tabela 3.1. Características dos solos utilizados por Lafleur (1999).....	58
Tabela 3.2. Resumo de comportamento à filtração dos sistemas (Fonte: Lafleur, 1999) .....	60
Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis utilizados pelo autor (Fonte: Lafleur, 1999). ....	60
Tabela 4.2. Características das curvas granulométricas utilizadas.....	64
Tabela 4.3. Características dos geotêxteis utilizados .....	65
Tabela 4.4. Resumo dos sistemas solo/geotêxtil utilizados no ensaio de filtração. ....	79
Tabela 5.1. Resumo dos resultados dos Critérios de Retenção e Colmatação analisados.....	85
Tabela 5.2. Dimensionamento quanto à retenção e colmatação usando valores fornecidos pelo fabricante. ....	86
Tabela 5.3. Dimensionamento quanto à retenção e colmatação usando $O_{90}$ .....	86
Tabela 5.4. Diâmetro com nível de confiança de retenção igual a 95% e nível de confiança de retenção para os diâmetros indicativos dos materiais de base.....	87
Tabela 5.5. Resumo dos resultados dos Critérios de Permeabilidade. ....	88

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	14
1.1.	Relevância do estudo.....	14
1.2.	Objetivo da pesquisa.....	15
1.3.	Estrutura dos capítulos.....	15
2.	Mecanismos de filtração com uso de geossintéticos.....	17
2.1.	Introdução.....	17
2.2.	Filtros geotêxteis.....	17
2.2.1.	Geotêxteis e sua estrutura.....	17
2.2.2.	Propriedades.....	19
2.2.3.	Porosidade, porometria e abertura de filtração.....	20
2.2.4.	Condutividade hidráulica.....	22
2.2.5.	Aptidão à embebição.....	25
2.3.	Fatores de influência da filtração.....	25
2.3.1.	Conceitos básicos.....	25
2.3.2.	Influência da estrutura do geotêxtil.....	29
2.3.3.	Estrutura do meio a filtrar.....	32
2.3.4.	Influência de solicitações.....	34
2.4.	CrITÉrios de dimensionamento.....	35
2.4.1.	Introdução.....	35
2.4.2.	CrITÉrio do Comitê FrancÊs de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG, 1986) ..	36
2.4.3.	CrITÉrio Lafleur (1999).....	38
2.4.4.	CrITÉrio do Federal Highway Administration (FHWA, 1985).....	40
2.4.5.	CrITÉrio de Giroud (1996).....	41
2.4.6.	CrITÉrio Racional (1996, 2002, 2003).....	43
3.	Condições de estabilidade.....	46
3.1.	Introdução.....	46
3.2.	Exemplos de aplicações prÁticas de solos com tendÊncia à instabilidade interna....	46
3.3.	Solos com condições de instabilidade interna.....	48
3.4.	Métodos de classificação da estabilidade.....	50
3.5.	Comportamento solos instÁveis face à filtração.....	55
4.	Metodologia de Ensaio.....	62
4.1.	Introdução.....	62

4.2.	Materiais de base .....	62
4.3.	Filtros geotêxteis .....	64
4.4.	Ensaio de Caracterização Hidráulica .....	65
4.5.	Ensaio de Filtração de Longa Duração.....	68
4.5.1.	Concepção de ensaio .....	68
4.5.2.	Considerações sobre o ensaio.....	71
4.5.3.	Procedimento de ensaio adotado .....	77
5.	Resultados.....	80
5.1.	Ensaio de caracterização .....	80
5.1.1.	Ensaio de abertura de filtração .....	80
5.1.2.	Ensaio de filtração à carga variável.....	82
5.2.	Dimensionamento.....	84
5.2.1.	Dimensionamento quanto aos Critérios de Retenção e Colmatação .....	84
5.2.2.	Dimensionamento quanto ao Critério de Permeabilidade .....	87
5.3.	Ensaio de Razão entre Gradientes .....	89
5.3.1.	Influência da aplicação do gradiente .....	89
5.3.2.	Influência do material de base.....	92
5.4.	Comentários.....	103
6.	Conclusões, comentários e sugestões para pesquisas futuras.....	105
6.1.	Conclusões e comentários finais.....	105
6.2.	Sugestões para pesquisas futuras.....	108
	Referências bibliográficas .....	110
	Apêndice A.....	115

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Relevância do estudo

Geotêxteis têm sido utilizados em grande número de obras geotécnicas e hidráulicas com função drenante e de filtração, devido a sua facilidade e rapidez de execução quando comparado aos sistemas convencionais, assim como, pela regularidade do material por ser um produto sintético industrializado.

Segundo Koerner (1999), a função do geotêxtil na filtração envolve o fluxo adequado do líquido e a retenção das partículas com tendência ao carreamento, sem reduções significativas de sua capacidade de fluxo ao longo do tempo. Portanto, para que o sistema possua uma permeabilidade adequada, o geotêxtil precisa de uma estrutura porosa, mas ao mesmo tempo, necessita de uma estrutura suficientemente densa para reter o solo.

Os vários anos de aplicação de geotêxteis em sistemas filtrantes no Brasil e no mundo, mostraram que a filtração de materiais granulares internamente estáveis é muito eficiente. No entanto, sua eficiência pode ser questionável para certos solos que apresentam estrutura interna instável. As partículas finas destes solos são carregadas devido às forças de percolação, podendo passar através do geotêxtil ou ser retidas nos poros ou na superfície da manta. Nestes casos, se houver perda acentuada de partículas existe o risco de colapso da estrutura do solo. Entretanto, se houver retenção excessiva na manta (colmatação), o acúmulo do material particulado fino poderá acarretar redução na condutividade hidráulica ao longo do tempo de funcionamento do filtro. Assim, deve-se avaliar qual alternativa é mais recomendada de acordo com o projeto em questão.

O termo estabilidade interna refere-se à capacidade que o material granular possui em prevenir a perda de suas próprias partículas finas, provocada devido à ação de agentes perturbadores, como por exemplo, vibração e percolação. O presente trabalho visa analisar o

comportamento à filtração destes solos com a utilização de geotêxteis, quando submetidos a um fluxo unidirecional com carga hidráulica elevada.

A pesquisa tem por base a análise do desempenho de geotêxteis não tecidos como filtros de solos internamente instáveis através de ensaios de comportamento à filtração de longo prazo do sistema solo/geotêxtil utilizando o ensaio de Razão entre Gradientes, baseando-se na Norma ASTM D 5101 (2001).

## **1.2. Objetivo da pesquisa**

O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de solos considerados internamente instáveis em filtração com geotêxteis submetidos a um fluxo com alta carga hidráulica, realizando avaliação da influência do formato da curva granulométrica e de alguns critérios de dimensionamento quanto à retenção, permeabilidade e colmatação quando aplicados na filtração destes solos críticos.

## **1.3. Estrutura dos capítulos**

A dissertação está dividida em 6 capítulos, cujos conteúdos são descritos abaixo:

O capítulo 2 aborda uma revisão das características de funcionamento dos filtros utilizando geossintéticos, seus critérios de dimensionamento e as deficiências atuantes no desempenho da filtração.

No capítulo 3 são abordadas as condições de estabilidade interna dos solos a serem filtrados, com considerações sobre as classificações existentes e análises do comportamento de solos instáveis encontradas na bibliografia.

O capítulo 4 discorre sobre o planejamento dos ensaios, apresentando os materiais utilizados como filtro e solo base, os tipos de ensaios detalhando os procedimentos adotados e a metodologia utilizada para desenvolvimento da campanha experimental.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos em laboratório para ensaios de caracterização dos geotêxteis e ensaios de Razão entre Gradientes, assim como, análise dos dimensionamentos para os critérios de retenção, colmatação e permeabilidade.

O capítulo 6 consta das conclusões do trabalho, comentários finais e sugestões para pesquisas futuras.

## **2. MECANISMOS DE FILTRAÇÃO COM USO DE GEOSSINTÉTICOS**

### **2.1. Introdução**

Antigamente os sistemas de drenagem eram concebidos exclusivamente com o uso de materiais naturais, como areia e brita. Atualmente, o uso de materiais manufaturados apresenta grande aceitação no mercado devido ao grande número de vantagens oferecidas. A extensa utilização de materiais geossintéticos ocorre em função da praticidade, rapidez de execução e padronização da qualidade, proporcionando redução nos custos e prazos de obras geotécnicas.

Para um filtro ser considerado com um bom funcionamento precisa reter o solo de base a ser protegido sem impedir a passagem livre do líquido, mantendo suas características ao longo da vida útil da obra (KOERNER, 1999).

Neste capítulo serão abordados os princípios de funcionamento de filtração com emprego de mantas sintéticas, com breve apresentação dos materiais comumente utilizados, suas características e alguns critérios de dimensionamento.

### **2.2. Filtros geotêxteis**

#### **2.2.1. Geotêxteis e sua estrutura**

Para filtros sintéticos são utilizadas mantas têxteis permeáveis, chamadas de geotêxteis. Os geotêxteis são produtos têxteis bidimensionais permeáveis, compostos de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica (NBR 12553, 2003).

Entre suas principais funções podemos citar filtração, proteção, reforço e separação. Embora existam geotêxteis produzidos com fibras naturais, são na grande maioria fabricados com poliéster ou polipropileno.

Em virtude da técnica de fabricação adotada, ocorrem mudanças no tipo de estrutura do geotêxtil, sendo eles classificados segundo a NBR 12553 Geossintéticos - Terminologia (2003), em:

- Geotêxtil não-tecido (GTN): produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos, sendo:
  - Geotêxtil não-tecido agulhado (GTNa): fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem.
  - Geotêxtil não-tecido termoligado (GTNt): fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento.
  - Geotêxtil não-tecido resinado (GTNr): fibras interligadas por meio de produtos químicos.
- Geotêxtil tecido (GTW): Produto oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais de fabricação denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal).
- Geotêxtil tricotado (GTK): produto oriundo do entrelaçamento de fios por tricotamento.

Normalmente para função de filtração são utilizados os geotêxteis tecidos e não-tecidos, conforme ilustra a Figura 2.1. Os geotêxteis não-tecidos apresentam uma estrutura muito mais complexa que os tecidos, possuindo a espessura como um parâmetro complementar. Eles atuam não como uma simples interface, mas sim como um meio tridimensional, visto que a

espessura passa a ser um parâmetro adicional. Os geotêxteis não tecidos termoligados tendem a ser relativamente mais finos que os agulhados.

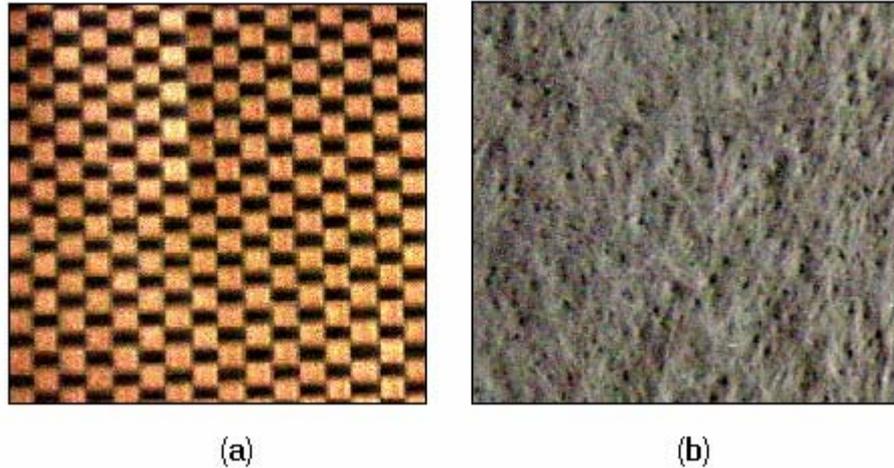


Figura 2.1. Geotêxtil tecido (a) e geotêxtil não-tecido (b).

### 2.2.2. Propriedades

A avaliação das propriedades dos geotêxteis é de suma importância em sua utilização, pois através delas pode-se determinar o padrão de qualidade dos produtos e obter parâmetros para dimensionamento de projeto. A seguir estão listadas as principais propriedades índice ou características analisadas em geotêxteis:

- a. Propriedades físicas: massa por unidade de área, espessura nominal, porosidade, densidade dos fios.
- b. Propriedades hidráulicas: condutividade hidráulica, abertura de filtração, aptidão à embebição.
- c. Propriedades mecânicas: compressibilidade, resistência à tração não confinada, resistência à penetração por puncionamento estático, resistência à perfuração dinâmica.
- d. Propriedades de interface: deslizamento e arrancamento.

Vale ressaltar que as propriedades índices obtidas em ensaios são características dos geotêxteis sem levar em consideração as condições de campo, podendo ser alteradas tanto no processo de execução da obra como durante sua vida útil. Assim, temos as propriedades funcionais, que representam o parâmetro de comportamento do geotêxtil sob condições de funcionamento, considerando circunstâncias específicas de cada obra. Os valores das propriedades funcionais devem ser maiores ou iguais aos valores das propriedades requeridas, as quais são valores calculados ou considerados no projeto para efeito de dimensionamento.

Sendo este estudo direcionado para o desempenho de geotêxteis com uso em filtração, dentre as propriedades acima citadas, as hidráulicas apresentam maior relevância.

### 2.2.3. Porosidade, porometria e abertura de filtração

A análise dos poros de um filtro envolve o estudo da porosidade e a porometria, dimensão e distribuição dos poros e é de fundamental importância para a previsão do comportamento de materiais com estrutura tridimensional como elemento filtrante (VIDAL e URASHIMA, 1999).

A porosidade é uma propriedade dos geotêxteis não-tecidos e é definida, a princípio, da mesma forma que para os solos, como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra. No caso dos geotêxteis, em geral, esta propriedade não é medida diretamente, sendo calculada em função de outras propriedades como demonstra a Equação (2.1):

$$\eta_{GT} = \left( 1 - \frac{\mu}{t_g \cdot \rho_f} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Sendo:

$\eta_{GT}$  – porosidade (%),

$\mu$  - massa por unidade de área do geotêxtil ( $\text{kg/m}^2$ );

$t_g$  – espessura do geotêxtil (m);

$\rho_f$  – massa específica da fibra ( $\text{kg/m}^3$ ).

Na determinação da porosidade, separam-se os geotêxteis tecidos e os não-tecidos. A porcentagem de área aberta é uma propriedade dos geotêxteis que possuem estrutura mais simples, como a dos tecidos por exemplo, sendo definida como a razão do total das áreas individuais das aberturas pelo total da área do material.

A porcentagem de área aberta não tem significado para os geotêxteis não-tecidos, uma vez que os mesmos apresentam poros de dimensões pequenas, de formas e tamanhos variáveis e situados em diversas profundidades da espessura (FREITAS, 2003). Diferente dos geotêxteis tecidos, que apresentam poros de dimensões muito próximas.

A análise dos poros pode ser realizada por medidas diretas, indiretas ou estimativas teóricas. Nos geotêxteis tecidos o mais freqüente é a utilização de medida ótica direta, determinando o tamanho do poro e a porcentagem de área aberta. Nos não-tecidos agulhados, pode-se aplicar estimativas teóricas como a de Gourc (1982) para a curva de poros ou análise de imagem (URASHIMA e VIDAL, 2003).

Por serem essas técnicas trabalhosas, é mais comum a realização de estudos por medidas indiretas que normalmente procuram buscar principalmente o tamanho da maior partícula que passa num geotêxtil, conhecida como abertura de filtração. Podemos definir abertura de filtração como a abertura do geotêxtil equivalente ao maior diâmetro da partícula de solo que consegue passar através da manta. Este é o índice mais utilizado para definir o potencial de filtração, em virtude da dificuldade encontrada para determinação da porcentagem de área aberta, sendo assim o parâmetro mais utilizado para dimensionamento de filtros. Existem vários procedimentos para sua obtenção, sendo a escolha referente ao critério de dimensionamento adotado em projeto. A seguir, estão listadas algumas determinações de abertura de filtração usuais em critérios de dimensionamento, sendo o último o ensaio adotado

pela norma internacional ISO 12956 (1999) e escolhido pela ABNT para norma brasileira ainda em fase de aprovação:

- Peneiramento com vibração a seco (AOS) (ASTM D-4751, 2003);
- Peneiramento hidrodinâmico (O<sub>95</sub>);
- Peneiramento úmido por vibração (O<sub>90</sub>).

#### 2.2.4. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é a propriedade que permite avaliar a facilidade com que o fluido passa através de um meio poroso. A determinação desta propriedade é normatizada pelas normas ISO 12958 (1999) e ASTM D-4716 (2004) para condutividade hidráulica no plano da manta e pelas ISO 11058 (1999) e ASTM D-5493 (1993) para condutividade hidráulica normal ao plano.

Vidal e Righetti (1990), apresentam modelo teórico desenvolvido por Gourc (1982), que permite estimar a permeabilidade do geotêxtil como função do carregamento a que ele está submetido, associando a permeabilidade à pressão aplicada através da porosidade.

O autor associou a velocidade de percolação em tubos capilares retilíneos da equação de Hagen-Poiseuille com a Lei de Darcy e estendeu a equação ao fluxo em tubos de diâmetros variáveis aplicando um fator de correção  $C_k$ , baseando-se na equação de Kozeny-Carman:

$$k = \frac{g \eta_{GT}^3 d_f^2}{32\nu C_K (1 - \eta_{GT})^2} \quad (2.2)$$

Onde:

$k$  – condutividade hidráulica (m/s);

$g$  – aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$\eta_{GT}$  – porosidade do geotêxtil;

$d_f$  – diâmetro da fibra (m);

$\nu$  – viscosidade cinemática (m/s);

$C_k$  – fator de correção de forma.

Gourc (1982), analisando resultados experimentais obtidos para conjuntos de cilindros, propôs  $C_k = 5,47$  para a permeabilidade normal ao plano da manta, e constatou que a equação é aplicável com excelente aproximação de resultados para geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos.

Giroud (1996), propõe considerar a condutividade hidráulica de um geotêxtil através da equação de Poiseuille para vazão em tubos retilíneos, considerando o diâmetro dos tubos como sendo a abertura de filtração:

$$k = \frac{\rho_w g \eta_{GT} O_F^2}{\eta_w 32} \quad (2.3)$$

Sendo:

$\rho_w$  – massa específica do fluido percolante (kg/m<sup>3</sup>);

$g$  – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$\eta_{GT}$  – porosidade do geotêxtil;

$\eta_w$  – viscosidade dinâmica do fluido (10<sup>-3</sup> kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>);

$O_F$  – abertura de filtração do geotêxtil (m).

Segundo Giroud (1996), um filtro deve ser suficientemente permeável para permitir o fluxo livre de percolante. Sendo que este fator pode ser quantificado determinando a permeabilidade do filtro exigida para assegurar que a poro-pressão de água no solo não seja significativamente maior com o filtro do que sem ele e não deverá haver decréscimo significativo da vazão do fluxo com a presença do filtro.

Em um sistema filtrante, as propriedades da manta virgem podem ser modificadas, tanto pela colmatação parcial, como pela compressibilidade. Em estudo, Palmeira e Gardoni (2000) avaliaram a interferência da intrusão de partículas de solo nas características hidráulicas de

geotêxteis sob tensão. Este trabalho mostra a dependência da condutividade hidráulica tanto perpendicular ao geotêxtil como no plano da manta em relação às características do geotêxtil (principalmente a microestrutura) e da tensão normal aplicada. Os geotêxteis parcialmente colmatados apresentaram menor compressibilidade e menor permissividade quando comparados a mantas virgens. Porém a condutividade no plano da manta apresentou valores semelhantes entre as amostras, comportamento este associado à baixa compressibilidade do geotêxtil impregnado. As condutividades hidráulicas prognosticadas com uso de expressões teóricas obtiveram valores satisfatórios comparando-se com os valores obtidos em ensaios.

Giroud (1996), baseando-se em análises teóricas considera a permeabilidade para geotêxteis parcialmente colmatados segundo duas hipóteses: as partículas de solo estão uniformemente dispersas entre os poros do geotêxtil ou as partículas estão aglutinadas ao redor das fibras. Assim tem-se que:

$$k_1 = \frac{\beta \rho_w g \left( \eta_{GT} - \frac{\mu_S}{t_g \rho_S} \right)^3}{\eta_w \left( \frac{4(1 - \eta_{GT})}{d_f} + \frac{6 \mu_S}{d t_g \rho_S} \right)^2} \quad (2.4)$$

$$k_2 = \frac{\beta \rho_w g \left( \frac{d_f}{4} \right)^2 \left( \eta_{GT} - \frac{\mu_S}{t_g \rho_S (1 - \eta')} \right)^3}{\eta_w (1 - \eta_{GT}) \left( 1 - \eta_{GT} + \frac{\mu_S}{t_g \rho_S (1 - \eta')} \right)} \quad (2.5)$$

Onde:

$k_1$  – condutividade hidráulica com acúmulo de partículas no geotêxtil, assumindo que as partículas estão uniformemente dispersas nos poros da manta (m/s);

$k_2$  – condutividade hidráulica com acúmulo de partículas no geotêxtil, assumindo que as partículas estão aglutinadas em torno das fibras da manta (m/s);

$\beta$  – fator de forma, função da tortuosidade do meio;

$\rho_w$  – massa específica do fluido percolante ( $\text{kg/m}^3$ );

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\eta_{GT}$  – porosidade do geotêxtil;

$\mu_S$  – massa de partículas de solo retida no geotêxtil por unidade de área ( $kg/m^2$ );

$t_g$  – espessura do geotêxtil (m);

$\rho_S$  – massa específica das partículas de solo ( $kg/m^3$ );

$\eta_w$  – viscosidade dinâmica do fluido ( $10^{-3} kgm^{-1}s^{-1}$ );

$d_f$  – diâmetro da fibra (m);

$d$  – diâmetro da esfera (m);

$\eta$  – porosidade efetiva do geotêxtil impregnado (considerando a presença de partículas de solo aglutinadas).

#### 2.2.5. Aptidão à embebição

Aptidão à embebição é uma propriedade do geotêxtil relativa à sua utilização como filtro, referente a facilidade com que a água é capaz de penetrar no geotêxtil devido a tensão interfacial entre a água, o geotêxtil e o ar. A aptidão à embebição de um geotêxtil, também está relacionada com a porosidade do geotêxtil, a área específica das fibras e o estado da superfície das fibras. Assim, quando o percolante estiver sob um baixo gradiente hidráulico, pode não conseguir transpor a estrutura seca do geotêxtil (FREITAS, 2003).

Para determinação desta propriedade deve-se realizar ensaio segundo especificação da Norma Francesa NF G38-020 (1988).

### 2.3. Fatores de influência da filtração

#### 2.3.1. Conceitos básicos

Na filtração é importante considerar certos fatores, principalmente no que se refere às características do meio a filtrar e do meio filtrante, pois problemas podem acontecer na

interface do sistema solo/geotêxtil devido a alterações ocasionadas na instalação (modo de instalação, impregnação por compactação ou lama, por exemplo) ou durante o tempo de uso do filtro, prejudicando seu funcionamento.

A água ao percolar pelo solo gera forças que sob determinado gradiente hidráulico podem provocar instabilidade na sua estrutura, carreando as partículas do solo. Assim, pode-se ter o fenômeno de erosão interna ou o fenômeno de sufusão. Denomina-se erosão interna a perda de partículas do solo de tamanhos variados originando o surgimento de grandes vazios na sua estrutura e sufusão a migração do particulado fino pelos canalículos constituídos pelas partículas de dimensões maiores em função das condições de fluxo. A Figura 2.2 ilustra estes conceitos.

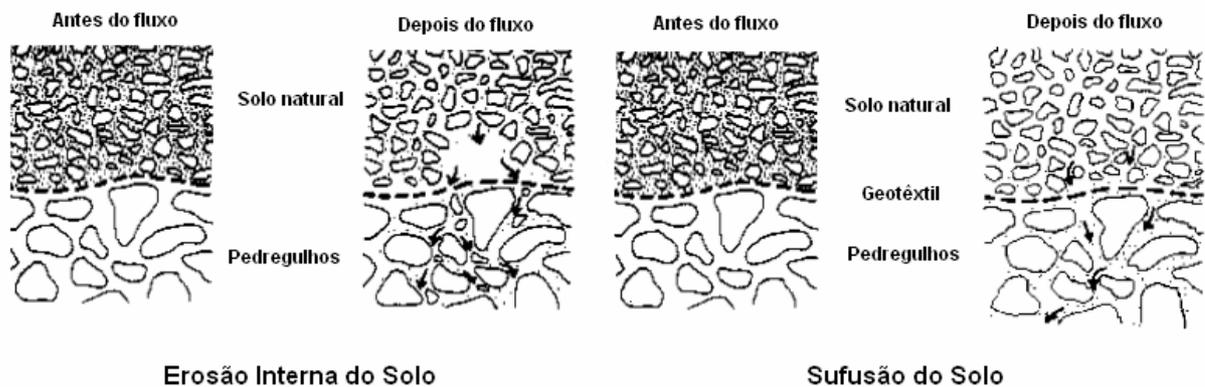


Figura 2.2. Erosão interna e sufusão do solo (Adaptação: John, 1987).

Deste modo, para que se tenha boa condição de filtração, as partículas devem ser retidas pelo geotêxtil, formando uma estrutura composta por arcos ou pontes de partículas sobre os poros superficiais do geotêxtil, conforme ilustra a Figura 2.3.

Pode-se dizer que a filtração não é função exclusiva do geotêxtil, mas também do solo a ele adjacente principalmente quando o fluxo é unidirecional, pois nestes casos há uma perda de parte das partículas finas do solo quando aplicado o primeiro fluxo de água, sendo essa perda maior no solo imediatamente adjacente ao geotêxtil, criando uma zona onde as

partículas maiores ao serem retidas restringem a movimentação das partículas finas do solo, formando assim, o chamado pré-filtro (JOHN, 1987), como pode-se observar na Figura 2.3.

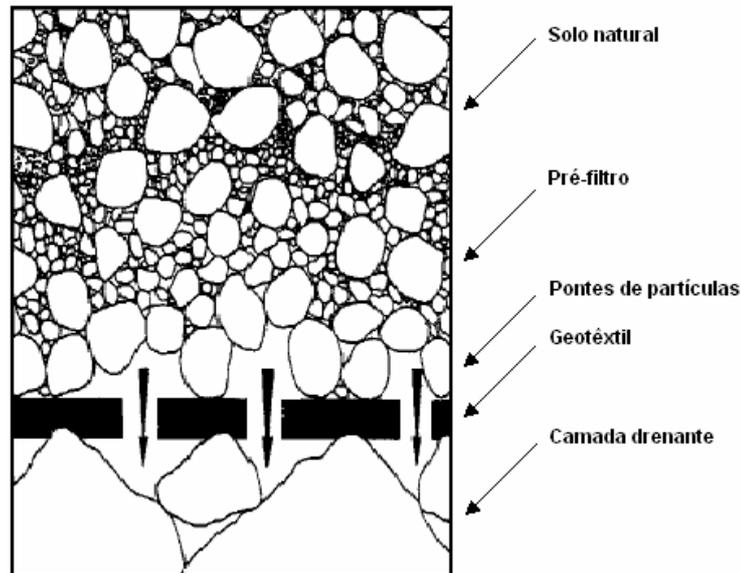


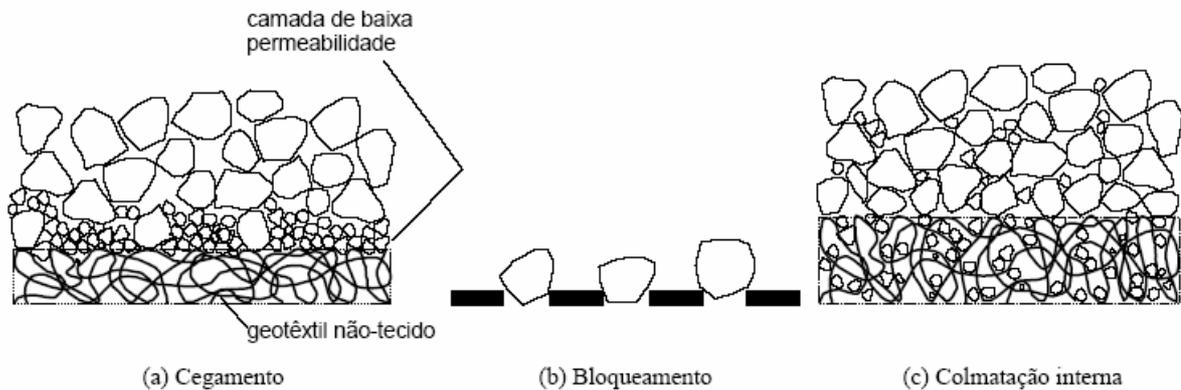
Figura 2.3. Arranjo de partículas e formação de pré-filtro (Adaptação: Urashima, 2002).

A retenção do solo não requer a prevenção da migração de todas as partículas do solo, e sim que o solo a montante do filtro mantenha-se estável. Em outras palavras, algumas partículas pequenas podem migrar através do filtro sem que a estrutura do solo seja afetada por essa migração, pois não causa nenhum movimento significativo na massa de solo.

No caso das partículas carregadas atravessarem o filtro, o dreno pode ser obstruído se o meio drenante localizado a jusante do filtro não for convenientemente dimensionado para que as partículas migradas não danifiquem seu funcionamento (GIROUD, 1996).

No entanto, se uma grande quantidade de partículas carregadas do solo forem retidas pelo geotêxtil pode, ocorrer colmatação do filtro. Segundo Palmeira (2003), colmatação é um termo geral empregado para caracterizar o mau funcionamento de um filtro causado por uma incompatibilidade entre dimensões das partículas do solo de base e dos poros do filtro, a qual resulta em uma severa perda de capacidade de descarga do sistema drenante, aumento de poro-pressão na vizinhança do filtro e alteração das condições inicialmente estabelecidas para

o regime de fluxo. Em filtros geotêxteis a colmatção pode ocorrer por cegamento, bloqueamento superficial ou colmatção interna dos poros, como demonstra a Figura 2.4.



**Figura 2.4. Colmatção em filtros geotêxteis (Fonte: Palmeira, 2003).**

O cegamento ou blinding do filtro (Fig. 2.4.a) acontece quando as partículas mais finas do solo são carreadas, migrando por seus vazios até serem retidas sobre a superfície do filtro. O que causa a formação de uma camada de baixa permeabilidade denominada “cake”, a qual pode levar a uma redução significativa da permeabilidade global do sistema solo/filtro.

Já o bloqueamento superficial ou blocking (Fig. 2.4.b) acontece quando partículas individuais do solo fecham a entrada dos poros do geotêxtil.

A colmatção interna ou clogging (Fig. 2.4.c) é causada pelo fechamento dos poros e dos canais de fluxo no interior da camada de geotêxtil advindo da intrusão de partículas de solo, precipitação de substâncias ou proliferação de bactérias, por exemplo. Conforme Giroud (1996), as partículas de solo retidas no interior do geotêxtil podem estar acumuladas de duas maneiras distintas, uniformemente dispersas no espaço de poro do geotêxtil ou aglutinadas ao redor das fibras.

Em solos que apresentam severa tendência ao carreamento de partículas finas, cabe ao projetista avaliar as vantagens ou não da retenção dessas partículas. Lafleur et al.(1989), baseando-se em ensaios realizados para filtros granulares, propõe considerar que uma

combinação solo/filtro estável ocorre quando uma quantidade menor que  $2,5 \text{ kg/m}^2$  das partículas do solo de base é carregada.

Quando o sistema filtrante é submetido ao fluxo de fluidos contendo partículas em suspensão, substâncias químicas ou orgânicas, ocorre o risco de colmatção física, química ou biológica. O dimensionamento de filtros submetidos a tais condições é mais complexo, pois pode haver degradação do geotêxtil devido às variações químicas, colmatção devido à proliferação de bactérias ou formação de biofilme, entre outros.

Segundo Mendonça et al. (2000), as superfícies em meio aquático são muito atrativas para a proliferação de colônias de bactérias devido à facilidade de obtenção de nutrientes do meio líquido. As bactérias aderem firmemente à superfície da manta, onde se desenvolvem, reproduzem e produzem substâncias extracelulares, causando a colmatção do filtro. A este grupo formado por células microbianas e substâncias extracelulares, se dá o nome de biofilme.

Quando a formação do biofilme é devido ao resultado de colonização microbiana e sua afinidade com compostos de ferro, denomina-se ocre. O ocre é um material amorfo e gelatinoso de coloração alaranjada devido às altas concentrações de óxidos de ferro e são encontrados aderidos às superfícies sólidas, facilitando a retenção de partículas do solo. Como resultado da diversidade do ambiente, composição do fluido drenante, pH, potencial eletroquímico e aeração, diferentes interações podem ocorrer entre as substâncias químicas e entre os microorganismos, resultando no desenvolvimento de variadas formações de ocre (MENDONÇA et al., 2000).

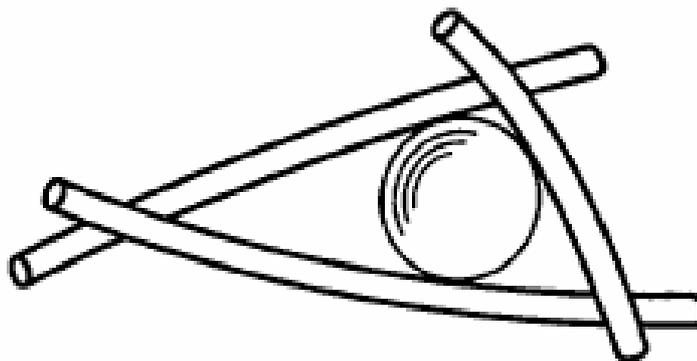
### **2.3.2. Influência da estrutura do geotêxtil**

A estrutura do geotêxtil influencia o comportamento de filtração em função da distribuição e tamanho de poros e da espessura da manta.

Segundo Urashima (2002), em um geotêxtil tecido existe um único confronto entre as partículas e o filtro, onde a partícula passa ou fica retida na manta, pois os vazios neste tipo de geotêxtil possuem praticamente a mesma dimensão e formato. A partícula retida pode causar bloqueamento da abertura ou compor uma estrutura em forma de arco com outras partículas que cheguem simultaneamente ao vazio como mencionado no item 2.3.

No entanto, em um geotêxtil não-tecido agulhado, não existe ligação entre as fibras num corte com praticamente nenhum ponto de contato, exceto que esteja sob tensão de confinamento significativa. Assim, além do confronto inicial na superfície, a partícula de solo enfrenta outros confrontos durante sua passagem através da espessura do geotêxtil.

A partícula passa entre fibras, sendo constrição a passagem delimitada por três ou mais fibras e o seu tamanho pode ser definido como o exato tamanho de uma esfera capaz de atravessar a constrição, conforme ilustra a Figura 2.5. As fibras estão aproximadamente, mas não necessariamente, no mesmo plano (GIROUD et al., 1998). A constrição não se confunde com um poro, pois este último é um espaço volumétrico.



**Figura 2.5. Constrição (Fonte: Giroud et al., 1998).**

O conjunto de constrições percorrido ao longo da espessura do geotêxtil chama-se canal de fluxo, o qual é tortuoso, mas na maioria das vezes com direção aproximadamente perpendicular ao plano do geotêxtil, como indicado na Figura 2.6.

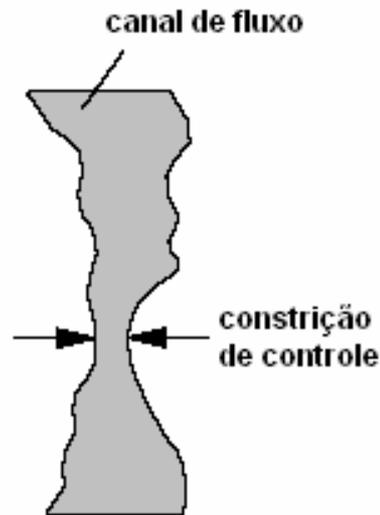


Figura 2.6. Canal de fluxo em um geotêxtil formado por sucessão de poros (Adaptação: Palmeira, 2003).

Assim, a partícula transpõe a manta, ou percorre o canal até encontrar uma construção menor que o seu diâmetro ficando retida (GIROUD et al., 1998). A menor construção de um caminho de filtração é denominada de construção de controle de caminho considerado, sendo assim, a abertura de filtração do canal de fluxo. Como em geotêxteis não-tecidos existem muitos canais de fluxo diferentes, considera-se uma curva de distribuição de abertura de filtração variando de  $O_0$  a  $O_{100}$ , como indicado na Figura 2.7.

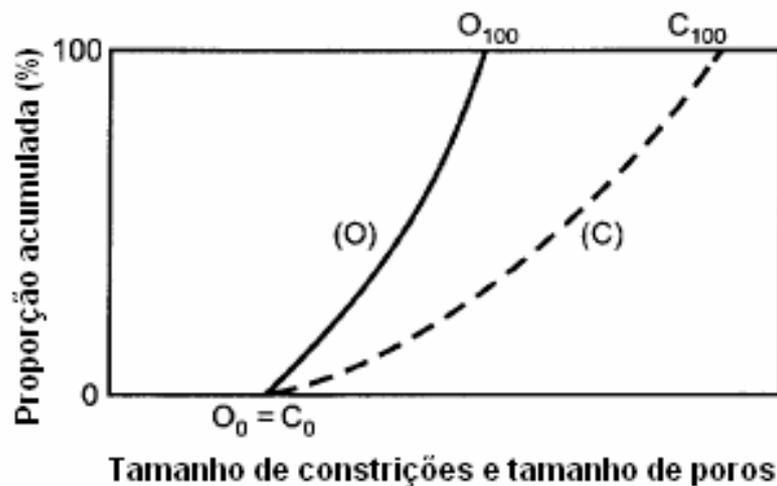


Figura 2.7. Curva de distribuição de tamanho de constrições e curva de distribuição de aberturas de filtração (Adaptação: Giroud et al., 1998).

Cabe lembrar que, conforme citado por Giroud (1996), o termo definido como constrição tem o mesmo conceito do confronto definido por Silveira (1965) citado em Urashima (1996).

Nos geotêxteis termoligados as fibras ou filamentos estão em contato direto devido à fusão parcial que as une, reduzindo consideravelmente sua espessura, tendo vazios com forma e dimensão variada, mas aproximando-se do caso de geotêxteis tecidos (URASHIMA, 2002).

### **2.3.3. Estrutura do meio a filtrar**

A interação do sistema solo/geotêxtil pode levar a dois mecanismos de filtração distintos, sendo eles a filtração de partículas em suspensão e a filtração em meio poroso, na situação de solo em contato direto com o geotêxtil (ROLLIN e DENIS, 1987).

#### **a. Filtração de partículas em suspensão**

A filtração em suspensão acontece quando o líquido percolante possui pequenas partículas em suspensão, sem contato superficial entre elas. Pode acontecer este fenômeno em filtração de rejeitos finos, filtração de água em estações de tratamento ou devido a falhas em execução de drenos, por exemplo.

Em solos com altas condutividades hidráulicas localizadas e tendência à sufusão pode ocorrer filtração de partículas em suspensão em virtude do carreamento de partículas finas da base e ocorrência de grandes vazios. Sendo assim, algumas vezes, a filtração em meio poroso torna-se uma filtração de partículas em suspensão.

Segundo Faure et al. (1993), a filtração em suspensão acontece principalmente em situações de solos de base fofos, mal compactados e com granulometria descontínua ou coesivos fissurados, pois as partículas finas desses solos podem ser carreadas pela água. A filtração de solos com finos em suspensão, é, portanto um caso muito crítico, visto que a retenção dos finos tende a reduzir drasticamente a permeabilidade do meio.

Segundo Vidal e Urashima (1999), devido à perda de carga que ocorre quando a partícula carregada encontra o filtro, ela tende a se depositar em sua superfície, o que ocorre mesmo para partículas muito pequenas, bem menores que a abertura de filtração do elemento filtrante. Sendo preciso avaliar a perda de carga causada pela deposição das partículas para prever, se necessário, o processo de troca ou lavagem do filtro. Partículas muito finas criam rapidamente uma barreira de baixa condutividade hidráulica, que, em função da sua concentração na suspensão pode exigir troca ou lavagem do filtro com muita frequência.

Na filtração de partículas em suspensão o processo de deposição é função da velocidade de fluxo, da concentração de partículas, do tipo de solo e da estrutura do material filtrante. A abertura de filtração tem influência representativa apenas no caso de partículas não coesivas (URASHIMA, 2002).

#### **b. Filtração em meio poroso**

A filtração pode ser considerada em meio poroso quando as partículas da base a filtrar possuem contatos superficiais, formando uma estrutura composta pelos grãos do solo. As condições de filtração em meio poroso são influenciadas principalmente pelo tipo de solo a reter, pela sua distribuição granulométrica e densidade.

O fluxo exerce forças de arraste nas partículas do solo, e como resultado, essas partículas tendem a mover-se. Elas realmente sofrerão movimento se as forças de arraste superarem as forças resistentes, as quais são função dos seguintes mecanismos: entrosamento das partículas, atrito entre partículas e a atração em solos coesivos (GIROUD, 1996).

Os solos coesivos podem constituir formações reticuladas em abóbadas na interface solo/geotêxtil devido às forças elétricas e de absorção entre os grãos e as fibras têxteis, mesmo para aberturas de filtração do geotêxtil relativamente grandes. Os solos granulares, os quais tem contato apenas devido ao atrito intergranular das partículas, podem formar arcos somente pela ação da gravidade.

No que se refere à distribuição granulométrica podemos dividir os solos em uniformes ou não-uniformes. Segundo Vidal e Urashima (1999), o comportamento em filtração dos solos uniformes está diretamente ligado à dimensão das partículas e à direção do fluxo. Quando o fluxo atua no sentido e direção da gravidade, mesmo que inicialmente ocorra perda de partículas, o movimento dos grãos em direção ao filtro acaba fazendo com que eles tendam a formar arcos e estabilizar o sistema, desde que os poros da manta não sejam muito grandes em relação ao diâmetro das partículas da base. No entanto, o fluxo no sentido contrário ao da gravidade pode causar perda contínua de partículas.

A filtração de solos não-uniformes é bem mais complexa, podendo estes ser considerados internamente estáveis ou instáveis quando submetidos a um fluxo, dependendo da distribuição granulométrica do material. Os solos internamente instáveis são aqueles em que uma significativa quantidade de partículas finas migram devido à ação das forças de arraste exercidas pelo fluxo e os solos internamente estáveis são solos os quais possuem um esqueleto contínuo de partículas de um certo tamanho, sendo dentro destes detidas as partículas menores (GIROUD, 1996).

#### 2.3.4. **Influência de solicitações**

As solicitações as quais o filtro é submetido, como diferenças de carga hidráulica, direção, sentido e velocidade de fluxo, condições ambientais, solicitações mecânicas durante a instalação e vida útil da obra podem afetar seu funcionamento.

A condição ideal de filtração é quando ocorre o mecanismo de filtração seletiva, com a formação de um pré-filtro com uma rede de arcos de partículas. Na condição de fluxo unidirecional, o geotêxtil age como um indutor à formação de filtro natural no solo. No entanto, em condições de fluxo reverso ou fluxo turbulento, a rede de arcos sobre o geotêxtil pode ser destruída e o potencial de migração de partículas aumentar. Para que um sistema submetido a condições de fluxo dinâmico atinja a estabilidade precisa-se de um projeto mais

complexo e de mais tempo para alcançar equilíbrio quando comparado aos sistemas de fluxo unidirecional constante.

Em casos onde o geotêxtil é submetido a condições ambientais severas, sua funcionalidade pode ser afetada devido às características do fluido percolante e alterações químicas no meio a filtrar, com riscos de degradação do geossintético ou colmatação química e biológica.

## **2.4. Critérios de dimensionamento**

### **2.4.1. Introdução**

Atualmente existem diversos critérios para dimensionamento de filtros geotêxteis. Os critérios básicos usados em projetos de engenharia são critério de retenção, critério de permeabilidade, critério de colmatação e critérios de sobrevivência, algumas vezes subdividido em resistência à solicitação mecânica e durabilidade. A avaliação da capacidade filtrante deve ser feita sempre simultaneamente pela capacidade de retenção e pela capacidade de permeabilidade.

Os critérios de retenção são baseados no conceito de que o filtro geotêxtil deve reter um número suficiente de partículas do solo de forma que um solo estável se desenvolva com formação de arcos, prevenindo alguma migração adicional de grãos. Para prevenir a colmatação do geotêxtil, deve-se permitir a passagem de algumas partículas através do geotêxtil (CHRISTOPHER et al., 1993).

Os critérios de permeabilidade são fundamentados no princípio de que o geotêxtil deve assegurar permeabilidade suficientemente para prevenir o desenvolvimento de excesso de poro-pressão de água e para proporcionar uma capacidade de vazão adequada.

A colmatação é estritamente relacionada ao critério de permeabilidade e capacidade de fluxo, contudo, mesmo estando satisfeitos os critérios de retenção e permeabilidade, o sistema filtrante pode estar suscetível à colmatação. O potencial de colmatação depende da relação

entre as partículas finas do solo e da capacidade destas partículas em bloquear ou colmatar a maioria das aberturas e poros de um geotêxtil (CHRISTOPHER et al., 1993).

Existem também, critérios de dimensionamento fundamentados em modelos probabilísticos, o quais baseiam-se na espessura de geotêxtil necessária para reter uma dada partícula dentro de um intervalo de confiança desejado.

Segundo Gardoni (2000), os critérios usuais de dimensionamento de mantas geotêxteis não consideram a influência da tensão de compressão e nem a colmatação parcial dos filtros antes do início da sua vida útil. Esta colmatação ocorre devido ao espalhamento e compactação do solo sobre a manta e é uma limitação ainda não quantificada. As atuais aplicações de geossintéticos em obras geotécnicas e de meio ambiente requerem que o produto seja, em geral, usado em situações severas, tornando-se necessário uma revisão geral dos critérios para adequação às condições efetivas de uso.

No Brasil, o critério de sobrevivência às solicitações mecânicas pode ser avaliado pela norma NBR 15224 (2005) para aplicações em trincheiras drenantes.

A seguir serão citados alguns critérios usualmente encontrados na bibliografia.

#### **2.4.2. Critério do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG, 1986)**

Para o dimensionamento da capacidade de retenção do filtro, este critério relaciona a abertura de filtração do geotêxtil obtida por peneiramento hidrodinâmico ( $O_{95}$ ) com o valor do diâmetro equivalente do solo tal que 85% de todas as partículas sejam inferiores a ele ( $d_{85}$ ), às condições de contorno do meio (distribuição granulométrica, densidade e gradiente hidráulico) e à situação para o qual é empregado (ou seja, filtro trabalhando ou não como elemento drenante).

O critério de retenção segue a equação a seguir, sendo os valores de suas variáveis e suas aplicações apresentadas na Tabela 2.1.

$$O_{95} < C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times d_{85} \quad (2.6)$$

Onde:

$C_1$  – coeficiente relativo ao gradiente hidráulico;

$C_2$  – coeficiente relativo à densidade do solo;

$C_3$  – coeficiente relativo à granulometria do solo;

$C_4$  – coeficiente relativo às funções do geotêxtil.

**Tabela 2.1. Valores das condições de contorno e suas aplicações**

Coeficiente	Valor	Aplicação
$C_1$	1,00	Solos bem graduados e contínuos
	0,80	Solos uniformes e contínuos
$C_2$	1,25	Solos densos e confinados
	0,80	Solos fofos e desconfinados
$C_3$	1,00	Gradientes hidráulicos, $i < 5$
	0,80	Gradiente hidráulico, $5 < i < 20$
	0,60	Gradiente hidráulico, $20 < i < 40$
$C_4$	1,00	Uso somente para filtração
	0,30	Uso para filtração e drenagem

No caso de solos coesivos, deve-se aplicar a regra acima citada se o valor da abertura de filtração obtida for superior a  $80\mu\text{m}$ , caso contrário mantém-se a abertura de filtração igual a  $80\mu\text{m}$ .

A filtração de solos dispersivos ou solos em suspensão não estão incluídos no campo de aplicação deste critério de retenção, sendo a escolha do geotêxtil satisfatório realizada através de ensaios de comportamento.

No que se refere à permeabilidade, o geotêxtil deve obedecer à condição:

$$K_{GT} > A \cdot K_S \quad (2.7)$$

Sendo:

$K_{GT}$  - permeabilidade do geotêxtil, em m/s;

$K_S$  - coeficiente de permeabilidade do solo protegido em m/s;

A - coeficiente adimensional para permeabilidade como indicado na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2. Valores de coeficiente A, onde  $t_g$  é a espessura do geotêxtil em metros.**

Coeficiente (A)	Aplicação
$10^3 t_g$	Gradientes baixos e solos limpos
$10^4 t_g$	Gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa
$10^5 t_g$	Gradientes elevados e obras de grande responsabilidade

Como citado em Christopher et al. (1993), quanto ao critério de colmatação do CFGG (1986) a abertura de filtração do geotêxtil deve obedecer a condição:

$$O_{95} \geq 4 d_{15} \quad (2.8)$$

#### 2.4.3. Critério Lafleur (1999)

Lafleur propôs este critério de dimensionamento para aprimorar os critérios já existentes, visto que parte destes não considera solos com granulometria ampla.

Assim, foi proposto um critério de retenção para solos problemáticos, não coesivos com coeficientes de uniformidade maiores que seis. Este critério baseia-se no perfil da curva granulométrica do material filtrante, assim como, na condição de estabilidade interna do solo. Lafleur considera três curvaturas específicas de granulometria, sendo as curvas lineares aquelas que apresentam obrigatoriamente partículas finas uniformemente distribuídas, as curvas descontínuas como aquelas em que existe falha de um certo tamanho de partículas e as curvas côncavas as que apresentam uma concavidade ao longo da granulometria.

Para um melhor entendimento do dimensionamento do filtro com uso deste critério deve-se seguir as etapas do fluxograma apresentado na Figura 2.8.

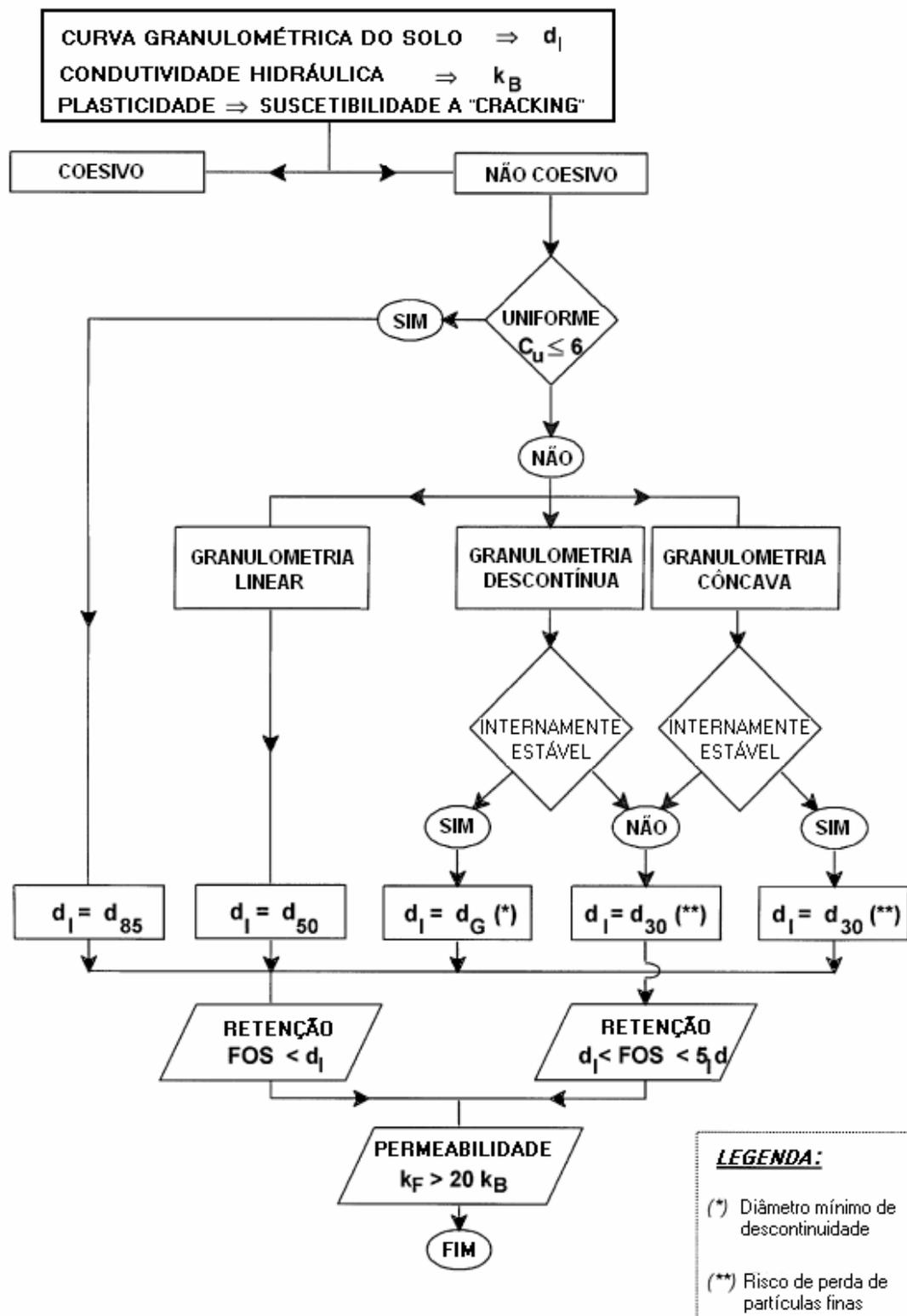


Figura 2.8. Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla (Adaptação: Lafleur, 1999).

Atribuindo um índice de retenção,  $R_R$ , onde:

- solos internamente estáveis:  $R_R < 1$ ,

- solos internamente instáveis:  $1 < R_R < 5$ .

Sendo:

$$R_R = \frac{O_f}{d_I} \quad (2.9)$$

Considerando:

$O_f$  – abertura de filtração obtida por peneiramento hidrodinâmico;

$d_I$  – tamanho indicativo da partícula do solo base:

- $d_{85}$  para solos uniformes ( $C_u < 6$ );
- $d_{50}$  para solos linearmente graduados não uniformes ( $C_u > 6$ );
- $d_{30}$  para solos com granulometria côncava;
- $d_G$  para solos com granulometria descontínua ( $d_G$  é o diâmetro mínimo da descontinuidade).

Quanto à permeabilidade o geotêxtil deve obedecer à condição:

$$K_{GT} > 20 \cdot K_S \quad (2.10)$$

#### 2.4.4. Critério do Federal Highway Administration (FHWA, 1985)

Critério proposto por Christopher e Holtz (1985) no Geotextile Engineering Manual, citado por Freitas (2003) e Aguiar e Vertematti (2004).

Quanto à capacidade de retenção, o critério do FHWA apresenta propostas distintas de acordo com a porcentagem de partículas finas na constituição granulométrica do solo, como demonstra a Tabela 2.3.

Quanto à permeabilidade o geotêxtil deve atender a condição:

$$K_{GT} > C \cdot K_S \quad (2.11)$$

sendo  $C$ , um coeficiente adimensional cujos valores são função do tipo de aplicação. Para situações não críticas, com baixos gradientes e solos estáveis, usa-se  $C$  igual a 1. Em situações

críticas ou severas, com gradientes hidráulicos elevados, condutividade hidráulica dinâmica ou solos instáveis utiliza-se C igual a 10.

**Tabela 2.3. Critério de Retenção – FHWA.**

<b>Solo</b>	<b>Critério</b>	<b>Aplicação</b>
< 50% passando na peneira 200	Fluxo permanente: $AOS^1 < B d_{85}$	$B=1 \rightarrow CU < 2$ ou $CU > 8$ $B=0,5 CU \rightarrow 2 < CU < 4$ $B=8/ CU \rightarrow 4 < CU < 8$
	Fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos: $AOS < d_{15}$	—
> 50% passando na peneira 200	Fluxo permanente: $AOS < d_{85}$ $AOS < 1,8 d_{85}$	Geotêxteis tecidos Geotêxteis não tecidos
	Fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos: $AOS < 0,5 d_{85}$	—

<sup>1</sup>AOS: abertura de filtração (ASTM D-4751, 2003)

<sup>2</sup>CU: coeficiente de uniformidade

O critério do FHWA aborda considerações sobre o risco de colmatção como apresentado na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4. Critério de prevenção à colmatção – FHWA.**

<b>Critério</b>	<b>Geotêxtil</b>	<b>Aplicação</b>
$GR^1 < 3$	—	Severa
Porcentagem de área aberta > 4%	Tecido	Não severa
Porosidade > 30%	Não tecido	Não severa

<sup>1</sup>GR: razão entre gradientes (ASTM D-5101, 2001)

#### 2.4.5. Critério de Giroud (1996)

Giroud propôs um critério de dimensionamento para situações de filtração regulares, sob as seguintes condições:

- Filtro exposto a fluxo unidirecional;
- Contato íntimo entre o material de base e o filtro;
- Solo de base internamente estável;
- Solo de base resistente à liquefação quando submetida a carregamentos cíclicos;
- Base sem grandes vazios que permitam a água fluir livremente;
- Solo não coesivo.

O Critério de Retenção é baseado no coeficiente de uniformidade do solo, definido como a razão entre os diâmetros das partículas do solo. Esta razão denomina-se Coeficiente de Uniformidade Característica, “ $C_{uc}$ ”, e é classificada como:

- Se  $C_{uc}=3$  é usado no critério de retenção, classifica-se como hiperestável. Neste caso somente as partículas que formam um arranjo denso do solo são consideradas, resultando em um critério de retenção conservativo.
- Se  $C_{uc}=13$  é usado no critério de retenção, classifica-se como hipoestável. O arranjo de partículas é considerado no limite da estabilidade interna.
- Se  $C_{uc}=6,5$  é usado no critério de retenção, classifica-se como mesoestável, sendo um caso intermediário.

Pode-se considerar duas situações: solo de base com coeficiente de uniformidade menor ou igual ao característico ( $C_u \leq C_{uc}$ ) e solo de base com coeficiente de uniformidade maior que o valor característico ( $C_u > C_{uc}$ ).

O Critério de Retenção pode ser expresso como:

$$O_F < \Omega d_{85} \quad (2.12)$$

Com:

$$\Omega = \omega C_u^{0.3} \quad \text{para } C_u \leq C_{uc} \quad (2.13)$$

$$\Omega = \omega C_{uc}^2 C_u^{-1.7} \quad \text{para } C_u > C_{uc} \quad (2.14)$$

Onde  $\omega$  é um coeficiente adimensional igual a 1 para solos fofos e 2 para solos densos.

Quanto à permeabilidade o filtro pode ser dimensionado com o critério contra a redução excessiva de vazão:

$$K_{GT} > K_S \quad (2.15)$$

Ou, ser dimensionado visando o não desenvolvimento de poro-pressão excessiva:

$$K_{GT} > 10K_S i_S \quad (2.16)$$

Sendo  $i_S$  o gradiente hidráulico nas adjacências do filtro.

Para dimensionamento de filtros que não se enquadrem nas exigências de solo granular na situação de filtração regular, o autor recomenda a utilização de métodos presentes em outras publicações. Para os solos internamente instáveis, Giroud recomenda consultar Kenney e Lau (1985) e Lafleur et al. (1989).

#### 2.4.6. Critério Racional (1996, 2002, 2003)

Urashima (1996) propôs um critério de retenção para dimensionamento de filtros geotêxteis fundamentado no estudo probabilístico desenvolvido por Silveira (1965) e citado por esta autora. A análise do comportamento do filtro por este critério permite determinar o nível de confiança de retenção de uma dada partícula, necessitando conhecer apenas a sua curva de distribuição de poros e o número de confrontos.

O critério enfoca aspecto relativo ao carreamento de partículas, em que a espessura requerida do filtro ( $t_g$ ) é tal que a probabilidade de uma partícula atravessá-la em toda sua extensão seja nula, dentro de um nível de confiança ( $P'$ ).

Inicialmente deve-se estabelecer o diâmetro da partícula do material de base a reter, posteriormente, com as curvas de distribuição de poros determina-se o valor  $P$ , conforme ilustra a Figura 2.9, onde  $P$  é a probabilidade de uma partícula de diâmetro  $d'$  encontrar, em um confronto, um vazio de diâmetro  $d$ , sendo  $d > d'$ .

Com o número de confrontos dos geotêxteis disponíveis e a probabilidade  $P$ , calcula-se  $P'$ :

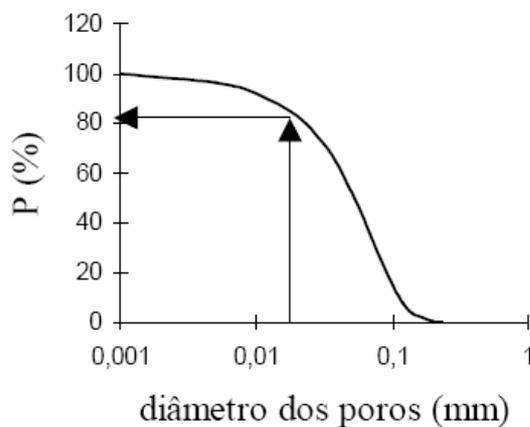
$$P' = 1 - P^N \quad (2.17)$$

Onde:

P – probabilidade de uma partícula de diâmetro  $d'$  encontrar, em um confronto, um vazio de diâmetro  $d$ , sendo  $d > d'$ ;

$P'$  – nível de confiança de retenção;

N – número de confrontos.



**Figura 2.9. Obtenção de P a partir da curva de distribuição de poros de um determinado geotêxtil (Fonte: Urashima, 2002)**

Em sua tese de mestrado, Urashima (1996) propôs a obtenção da curva de distribuição de poros pela teoria de Gourc (1982) e posteriormente, a adoção do procedimento de retroanálise de Silveira (1993), com resultados de filtração em suspensão, para estimativa do número de confrontos, possibilitando o dimensionamento racional de filtros geotêxteis pela teoria probabilística.

A determinação da curva de poros pelo modelo teórico de Gourc utilizado para geotêxteis não-tecidos agulhados considera como hipótese básica que os filamentos estão distribuídos aleatoriamente segundo a Lei de Poisson, tendo como parâmetros a porosidade e o diâmetro do filamento.

A curva de distribuição de poros, a qual representa a probabilidade acumulada P de se encontrar um poro que apresente diâmetro  $d$  maior ou igual a  $d'$  é dada pela equação:

$$P = \exp \left[ - \frac{\left( \frac{\eta \pi d^2}{4} + \frac{\lambda d}{2} \right)}{\eta_{GT}} \right] \quad (2.18)$$

Sendo:

$$\eta = 8 \frac{(1 - \eta_{GT})}{(\pi^2 d_f^2)} \quad (2.19)$$

$$\lambda = \left( 2 + \frac{4}{\pi} \right) \frac{(1 - \eta_{GT})}{d_f} \quad (2.20)$$

Onde:

$\eta$  – número de fibras por unidade de seção;

$\eta_{GT}$  – porosidade do filtro;

$\lambda$  – perímetro da fibra por unidade de seção;

$d_f$  – diâmetro da fibra.

Com aprimoramento do Método Racional, Urashima (2002) propôs a retroanálise de resultados de ensaios de filtração à carga variável com a curva de distribuição de poros determinada por análise de imagens, para estimar o valor da distância média entre confrontos.

Segundo a autora, a curva obtida por análise de imagens para geotêxteis não tecidos agulhados de filamentos contínuos avaliados leva a valores pouco mais conservadores, mas bem próximos dos obtidos pelo método teórico, aproximando-se tanto mais quanto maior o nível de confiança.

### **3. CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE**

#### **3.1. Introdução**

A estabilidade interna do solo a ser filtrado, comumente denominado solo base, possui papel fundamental no desempenho de um filtro, pois as forças de percolação atuantes devido ao fluxo podem gerar movimentos seletivos das partículas modificando sua estrutura e podendo ocasionar obstrução do filtro ou até colapso do solo. Estas modificações da estrutura do solo podem ser vantajosas para o funcionamento do sistema solo/geotêxtil se houver a formação de pré-filtro, constituído por uma formação reticulada em arco de partículas, como já mencionado no item 2.3. No entanto, as alterações podem causar o colapso da estrutura se houver erosão excessiva sem retenção das partículas de solo pelo geotêxtil, ou, pode ocorrer ainda a colmatação do filtro, ocasionando perda da capacidade de fluxo do sistema.

Neste capítulo serão abordadas as condições de estabilidade interna dos solos a serem filtrados, com considerações sobre as classificações existentes e análise do comportamento dos solos em trabalhos realizados por diversos autores.

#### **3.2. Exemplos de aplicações práticas de solos com tendência à instabilidade interna**

Conforme Sherard (1979 apud LAFLEUR et al, 1993), a ocorrência de erosão interna (*piping*) por falha de sistemas filtrantes em barragens de terra, envolve quase exclusivamente bases de granulometria ampla. As barragens analisadas apresentaram cavidades em várias zonas devido ao carreamento do material do núcleo. Segundo este autor, o problema deveria ser examinado com maior cautela, visto que solos não uniformes são geralmente usados neste tipo de obra.

Como exemplo, morenas não coesivas com ampla distribuição granulométrica são extensivamente usadas como núcleo de barragens construídas em países do hemisfério norte,

onde a presença deste tipo de material, composto de depósitos glaciais formados adjacente às geleiras, é muito comum.

Também podem ser achados materiais de misturas aluviais na natureza que apresentam instabilidade. As flutuações e diferenças nos regimes hidráulicos das vias fluviais podem formar um solo que apresente descontinuidade na curva granulométrica. Finalmente, a presença de uma seqüência de partículas finas que são o resultado da quebra e a alteração do particulado mais grosso pode determinar uma curva granulométrica côncava, indicando uma mistura potencialmente instável.

Muitos solos residuais oriundos da Península Coreana possuem coeficiente de uniformidade muito acima de 20. Redução da capacidade de drenagem como resultado da migração de partículas finas nos filtros se tornou uma das preocupações principais no contexto de revestimento de túneis e sistemas de drenagem de pavimento localizados nestes solos. Lee et al. (2002) realizaram estudo experimental para avaliar o desempenho ao transporte de partículas e à colmatação nos sistemas solo residual geotêxtil.

No Brasil massas colúviais apresentam problemas em obras de viadutos, oleodutos, muros de contenção, por exemplo. Provavelmente devido à configuração estrutural dos colúvios, a qual é na maioria das vezes bastante heterogênea. Segundo Lacerda (2002), um solo coluvial pode ser definido como um depósito composto por blocos ou grãos de qualquer dimensão, transportados por gravidade e acumulados no sopé ou a pequena distância de taludes mais íngremes ou escarpas rochosas.

Devido à formação dos colúvios, eles podem vir a apresentar em sua constituição uma grande variedade de tipos de solo e tamanhos de partículas, sendo suas propriedades físicas e mecânicas ligadas à sua geração e às características dos materiais do qual este é proveniente. Os solos colúviais apresentam uma estrutura geralmente instável quando comparados aos solos residuais.

Lacerda compara ensaios realizados anteriormente com solos residuais intactos e em colúvios provenientes do mesmo solo residual, podendo-se constatar que o índice de vazios dos colúvios é nitidamente superior ao do solo residual a ele subjacente. Este fato é explicável parcialmente pelo aumento de volume sofrido devido ao escorregamento do solo, e também, pelo fato do solo coluvionar ser lixiviado pela água infiltrada pela chuva, carreando partículas mais finas para zonas inferiores do perfil.

Outro fator prejudicial à estrutura do solo coluvionar é a alta permeabilidade, proveniente da natureza porosa aliada aos macroporos derivados de raízes mortas e de origem animal, facilitando o deslocamento das partículas menores. Santos (2004) discute detalhadamente os riscos da filtração em solos coluvionares.

### **3.3. Solos com condições de instabilidade interna**

Segundo Kenney e Lau (1985), o termo estabilidade interna refere-se à capacidade que o material granular possui em prevenir a perda de suas próprias partículas finas, provocada devido à ação de agentes perturbadores, como por exemplo, vibração e percolação. Um solo pode ser considerado com uma granulometria estável se não houver carregamento excessivo de suas partículas. No entanto, terá uma granulometria considerada instável se ocorrer esta perda.

A estabilidade granulométrica de um solo é relacionada a três fatores principais, sendo eles:

- Diâmetro das partículas e sua distribuição granulométrica;
- Porosidade e densidade relativa;
- Rigor das forças perturbadoras.

Solos compostos de partículas de tamanhos uniformes independem da densidade e da severidade das forças perturbadoras. Sendo assim, o potencial de instabilidade granulométrica

umenta com a majoração da faixa de distribuição granulométrica do solo e com o aumento das forças de percolação e vibração atuantes no mesmo.

A uniformidade do tamanho das partículas de um solo pode ser expressa pelo coeficiente de uniformidade  $CU$ , que representa a razão entre o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso dos grãos “ $d_{60}$ ” e o diâmetro correspondente, na curva granulométrica, à porcentagem de 10% das partículas que passam, “ $d_{10}$ ”, de acordo com a Equação 3.1. O solo tendo coeficiente de uniformidade menor que 2 é considerado uniforme, segundo Lambe e Whitman (1979).

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

A filtração de solos não uniformes é complexa, pois na interface solo/filtro, as partículas operam como um sistema dinâmico onde a base e o material filtrante interagem entre si. De tal modo, o equilíbrio do sistema solo/geotêxtil à longa duração tem relação direta com o rearranjo dos grãos do solo nesta zona de interface (LAFLEUR et al. , 1993). Na filtração, as condições de estabilidade podem ser consideradas como uma interação entre o comportamento do filtro e solo de base.

Os solos contêm uma estrutura principal formada por partículas maiores, a qual possui capacidade de suportar cargas e transferir tensões. No entanto, no interior dos poros dessa estrutura principal podem existir partículas soltas que não estão fixas em suas posições, sem capacidade de transferir tensões efetivas, as quais podem movimentar-se no interior do poro, assim como passar para um poro adjacente caso tenham tamanho compatível. Se as constrições da rede de poros existentes na estrutura principal do solo forem maiores que as partículas soltas elas serão carreadas, sendo este um solo internamente instável. Baseado em Kenney e Lau (1985), pode-se admitir que para um solo possuir uma estrutura instável, este deve atender a três condições:

- O material granular compactado deve possuir uma estrutura primária de partículas a qual suporta forças impostas. Essas partículas podem ser consideradas como sendo fixas em suas posições;
- No interior dos poros dessa estrutura primária devem existir partículas soltas, que podem ser carreadas devido às forças de percolação;
- O tamanho das constrições devem ser maiores que uma certa quantidade de partículas soltas, possibilitando que essas partículas sejam removidas.

A erosão e o carreamento do particulado fino do material a ser filtrado, altera significativamente a homogeneidade e conseqüentemente a distribuição das permeabilidades na estrutura do solo, pois a permeabilidade na zona onde houve remoção de partículas aumenta.

### 3.4. Métodos de classificação da estabilidade

Aguiar e Vertematti (2004) citam o critério desenvolvido por Chen et al. (1981) para verificação à condição auto-estável ou auto-filtrante do solo. Este critério baseia-se no princípio de que as partículas mais grossas do solo retêm as partículas menores e estas, por sua vez, retêm as partículas menores ainda, e assim, sucessivamente. O critério baseia-se nas condições expressas nas equações abaixo:

$$D_{50} > \frac{D_{85}}{5}; \quad D_{35} > \frac{D_{50}}{5}; \quad D_{15} > \frac{D_{35}}{5} \quad (3.2)$$

Kenney e Lau (1985) desenvolveram um programa experimental para avaliar, através de uma técnica gráfica, a estabilidade interna de materiais granulares densos utilizados como filtros. Seus estudos comprovaram que a estabilidade é principalmente uma função do formato da curva granulométrica do solo, propondo um procedimento gráfico para avaliar o potencial de estabilidade interna. Este procedimento é baseado nas variações de inclinações da curva do solo.

Assim, um limite foi estabelecido entre as distribuições granulométricas características de materiais, os quais apresentaram granulometrias estáveis ou instáveis em ensaios de filtração. Para realizar esta classificação os autores executaram ensaios com amostras relativamente densas em condições de transporte severas.

Os ensaios incluíram combinações de velocidade de percolação e vibração maiores que as geralmente existentes na prática. Submetendo as amostras a condições mais severas, no entanto, o tempo de realização de ensaio foi relativamente curto quando comparado às condições de campo. Os materiais que apresentaram granulometrias instáveis nos ensaios demonstraram possuir um potencial para a instabilidade, mas seu comportamento na prática vai depender das condições a que estão submetidos. Pode-se também assumir que as condições hidráulicas exageradas nos ensaios causam uma margem adicional de segurança, a qual ajuda a compensar os efeitos de segregação de partículas que inevitavelmente acontecem durante a execução da obra.

O método sugerido por Kenney e Lau, para descrever o formato da curva granulométrica está ilustrado na Figura 3.1. O diagrama da esquerda representa uma curva granulométrica da porcentagem de partículas passantes em peso,  $F$ , versus o diâmetro da peneira. A variação de porcentagem de partículas,  $H$ , compreende o intervalo entre  $D$  e  $4D$ , sendo  $D$  um diâmetro qualquer do solo analisado. Este valor de  $H$  e  $F$  são transferidos para o diagrama da direita, repetindo-se o procedimento até que se obtenha pontos suficientes para estabelecer o formato da curva  $HxF$ .

É interessante ressaltar que o formato da curva traçada independe do tamanho dos grãos, dependendo apenas da forma geométrica da curva granulométrica. Grandes valores de  $H$  correspondem a curvas granulométricas íngremes, e vice-versa. Valores constantes de  $H$  correspondem a porções em linha reta na curva e aumento nos valores de  $H$  indicam uma inclinação na curva.

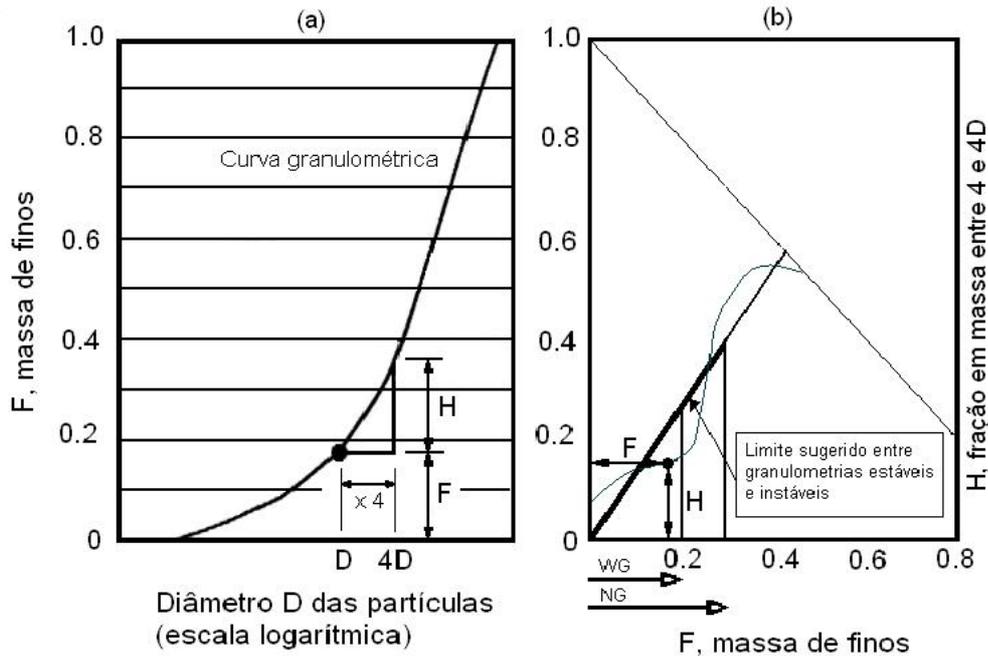
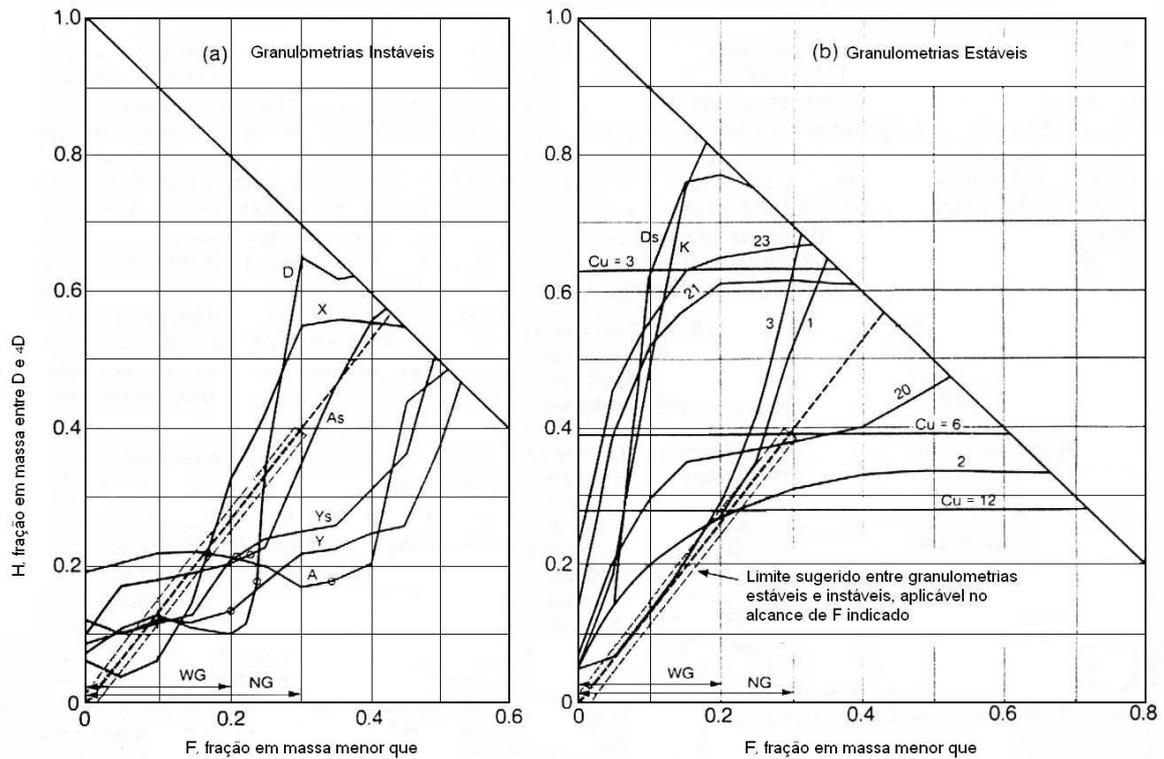


Figura 3.1. Método de análise do formato das curvas granulométricas (Adaptação: Kenney e Lau, 1985).

A escolha do valor do intervalo de quatro vezes o valor de  $D$  foi função do tamanho das constrições predominantes na rede de vazios de um filtro granular, a qual é aproximadamente igual a um quarto do tamanho da menor partícula constituinte do solo. Isso significa que a partícula de tamanho  $D$  pode passar através das constrições de um solo formado por partículas de tamanho  $4D$  ou maior, e para prevenir esse carreamento as constrições teriam que ser bloqueadas por partículas maiores que  $D$ . O valor  $H$ , porcentagem de massa de solo entre os diâmetros  $D$  e  $4D$ , correspondem ao material cujas constrições são suficientemente pequenas para prevenir a passagem de partículas com diâmetro igual a  $D$ .

A Figura 3.2 apresenta, como exemplo, curvas de granulometrias estáveis e instáveis. A linha destacada em cada diagrama representa um limite sugerido entre as condições de estabilidade dos materiais. Sendo que este limite descreve o valor mínimo de  $H$  necessário para que se tenha uma granulometria estável. As granulometrias instáveis são deficientes em uma certa faixa de tamanho de partículas, em decorrência, em algum lugar ao longo da curva dos materiais instáveis os valores de  $H$  serão menores que os valores da linha limite, encontrando-se estes pontos da curva, abaixo do limite.



**Figura 3.2. Forma das curvas de granulometria estável e instável (Adaptação: Kenney e Lau, 1985).**

De modo inverso, granulometrias estáveis não apresentam deficiência em tamanho de partículas e suas curvas serão localizadas na linha limite ou acima desta.

A única porção da linha limite relevante é a porção que descreve partículas soltas do solo. Em materiais com estrutura primária amplamente graduada ela vai até  $F$  igual a 0,2, intervalo representado como *WG* nas figuras Figura 3.1 e Figura 3.2, e em materiais com estrutura primária de granulometria estreita o alcance máximo de  $F$  é 0,3, intervalo representado como *NG*.

Mlynarek (2000), em pesquisa sobre o comportamento de solos instáveis com uso de filtros geotêxteis observou comportamento estável para solos instáveis (segundo Método Gráfico de Kenney e Lau, 1985), com distribuição granulométrica na zona de transição, vizinha da zona de solos coesivos. Estes solos indicaram uma presença significativa de partículas de silte. Assim, o método de Kenney e Lau é considerado pelo autor muito eficaz para a maioria dos solos, sendo aplicável para solos granulares com distribuições

granulométricas contínuas ou bimodais. Cabe lembrar que Kenney e Lau (1985) desenvolveram seu método para filtros granulares.

Em ensaios realizados Lafleur et al (1989) constataram diferentes comportamentos de filtração associado a solos com três curvas granulométricas distintas. Estas curvas são linear, côncava e descontínua como apresentado na Figura 3.3.

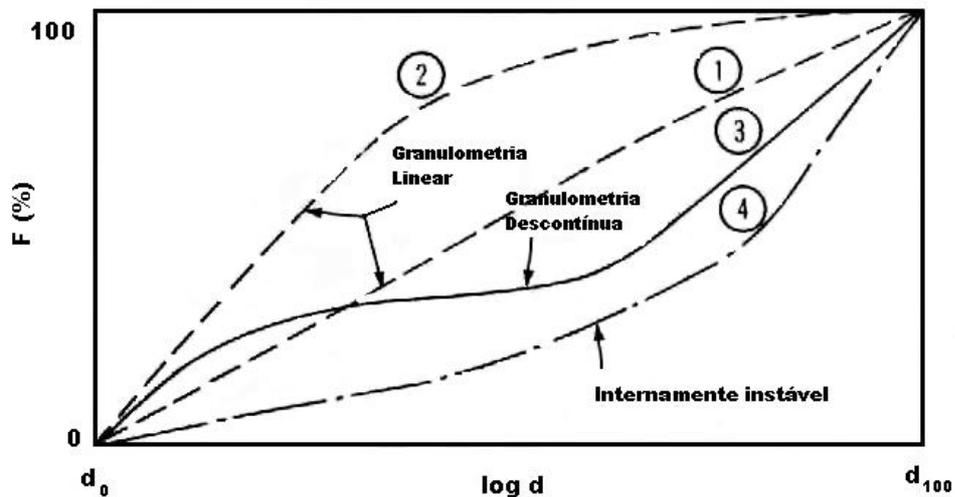


Figura 3.3. Curvas granulométricas típicas de solos amplamente graduados (Adaptação: Lafleur et al., 1993).

O primeiro grupo inclui os solos que possuem granulometria linear (curva número 1), com partículas linearmente distribuídas ou solos que apresentem as partículas finas uniformemente distribuídas (curva número 2) com poucas partículas grossas (aproximadamente 20%). Sendo estes solos considerados geralmente internamente estáveis.

O segundo grupo compreende os solos com granulometria descontínua (curva número 3), os quais não apresentam partículas dentro de um intervalo de tamanhos e como resultado desta ausência de uma fração dos grãos, a curva apresenta um patamar horizontal ou sub-horizontal em 30% ou menos das partículas finas. Este tipo de solo deve sempre ser analisado quanto à sua estabilidade interna.

O terceiro grupo, com granulometria côncava (curva número 4), compreende solos típicos de ocorrência de instabilidade interna onde o particulado fino é susceptível ao arraste.

Estas classificações baseiam-se na afirmação de que o formato da curva granulométrica desempenha um papel importante na filtração de solos não uniformes.

### 3.5. Comportamento solos instáveis face à filtração

Lafleur et al. (2002) realizaram ensaio de Razão entre Gradientes em dois tipos de solos, tendo um, curva granulométrica descontínua *D* e o outro curva granulométrica côncava *F*. Aplicando o Método Gráfico de Kenney e Lau (1985) os solos analisados podem ser considerados internamente instável e estável, respectivamente.

A Figura 3.4 apresenta os solos ensaiados e a abertura de filtração dos geotêxteis utilizados ( $G_1$  à  $G_4$ ). As setas indicam os valores dos diâmetros indicativos dos solos como definido por Lafleur (1999), sendo para os solos de granulometria côncava o diâmetro com 30% de material passante ( $d_{30}$ ) e para solos com granulometria descontínua, o diâmetro referente ao menor valor da descontinuidade ( $d_G$ ).

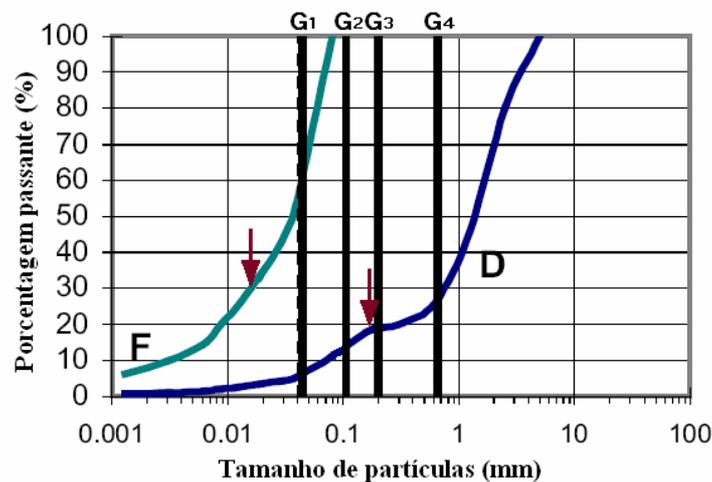


Figura 3.4. Curvas granulométricas (Adaptação: Lafleur et al., 2002).

Estes ensaios foram realizados com fluxo ascendente e descendente, e o gradiente hidráulico do sistema foi aumentado gradativamente para 1; 2,5; 5; 7,5 e 10, sendo os acréscimos aplicados de 24 em 24 horas.

O solo internamente instável de granulometria descontínua  $D$ , quando ensaiado com o geotêxtil  $G_4$ , sofreu perda de partículas finas menores que a abertura de filtração da manta, o que fez diminuir a perda de carga próxima à interface solo/geotêxtil, mantendo a condutividade hidráulica praticamente constante durante o ensaio. Porém a quantidade média de partículas perdidas durante o ensaio foi de  $3364 \text{ g/m}^2$ , valor este superior aos  $2500 \text{ g/m}^2$  proposto por Lafleur et al. (1989) para caracterizar erosão interna. No entanto, quando este mesmo solo foi ensaiado com o geotêxtil  $G_2$ , o qual possui abertura de filtração menor, as perdas de carga próximas à interface acusaram cegamento do sistema, refletindo na diminuição dos valores da condutividade hidráulica com o tempo.

O solo de granulometria côncava  $F$ , mas estável quando ensaiado com o geotêxtil  $G_1$ , não apresentou mudanças na granulometria da zona próxima à interface e a condutividade hidráulica manteve-se constante durante o ensaio. Quando realizado ensaio com geotêxtil  $G_3$ , o qual possui abertura de filtração maior que as partículas do solo, ocorreu erosão no instante de aplicação do gradiente hidráulico igual a 2,5.

Segundo o Critério de Retenção proposto por Lafleur (1999), todas as combinações de geotêxteis com o solo  $F$  eram susceptíveis de sofrer erosão interna mesmo sendo este um solo internamente estável, visto que os geotêxteis possuem abertura de filtração superior ao tamanho limite recomendado. O solo  $D$  tenderia à colmatação com os geotêxteis  $G_1$  e  $G_2$  e a um bom desempenho em filtração com os geotêxteis  $G_3$  e  $G_4$ . Baseado nos dados desta pesquisa pode-se constatar que o critério de dimensionamento proposto pelo autor (1999), quando aplicado a solos instáveis, apresentou bons resultados como indicador de colmatação do sistema, no entanto, sem assegurar compatibilidade quanto à retenção de material, pois os sistemas solo/geotêxtil considerados adequados segundo esse critério apresentaram ocorrência de “piping”.

Fator importante constatado pelos autores foi a relevância da intensidade do gradiente hidráulico aplicado no sistema, pois em alguns casos a colmatação do sistema foi encontrada para baixos gradientes e quando aumentado para certos valores a Razão entre Gradientes diminuiu para valores aceitáveis. O que pode indicar que gradientes maiores contribuem para a desobstrução de zonas em que se desenvolve colmatação a baixos gradientes. Entretanto, outras combinações apresentaram formação de arcos a baixos gradientes, tornando-se instáveis com o aumento do gradiente hidráulico.

Os ensaios de Razão entre Gradientes com fluxo ascendente foram realizados apenas com o geotêxtil  $G_2$ . Os resultados apresentados foram similares aos obtidos nos ensaios com fluxo descendente, no entanto a quantidade de partículas perdidas foi maior, sendo isto relacionado ao fato de que o número de contatos entre partículas, e assim as tensões intergranulares, são diminuídas pelo efeito de arrastamento da corrente de água ascendente contra a gravidade.

Bhatia e Huang (1995) também realizaram pesquisa de compatibilidade de geotêxteis para filtração de solos internamente instáveis, mas sob um estado de condições hidráulicas não constante, com um acréscimo repentino do gradiente hidráulico de 5 para 20.

O aumento da velocidade de percolação, com a mudança do gradiente hidráulico de 5 para 20, foi mais acentuado para solos com maiores coeficientes de curvatura e maiores valores de  $d_{85}$ . Isto indica que solos com distribuição granulométrica ampla e graúda quando submetidos a um aumento repentino do gradiente hidráulico aplicado, apresentam aumento imediato e temporário da velocidade de percolação, sendo que este aumento tem mais influência no comportamento de solos internamente instáveis que nos solos estáveis. Aproximadamente 48 horas depois do aumento do gradiente hidráulico a velocidade de percolação do sistema foi estabilizada e a permeabilidade voltou ao seu valor padrão. As variações no gradiente hidráulico tiveram influência apenas a curto prazo na velocidade e essa influência foi maior para solos internamente instáveis. Nesta pesquisa, onde os gradientes hidráulicos iniciais

aplicados eram igual a 5 (o qual pode ser considerado um valor de gradiente alto), os resultados de ensaios mostraram que para uma perspectiva de longa duração as mudanças de gradientes tiveram influência insignificante na permeabilidade do sistema.

Lafleur (1999) realizou pesquisa para avaliação da compatibilidade de sete geotêxteis não tecidos agulhados com dez solos granulares não coesivos com granulometria ampla quando submetidos a um gradiente hidráulico descendente de até 18. Nesta pesquisa foram analisadas variações na condutividade hidráulica ao longo do período de ensaio e a quantidade de partículas carregadas em ensaios de longa duração com uso de corpos de prova de tamanho reduzido. Através da curva condutividade hidráulica versus tempo, foi caracterizado o comportamento do sistema e determinado o momento em que este alcançou o equilíbrio.

As características dos solos utilizados por Lafleur são apresentadas na Tabela 3.1 e suas curvas estão representadas através do modelo gráfico proposto por Kenney e Lau (1985) na Figura 3.5. No modelo gráfico pode-se constatar a característica de instabilidade interna dos solos *A*, *B*, *D*, *E*, *G* e *H*, conforme mencionado na tabela abaixo.

**Tabela 3.1. Características dos solos utilizados por Lafleur (1999).**

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>G<sub>1</sub></i>	<i>H</i>	<i>I</i>
$C_C^1$	1,7	3,1	1,6	2,5	0,2	1,4	8,0	1,3	6,1	1,4
$C_U^2$	37,7	17,9	10,4	28,3	36,7	16,0	12,5	2,1	22,2	12,0
Forma da curva <sup>3</sup>	Co	Co	Li	Co	De	Li	De	Li	De	Li
Condição de estabilidade <sup>4</sup>	Ins	Ins	Est	Ins	Ins	Est	Ins	Est	Ins	Est

<sup>1</sup> $C_C$ : coeficiente de curvatura

<sup>2</sup> $C_U$ : coeficiente de uniformidade

<sup>3</sup>Co: côncava; Li: linear; De: descontínua (Lafleur et al., 1989)

<sup>4</sup>Ins: instável; Est: estável (Kenney e Lau, 1985)

Nos resultados obtidos por Lafleur, os solos estáveis apresentaram tanto sufusão quanto formação de arcos, no entanto, não ocorreu com estes solos colmatação. A sufusão ocorreu com os solos *C* e *I*, quando filtrados por mantas com abertura de filtração substancialmente grande se comparadas ao maior diâmetro desses solos.

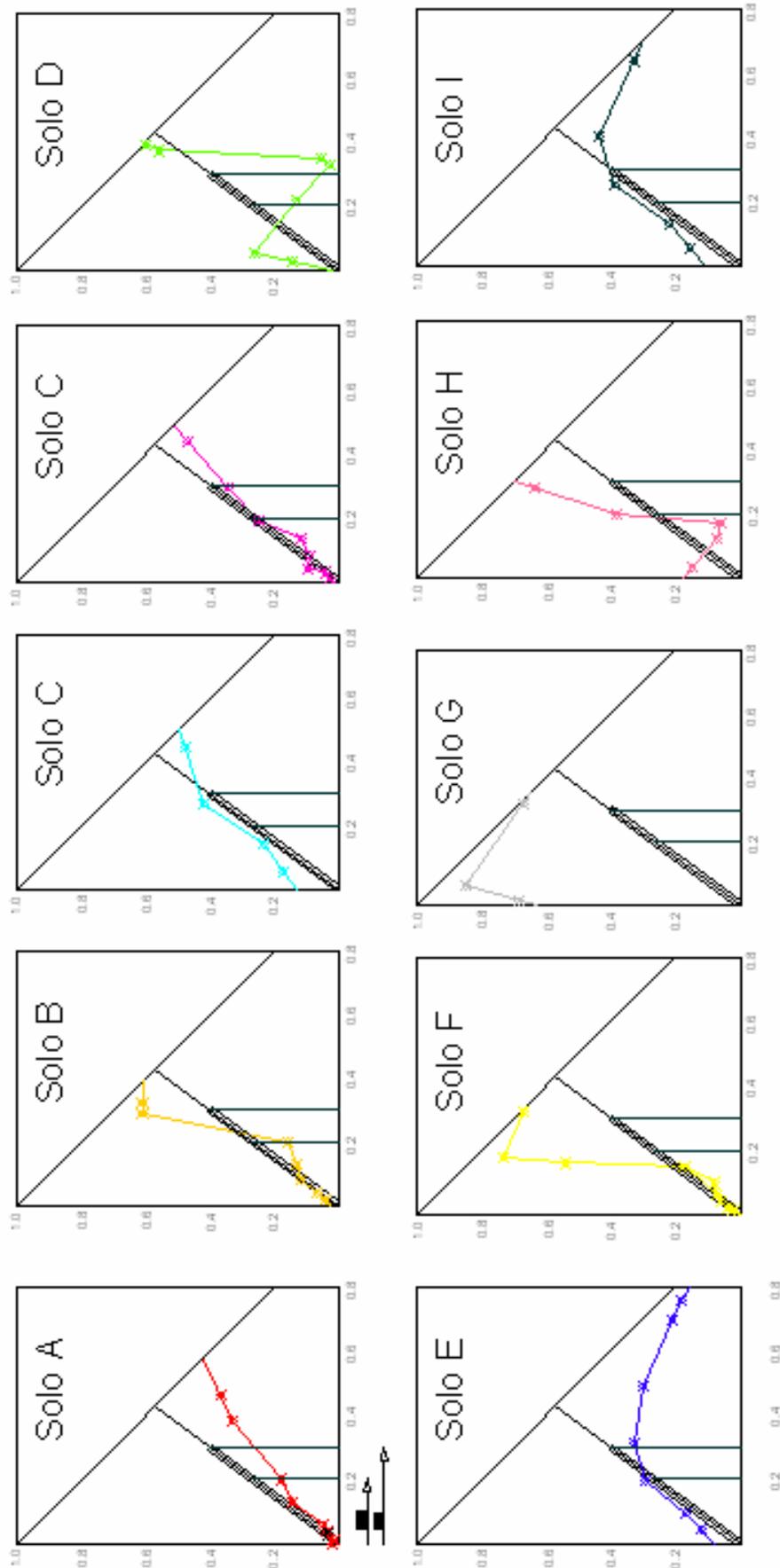


Figura 3.5. Curvas utilizadas por Lafleur (1999) no método gráfico proposto por Kenney e Lau.

Os solos instáveis com granulometria côncava e os solos com granulometria descontínua não sofreram sufusão. Apresentando colmatção do geotêxtil ou formação de arcos na interface do sistema. A Tabela 3.2 mostra um resumo com os resultados mais significativos obtidos pelo autor e a Tabela 3.3 apresenta a indicação das propriedades dos geotêxteis mencionados.

**Tabela 3.2. Resumo de comportamento à filtração dos sistemas (Fonte: Lafleur, 1999)**

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>G<sub>1</sub></i>	<i>H</i>	<i>I</i>
<b>TS-1</b>	colmatção	arco	piping	arco	arco	arco	arco	arco	colmatção	arco
<b>TS-2</b>	colmatção	—	—	arco	—	—	arco	arco	colmatção	arco
<b>TS-4</b>	colmatção	arco	piping	colmatção	arco	arco	colmatção	arco	colmatção	piping

**Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis utilizados pelo autor (Fonte: Lafleur, 1999).**

	<b>TS-1</b>	<b>TS-2</b>	<b>TS-4</b>
Massa/área (g/m <sup>2</sup> )	159	498	101
Espessura (mm)	1,42	3,79	0,96
FOS (μm)	200	106	200
Condutividade hidráulica (m/s)	5,5 x 10 <sup>-3</sup>	4,1 x 10 <sup>-3</sup>	3,8 x 10 <sup>-3</sup>

O solo *A*, por exemplo, apresentou colmatção da manta provavelmente devido ao pequeno tamanho da abertura de filtração dos geotêxteis utilizados em comparação ao diâmetro do solo, pois este solo apresenta um  $d_{30}$  de aproximadamente 0,46 milímetros.

O solo *D* apresentou comportamento diferente quando submetido à filtração com dois geotêxteis com mesmo valor de abertura de filtração, valor este adequando segundo o Critério de Lafleur. Assim, constatando que outros fatores influenciam no comportamento do sistema durante o processo de filtração, não apenas a abertura de filtração e o diâmetro das partículas do solo. O sistema solo/geotêxtil que apresentou colmatção foi com o geotêxtil TS-4, sendo

este o de menor espessura, enquanto o geotêxtil TS-1 mostrou desempenho satisfatório para sua função. O mesmo ocorreu para o solo *G*.

Os solos com granulometria descontínua, quando filtrados por geotêxteis com abertura de filtração superior à recomendada, sofrem sufusão até certo limite, havendo depois a formação de arcos de partículas que estabilizam o sistema solo/geotêxtil.

Um fator que pode estar associado a esta variação no comportamento de filtração dos solos internamente instáveis é a possível ocorrência de filtração em suspensão, pois nestes solos pode haver sufusão formando grandes vazios na estrutura do solo, entre as partículas maiores. Estes vazios são caminhos preferenciais de fluxo com altas velocidades de percolação.

## **4. METODOLOGIA DE ENSAIOS**

### **4.1. Introdução**

A campanha experimental consiste na realização de ensaios de filtração de longa duração em permeâmetros para analisar o comportamento do sistema solo/geotêxtil e ensaios de caracterização dos materiais utilizados.

Este capítulo apresenta o planejamento da campanha experimental desenvolvida, com descrição dos materiais e equipamentos utilizados, assim como a metodologia empregada para os ensaios.

### **4.2. Materiais de base**

Os materiais de base utilizados na pesquisa foram preparados a partir de compostos de pó de pedra obtidos em pedreira da região, preparados com frações granulométricas de maneira a compor curvas de granulometrias específicas.

O pó de pedra utilizado é um material não friável com densidade dos grãos de 2,72.

As curvas granulométricas A e B foram elaboradas fundamentando-se na revisão bibliográfica abordada no Capítulo 3, sendo curvas com granulometria ampla (broadly graded) e consideradas internamente instáveis segundo o Método Gráfico de Classificação (KENNEY e LAU, 1985). A curva granulométrica C refere-se à condição da amostra de pó de pedra utilizada, também possuindo granulometria ampla, mas sendo considerada estável pelo método de classificação. As três curvas apresentam formato côncavo segundo denominação de Lafleur et al. (1989). A Figura 4.1 apresenta as curvas utilizadas e a Figura 4.2 apresenta a análise pelo método gráfico de classificação.

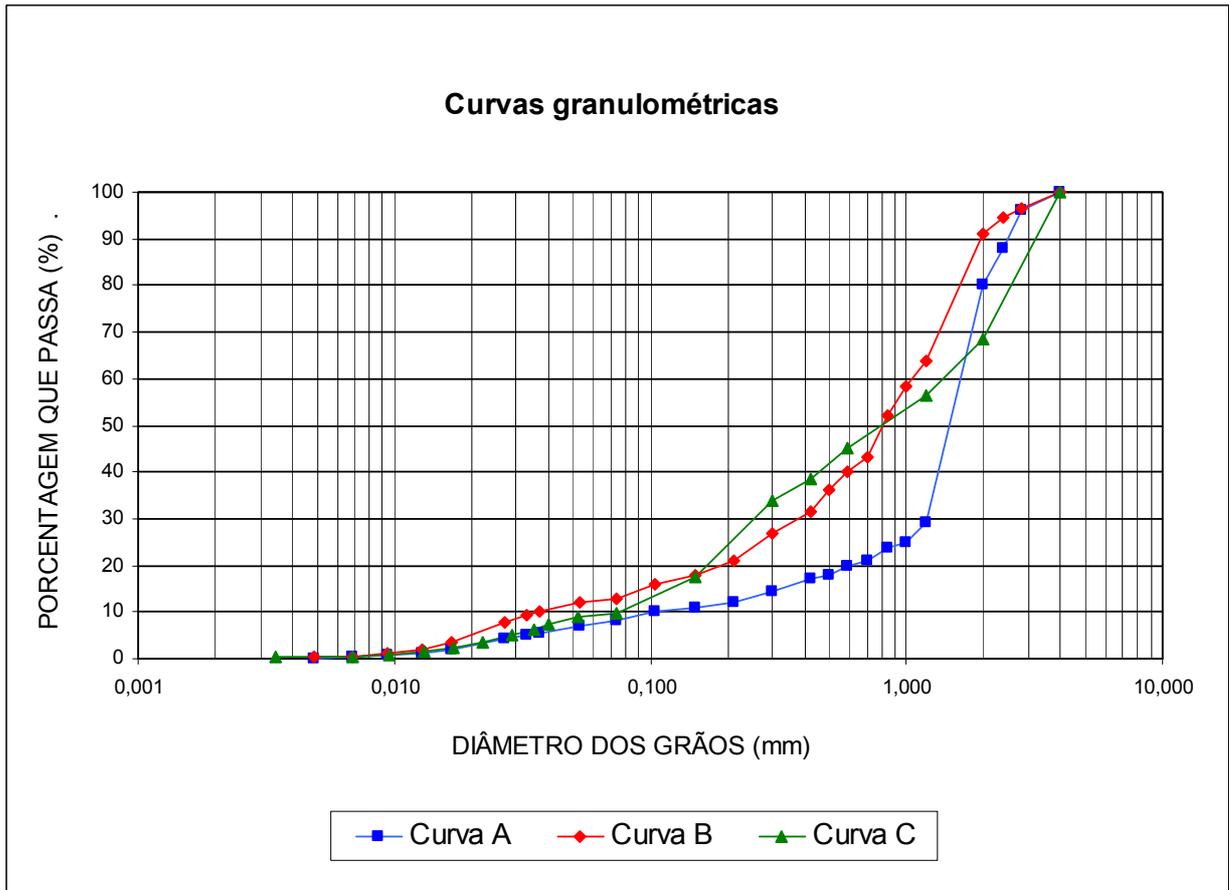


Figura 4.1. Curvas granulométricas dos solos de base utilizados.

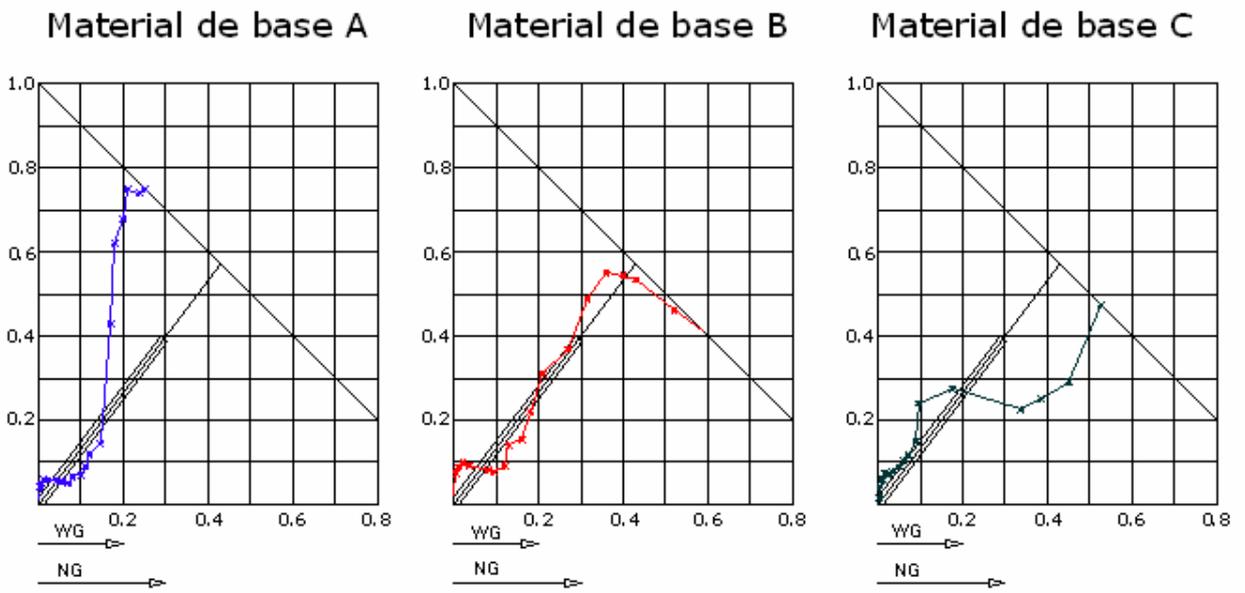


Figura 4.2. Análise dos materiais de base pelo Método Gráfico de Classificação Kenney e Lau (1985).

A Tabela 4.1 apresenta algumas características das misturas utilizadas como solo de base, sendo elas coeficiente de curvatura, coeficiente de uniformidade, diâmetro indicativo com 10, 15, 30, 35, 50, 60 e 85% das partículas passantes e classificação quanto à estabilidade interna segundo os métodos de Lafleur et al. (1989), Kenney e Lau (1985) e Chen et al. (1981).

**Tabela 4.1. Características das curvas granulométricas utilizadas.**

	Kenney e Lau	Lafleur	Chen	$C_C$	$C_U$	$d_{10}$ mm	$d_{15}$ mm	$d_{30}$ mm	$d_{35}$ mm	$d_{50}$ mm	$d_{60}$ mm	$d_{85}$ mm	$k$ cm/s
<b>A</b>	Instável	Côncava	Estável	8,20	16,0	0,105	0,322	1,206	1,285	1,524	1,682	2,238	$3 \times 10^{-2}$
<b>B</b>	Instável	Côncava	Instável	3,70	28,4	0,037	0,095	0,379	0,482	0,811	1,052	1,820	$1 \times 10^{-3}$
<b>C</b>	Estável	Côncava	Estável	0,62	18,5	0,078	0,125	0,263	0,347	0,800	1,441	2,800	$5 \times 10^{-4}$

### 4.3. Filtros geotêxteis

Os geossintéticos utilizados como filtro foram geotêxteis não-tecidos agulhados fabricados com filamentos contínuos de poliéster com diâmetro das fibras variando entre 2,15 a 2,54 x 10<sup>-3</sup> centímetros. A determinação de sua massa por unidade de área e espessura nominal obedeceu às recomendações das normas NBR 12568 (2003) e NBR 12569 (1992) respectivamente, sendo seus valores apresentados na Tabela 4.2. Os valores de condutividade hidráulica normal ao plano, porosidade, abertura de filtração AOS e O<sub>95</sub> (ensaio hidrodinâmico) foram fornecidos pelo fabricante doador.

Por serem as mantas geotêxteis não-tecidos, as quais possuem como característica principal a aleatoriedade na deposição das fibras quando do processo de tecelagem (GARDONI, 2000), os corpos de prova apresentam valores de massa por unidade de área diferentes, dependendo da região considerada. Portanto, os corpos de prova foram escolhidos visando uma variação mínima de massa por unidade de área para possibilitar a comparação entre os dados de ensaios com diferentes solos.

**Tabela 4.2. Características dos geotêxteis utilizados**

Tipo	Modelo*	Massa por unidade de área		Espessura nominal		Porosidade*	AOS*	O <sub>95</sub> *	Condutividade hidráulica*
		g/m <sup>2</sup>	cv%	mm	cv%				
<b>G1</b>	RT – 7	138	12,2	1,15	11,4	90,3 - 92,0	0,26	0,16	3,5 x 10 <sup>-1</sup>
<b>G2</b>	RT – 10	221	7,5	2,05	4,8	90,3 – 91,5	0,23	0,13	3,5 x 10 <sup>-1</sup>

\* Conforme indicação do fabricante doador

#### 4.4. Ensaios de Caracterização Hidráulica

Os ensaios de caracterização determinam as características do produto sem considerar sua interação com o meio ambiente nem o processo de solicitação imposto na obra, sendo propriedades inerentes aos produtos e independentes da condição de utilização (VIDAL, 2002).

Neste trabalho, além dos ensaios básicos de característica física para determinação de massa por unidade de área e espessura nominal, citados no item 4.3, também foram realizados ensaios para determinação das características hidráulicas, como o ensaio de determinação de abertura de filtração por peneiramento via úmida e o ensaio de filtração à carga variável.

O ensaio de determinação de abertura de filtração por peneiramento via úmida foi executado conforme a ISO 12956 (1999). O ensaio baseia-se na determinação da distribuição granulométrica de um material granular após passagem por uma camada única de geotêxtil ou produto correlato usado como filtro, sem sobrecarga. A abertura de filtração característica corresponde a um tamanho específico de partícula do material granular passante.

O equipamento de ensaio utilizado, como ilustra a Figura 4.3, é composto de peneirador, sistema de suprimento de água, pulverizador de água para assegurar umedecimento uniforme do corpo de prova, cilindro transparente fechado para evitar perda de material granular,

sistema de fixação do corpo de prova, sistema de coleta do material que passa através do corpo de prova e grelha com malha metálica para suporte do corpo de prova durante o ensaio.

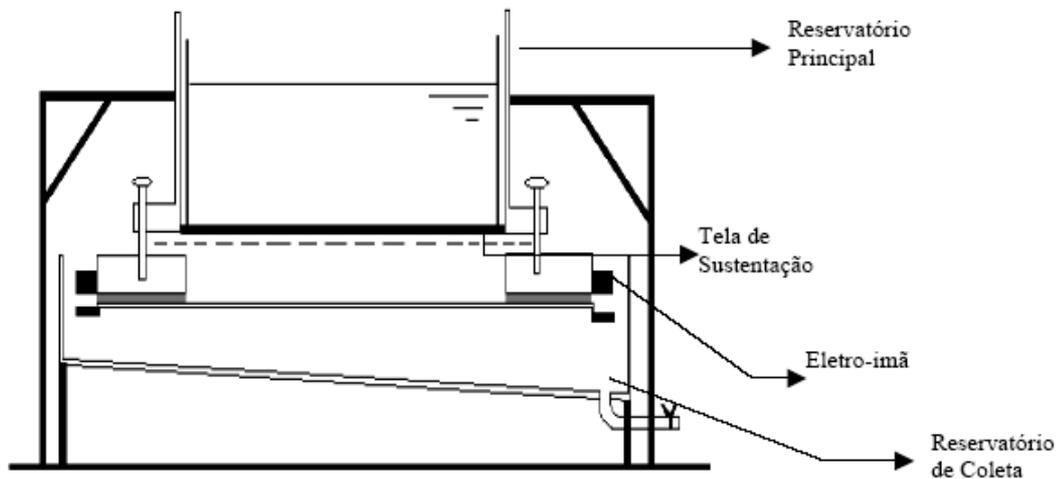


**Figura 4.3. Equipamento para ensaio de abertura de filtração por peneiramento via úmida.**

Para execução do ensaio, inicialmente determinou-se a massa seca dos corpos de prova e do material granular. O geotêxtil, após saturado, foi fixado no equipamento de peneiramento, sendo o material granular espalhado uniformemente sobre sua superfície. Logo, o pulverizador de água é aberto, umedecendo completamente o material granular. O peneirador é ligado durante 600 segundos, sendo sua frequência e amplitude enquadradas nas especificações de norma. O material granular que passou através do corpo de prova é coletado, determinando-se a massa seca de material retido e passante durante o ensaio. Assim, gerou-se a curva granulométrica por peneiramento do material passante, onde o tamanho de abertura característico do geotêxtil no ensaio,  $O_{90}$ , é igual ao diâmetro referente a 90% da curva de distribuição granulométrica,  $d_{90}$ .

O ensaio de filtração à carga variável (URASHIMA, 2002) fornece dados necessários para estimativa da distância média entre confrontos, sendo conduzido de forma a avaliar a maior partícula que passa por um filtro têxtil em uma primeira frente de confrontos.

O equipamento para realização de ensaio consiste em reservatório principal, tela de suporte do geotêxtil, sistema de fixação do geotêxtil, sistema de vedação e reservatório de coleta, como ilustra a Figura 4. 4. O reservatório principal é retangular com dimensões de 87 x 80 x 35 cm, sendo seu fundo fixado por meio de eletroímãs.



**Figura 4. 4. Esquema do equipamento de filtração à carga variável (Fonte: URASHIMA, 2002).**

Para execução do ensaio, inicialmente determina-se a massa seca dos corpos de prova, os quais possuem área de  $0,61 \text{ m}^2$ . O corpo de prova após saturado é posicionado sobre a tela de sustentação e fixado com o auxílio de um reservatório secundário, o qual é preenchido com água até atingir uma carga hidráulica de 20 centímetros. O material granular previamente preparado é pulverizado sobre a água com ajuda de uma peneira, para garantir melhor homogeneidade de distribuição. Depois do material granular ter sedimentado sobre o geotêxtil, os eletroímãs são desligados e a parte inferior do reservatório se abre instantaneamente. O material granular que passa através do corpo de prova é coletado,

determinando-se a massa seca de material retido e passante durante o ensaio e a curva granulométrica do material passante.

#### **4.5. Ensaio de Filtração de Longa Duração**

##### **4.5.1. Concepção de ensaio**

O ensaio de filtração de longa duração tipo Razão entre Gradientes é muito usado para avaliar o desempenho de sistemas solo/geotêxtil no tempo em condições de ensaio controladas. Os valores obtidos são utilizados para indicar o potencial de colmatção, o potencial de perda de partículas e a permeabilidade do sistema, quando submetido a um fluxo normal unidirecional.

O ensaio foi desenvolvido baseando-se nas seguintes hipóteses:

- A Razão entre Gradientes indica a ocorrência de colmatção na interface solo/filtro;
- As variações da condutividade hidráulica com o tempo descrevem o comportamento do sistema solo/geotêxtil, havendo colmatção quando a condutividade hidráulica diminui e erosão interna quando aumenta;
- A massa de partículas carregadas através do geotêxtil é uma medida da habilidade do filtro em reter partículas.

Seguindo a Norma ASTM D-5101 (2001), o ensaio de Razão entre Gradientes é mais apropriado para avaliar o movimento de partículas finas dentro de materiais com granulometria grossa ou granulometria descontínua, onde a estabilidade interna para diferenciais de gradiente hidráulico pode ser um problema. O valor de Razão entre Gradientes (GR) é uma razão entre o gradiente hidráulico na interface solo/geotêxtil e o gradiente hidráulico de uma faixa intermediária do material de base.

O aspecto importante dos valores de GR obtidos durante o ensaio não é tanto o próprio número, mas se a vazão e a permeabilidade são mantidas e se há o estabelecimento de um equilíbrio perceptível ou estabilização do sistema.

Um valor de GR igual a um ou ligeiramente menor é preferível. Valores menores que um indicam que algumas partículas de solo foram perdidas pelo sistema desenvolvendo uma estrutura de pontes mais abertas no solo adjacente ao geotêxtil. Uma diminuição contínua deste valor indica a ocorrência de “piping” e pode exigir uma avaliação quantitativa para determinar a efetividade do filtro. Valores de Razão entre Gradientes maiores que um significam que aconteceu alguma obstrução do sistema e restrição de fluxo, se houver equilíbrio do sistema a vazão resultante pode satisfazer as exigências de projeto.

Lafleur et al. (2002) consideram resultados de GR maiores que 2 como indicação de colmatação e valores menores que 0,5 como indicativo de “piping”. Christopher e Holtz (1985) consideram GR igual a 3 como o valor limite máximo para aceitação de um sistema solo/geotêxtil.

Os valores de Razão entre Gradientes e vazão permissíveis para vários sistemas solo/geotêxtil são função da aplicação específica, sendo responsabilidade do projetista estabelecer os valores aceitáveis para cada caso (ASTM D-5101, 2001).

O equipamento utilizado para ensaio foi desenvolvido no ITA, sendo já utilizado em estudos anteriores. Foi confeccionado tendo como referência a proposta de padronização para ensaio de Razão entre Gradientes, segundo a norma internacional ASTM D-5101 (2001).

O equipamento para ensaios, o qual realiza ensaio de filtração com fluxo unidirecional e carga constante, é composto por um conjunto de quatro permeâmetros de acrílico, quadro de piezômetros e um sistema de abastecimento de água, como ilustra a Figura 4.5.

Os permeâmetros foram confeccionados com peças de acrílico, com a finalidade de possibilitar o acompanhamento dos ensaios por meio de observações visuais e por ser este um

material inerte, eliminando assim, possíveis interações de caráter físico-químico entre os mesmos, o solo de base e o fluido percolante.



**Figura 4.5. Equipamento de ensaio de razão entre gradientes.**

O permeâmetro é formado por uma tampa, uma parte inferior e uma parte superior, como ilustra a Figura 4.6. Na parte inferior localiza-se a saída de água percolada, existindo uma grelha com malha para suporte do geotêxtil ensaiado com 1 milímetro de diâmetro e espaçamento de aproximadamente 10 milímetros. O solo é colocado na parte superior, existindo saídas piezométricas ao longo da altura do cilindro. As duas partes são acopladas com uso de fechadores externos (sargentos) possuindo sistema de vedação para assegurar sua estanqueidade.

O sistema de abastecimento de água destilada é composto por três reservatórios principais e quatro reservatórios ajustáveis para regulagem de gradiente hidráulico, sendo os reservatórios principais divididos em reservatório inferior, superior e distribuidor com capacidade aproximada de 50, 50 e 6 litros respectivamente.

O sistema de abastecimento é interligado em sistema fechado de circulação com uso de bomba para recalque e sistema de aquecimento com termostato para manter a temperatura da

água constante e acima da temperatura de laboratório, minimizando assim o acúmulo de ar na interface solo/geotêxtil e no solo.



**Figura 4.6. Detalhes do permeâmetro.**

As leituras das alturas piezométricas ao longo do ensaio foram realizadas através de piezômetros confeccionados com tubos plásticos transparentes. Um papel escala fixado sob os tubos permite a leitura das alturas piezométricas.

#### **4.5.2. Considerações sobre o ensaio**

Para execução da campanha de ensaios foi necessário escolher algumas técnicas adotadas em virtude de obtenção de melhores resultados ou devido à incompatibilidade com os equipamentos disponíveis. Na seqüência são apresentados alguns problemas encontrados e as técnicas escolhidas para reduzir ou eliminar estas complicações.

Um problema inicial encontrado foi a escolha da forma de colocação do material de base no permeâmetro. A princípio avaliou-se a possibilidade de introdução do solo previamente saturado, em forma de pasta (lodo). No entanto, os materiais em pasta apresentaram alta tendência à segregação devido à ampla distribuição granulométrica utilizada, sendo preferível a colocação do material seco.

Em virtude deste fato, precisou-se realizar saturação do solo já colocado no permeâmetro com fluxo ascendente lento para assegurar a saída de bolhas de ar do sistema. Para facilitar a saída das bolhas optou-se por manter a água utilizada no ensaio a uma temperatura de aproximadamente 5° acima da temperatura do laboratório e o material de base no instante da colocação estando previamente resfriado. Inicialmente testou-se colocar o solo após a água estar a poucos centímetros acima do nível do geotêxtil, no entanto esta técnica apresentou problemas quanto à homogeneização do material na interface. Foi testada então, a saturação do sistema solo/geotêxtil com fluxo lento e inverso até a altura total do permeâmetro, porém pode-se perceber que houve perturbação da estrutura do solo causando ruptura hidráulica e ascendência do particulado fino para a superfície do material granular, inclusive com presença de partículas em suspensão na água, como pode-se observar na Figura 4.7.

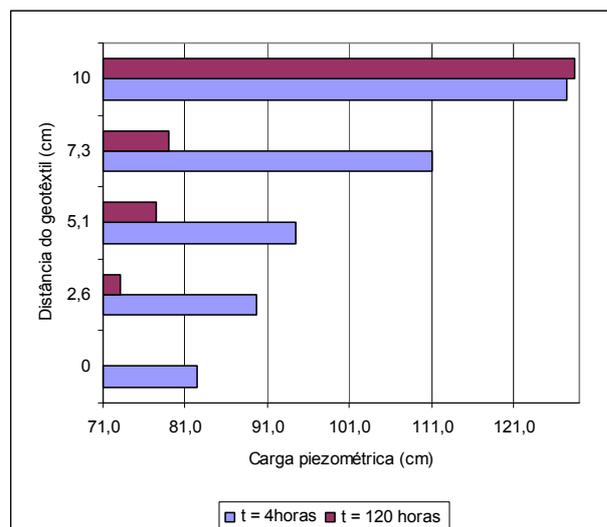


**Figura 4.7. Ensaio realizado com fluxo ascendente com elevação do particulado fino.**

Após diversas tentativas a opção que rendeu melhores resultados foi a saturação lenta com fluxo ascendente e água aquecida até poucos milímetros acima da superfície do solo de base. Sendo a parte superior do permeâmetro, acima da superfície do solo, preenchida com gotejados para não haver movimentação dos finos do solo.

À água destilada foi adicionado um produto algicida para controlar o crescimento de material biológico. Como a norma do ensaio sugere o uso, mas não indica um produto específico escolheu-se utilizar uma solução de fenol, tendo este apresentado resultados satisfatórios em ensaios realizados por Olson e Daniel (1981 apud FISCHER et al. 1999). A solução utilizada foi  $3 \times 10^{-2}$  mol/L de fenol, sendo aplicado 0,5mL da solução para cada litro de água dos reservatórios. A reposição da solução foi realizada ao longo do período de ensaio sempre que se julgou necessário.

Nos primeiros ensaios observou-se uma grande variação dos gradientes hidráulicos totais aplicados ao longo do tempo, como pode-se observar no gráfico de cargas piezométricas de um ensaio típico apresentado na Figura 4.8. Visando a minimização desta variação os reservatórios reguladores de gradiente hidráulico aplicado foram modificados ao longo da campanha experimental, com diminuição do comprimento das mangueiras conectoras e mudança na forma de conexão entre as mangueiras e os reservatórios, apresentando resultados muito satisfatórios.

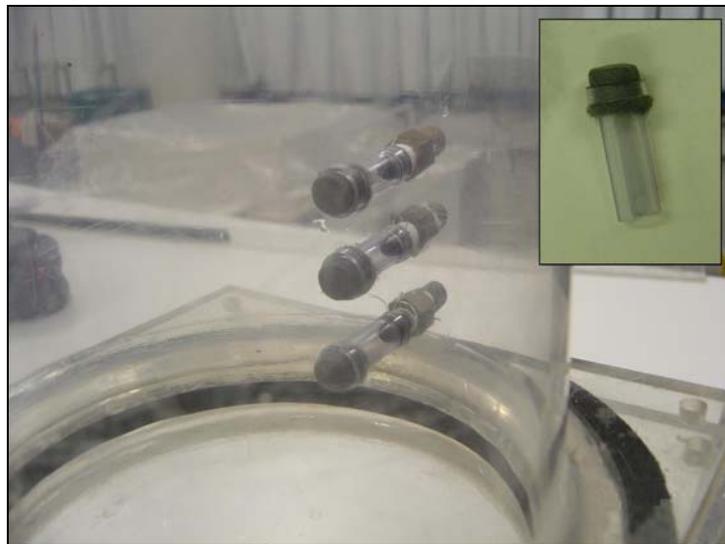


**Figura 4.8. Cargas piezométricas versus distância da superfície do geotêxtil.**

As leituras das alturas piezométricas na fase inicial de ensaios apresentaram problemas de entupimento em alguns casos, o que acarretou em dúvidas quanto à veracidade de certos resultados obtidos. Inicialmente eram utilizados apenas cinco piezômetros por permeâmetro.

Assim, eram colocados pequenos tubos internos de aproximadamente cinco centímetros prolongando os piezômetros na parte interna do permeâmetro com o intuito de obter a altura manométrica na região central da camada do solo de base, minimizando o efeito de borda do cilindro, o qual pode resultar em caminhos preferenciais de fluxo. Na extremidade dos tubos internos eram colocadas buchas de geotêxtil com a finalidade de evitar a migração do material de base para os leitores dos piezômetros.

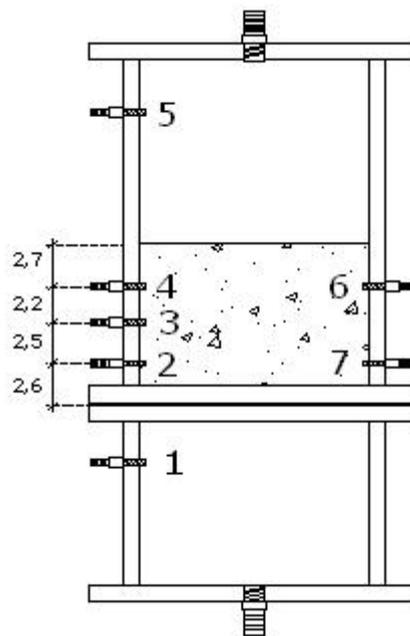
Com o decorrer dos ensaios, pode-se perceber a importância da colocação de piezômetros nos dois lados do cilindro para conferência dos dados obtidos. Foram então implementados dois piezômetros na lateral oposta, os quais foram colocados nas principais alturas de leituras, o que dá a certeza da veracidade das leituras assegurando a homogeneidade das camadas de solo. Assim, os tubos foram reduzidos para aproximadamente dois centímetros e as buchas de geotêxtil foram substituídas por um revestimento na face de entrada de fluxo com uma camada única do produto, como pode-se observar na Figura 4.9.



**Figura 4.9. Tubos internos das entradas piezométricas.**

As alturas dos piezômetros em relação ao geotêxtil e a nomenclatura para sua descrição ao longo deste trabalho está descrita na Figura 4.10. Os piezômetros 2 e 7 são localizados próximos à região de interface, sendo os dados obtidos por estes relativos à interação

solo/geotêxtil. Os piezômetros 4 e 6 são localizados próximo à superfície do solo, não sofrendo influência dos mecanismos de filtração da interface. O piezômetro 3 é localizado em uma zona intermediária em relação aos outros piezômetros para avaliar a mudança gradativa de altura piezométrica. Os permeâmetros 1 e 5 servem para constatação da carga hidráulica de saída e entrada e saída do ensaio, respectivamente.



**Figura 4.10. Esquema dos piezômetros usados na campanha de ensaio (escala indicada em centímetros).**

Embora existam trabalhos considerando modificações no Ensaio de Razão entre Gradientes quanto ao número e distância entre as saídas piezométricas, como Fannin et al. (1998) e Gardoni (2000) com a colocação piezômetros 8 e 3 milímetros acima do geotêxtil, respectivamente, optou-se nesta pesquisa manter as distâncias próximas das indicadas na norma internacional por limitações do equipamento de ensaio.

A expurgação do solo com  $\text{CO}_2$  antes da saturação com água é recomendada para melhor precisão de ensaio, porém por motivos práticos a adoção desta medida não foi possível nos ensaios realizados na campanha experimental. O procedimento consta da inserção de gás  $\text{CO}_2$  através do permeômetro com fluxo ascendente antes da saturação com água. O intuito é

substituir o ar existente nos vazios por  $\text{CO}_2$ , o qual é mais facilmente solúvel na água, garantindo assim, uma melhor saturação do sistema solo/geotêxtil.

Fischer et al. (1999) mostrou com a realização de uma bateria de ensaios que a expurgação do sistema tem efeito de curto prazo na permeabilidade, sendo os resultados não muito aparentes decorridos aproximadamente 100 horas de ensaio, como pode-se constatar na Figura 4.11. Análises dos valores de razão entre gradientes indicaram comportamento similar e os corpos de prova ao final dos ensaios apresentaram saturação variando de 96 a 102% ou completamente saturadas.

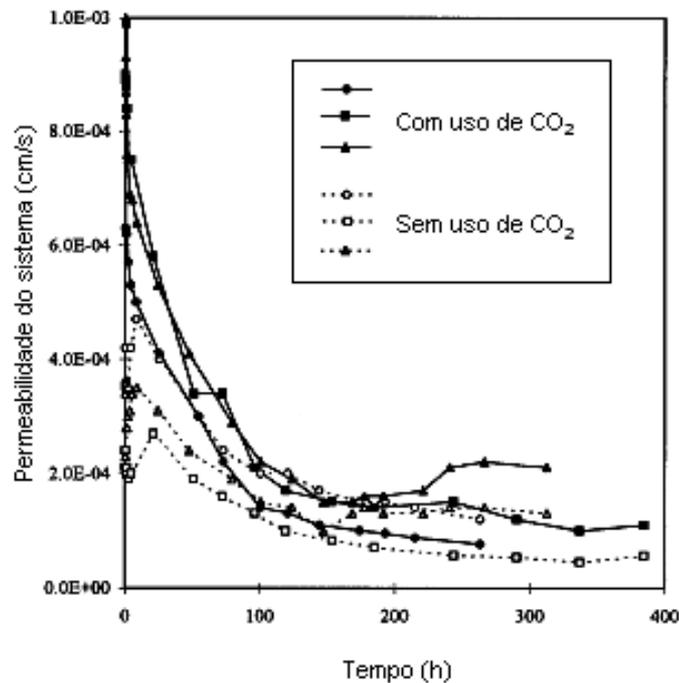


Figura 4.11. Efeito do uso de  $\text{CO}_2$  na permeabilidade do sistema no tempo (Adaptação: Fischer et al., 1999).

Quanto à forma de aplicação do gradiente hidráulico, a norma recomenda a aplicação de gradientes progressivos, sendo inicialmente aplicado o gradiente 1, o qual é mantido até estabilização do sistema, após aumenta-se o gradiente para 2,5, mantêm-se por 30 minutos e então altera-se para 5. O gradiente igual a cinco é mantido até estabilização, sendo então aumentado para 7,5 durante 30 minutos e na seqüência acrescido até 10.

Nesta pesquisa optou-se em realizar os ensaios submetidos a um gradiente hidráulico de aproximadamente 5. Foram realizados dois ensaios com o mesmo sistema solo/geotêxtil, mas variando a forma de aplicação do gradiente, sendo um dos casos a aplicação imediata de gradiente hidráulico e o outro a aplicação progressiva recomendada pela norma para avaliar a influência da aplicação do gradiente por etapas.

#### 4.5.3. Procedimento de ensaio adotado

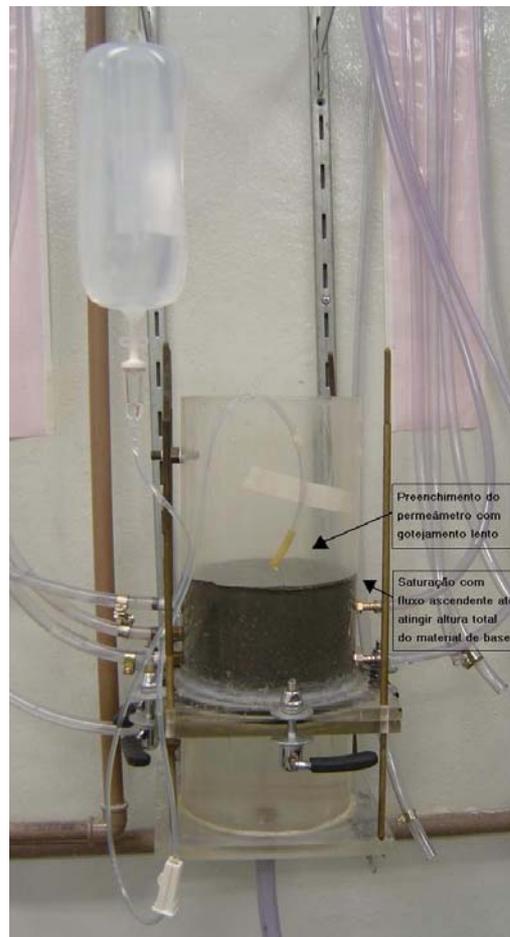
Como procedimentos preliminares de ensaio, temos:

- Colocação do corpo de prova de geotêxtil para saturação com adição de um produto tensoativo por no mínimo 24 horas.
- Preparação do material de solo base através das curvas granulométricas escolhidas.
- Resfriamento do material de solo base a ser ensaiado durante por no mínimo 12 horas.
- Limpeza total do equipamento, verificando inclusive as entradas dos piezômetros localizados na faixa ocupada pelo solo de base.
- Conexão dos tubos internos dos piezômetros localizados na região a ser preenchida pelo solo base, revestidos na face de entrada de fluxo com uma camada de geotêxtil virgem, afim de impedir o carreamento de partículas para os leitores piezométricos (Figura 4.9).
- Colocação do sistema de vedação entre a parte inferior e a parte superior do permeâmetro, com fitas adesivas de PVC expandido.

A montagem do ensaio deve seguir as seguintes etapas:

- Colocação do corpo de prova de geotêxtil previamente saturado na parte inferior do permeâmetro sobre a grade de sustentação.
- Fixação do corpo de prova de geotêxtil com massa de calafetar para garantir que não haja fluxo no sentido do plano da manta nas bordas.
- Colocação da parte superior do permeâmetro e fixação das duas partes do permeâmetro com aparatos externos de pressão (sargentos) e hastes externas parafusadas.

- Colocação do solo de base no interior do permeâmetro por técnica de espalhamento manual a seco. A compactação é feita batendo-se 6 vezes nas paredes do permeâmetro com haste de madeira a cada camada 2,5 centímetros de solo, conforme recomendado na Norma ASTM D-5101 (2001).
- Saturação lenta com fluxo ascendente até poucos milímetros acima da superfície do solo de base sendo a água do reservatório de distribuição mantida a uma temperatura de cerca de 5° acima da temperatura do laboratório.
- Conexão dos piezômetros ao sistema de leitura, a medida que sobe o nível d'água, sendo os piezômetros preenchidos com água e colocados assim que comece o gotejamento.
- A parte superior do permeâmetro, acima da superfície do solo, é preenchida com gotejador, como indica a Figura 4.12.



**Figura 4.12. Saturação do sistema.**

→ Fechamento do permeâmetro fixando a tampa através de hastes parafusadas.

→ Repouso do conjunto por cerca de 12 horas como indicado na norma.

Estando estas etapas cumpridas, a mangueira de alimentação é então conectada ao permeâmetro e a mangueira de saída ao reservatório regulador de gradiente. O fluxo é liberado e o tempo de início de ensaio anotado.

Durante o ensaio são feitas leituras piezométricas e determinação de vazão obrigatórias nos horários 0, ½, 1, 2, 4, 6 e 24 horas e após de 24 em 24 horas até estabilização do sistema.

A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos ensaios de razão entre gradientes realizados com indicação dos sistemas solo/geotêxtil utilizados em cada ensaio. Modificações ocorridas em procedimentos de alguns ensaios estão também listadas.

**Tabela 4.3. Resumo dos sistemas solo/geotêxtil utilizados no ensaio de filtração.**

<b>Ensaio</b>	<b>Geotêxtil</b>	<b>Material de base</b>	<b>Variação de ensaio</b>
<b>E1</b>	G1	A	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,9)
<b>E2</b>	G1	B	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,9)
<b>E3</b>	G1	C	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,7)
<b>E4</b>	G2	A	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,8)
<b>E5</b>	G2	B	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,7)
<b>E6</b>	G2	C	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 5,8)
<b>M1</b>	G1	A	Aplicação de gradiente <u>gradual</u> (i = 1,2; i = 3,5; i = 5,7)
<b>M2</b>	G2	C	Aplicação de gradiente <u>imediato</u> (i = 8,7)

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Ensaio de caracterização

#### 5.1.1. Ensaio de abertura de filtração

O ensaio de abertura de filtração empregando o princípio do peneiramento por via úmida segundo a Norma ISO 12956 (1999) foi realizado como explicado no item 4.4. A curva do material granular utilizado no ensaio é indicada na Figura 5.1.

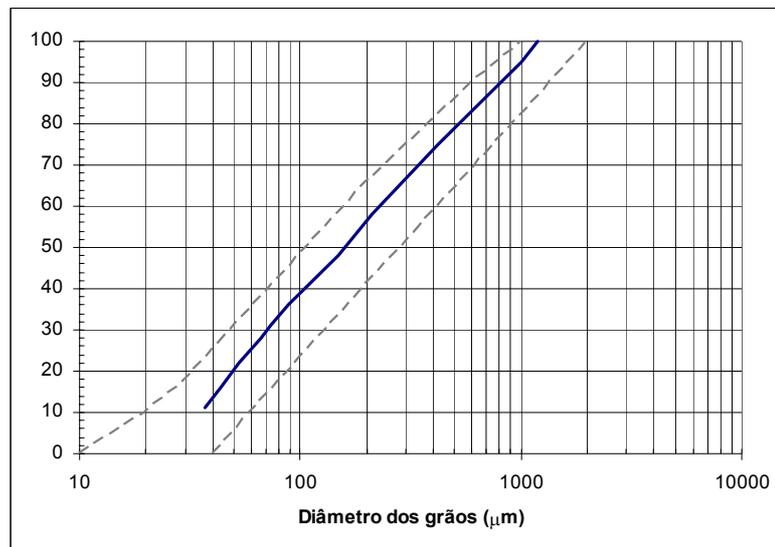


Figura 5.1. Curva granulométrica padrão utilizada nos ensaios de abertura de filtração.

As curvas granulométricas do material passante após realização do ensaio para os geotêxteis  $G_1$  e  $G_2$  estão indicadas na Figura 5.2. Sendo as aberturas de filtração características  $O_{90}$  de ambos os geotêxteis iguais a 0,082 milímetros.

Os valores obtidos para abertura de filtração praticamente idênticos entre os dois geotêxteis podem ser função da filtração no ensaio ter sido gerenciada pelo tamanho dos furos decorrentes do processo de agulhagem. A Figura 5.3 apresenta a imagem de um furo de agulhagem do geotêxtil  $G_1$  e uma partícula com tamanho de diâmetro aproximadamente igual ao obtido para o  $O_{90}$ . A Figura 5.4 apresenta um furo de agulhagem do geotêxtil  $G_2$ .

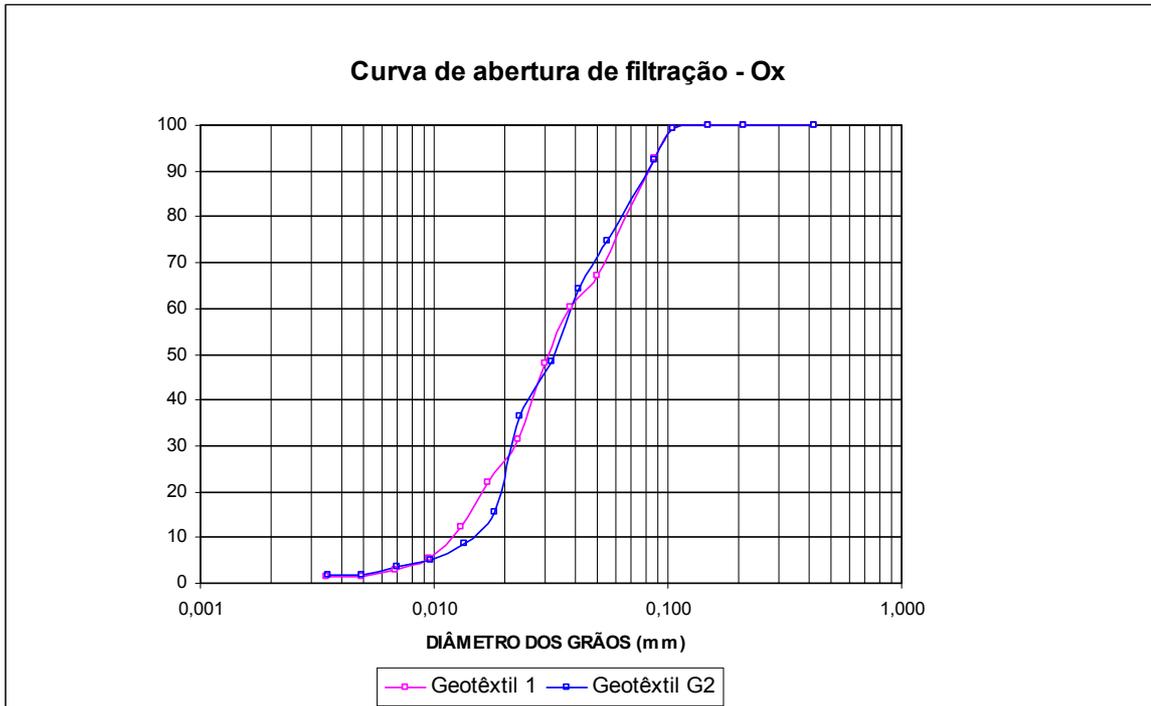


Figura 5.2. Curva granulométrica do material passante no ensaio de abertura de filtração – Geotêxtil G<sub>1</sub> e G<sub>2</sub>.



Figura 5.3. Furo de agulhagem geotêxtil G1 e partícula entre peneiras 140 e 170.

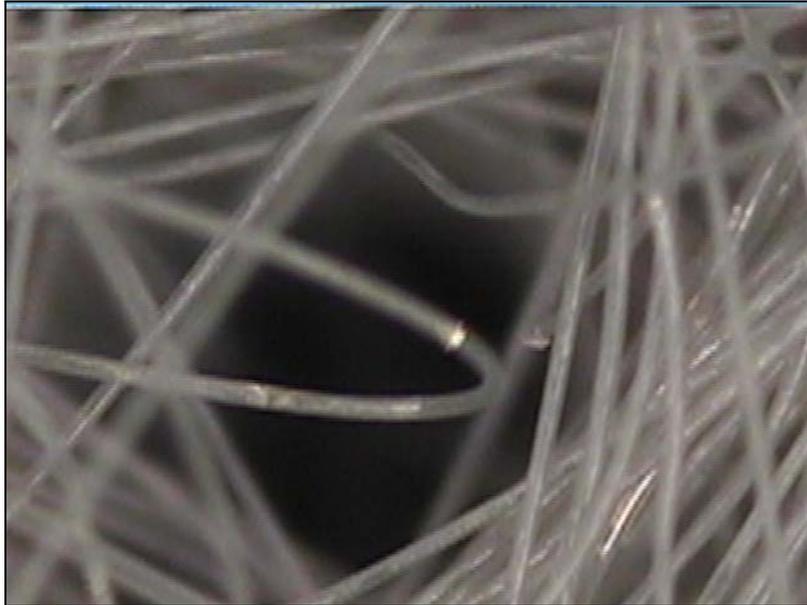


Figura 5.4. Furo de agulhagem geotêxtil G2.

#### 5.1.2. Ensaio de filtração à carga variável

O ensaio de filtração à carga variável foi realizado conforme descrito no item 4.4. A Figura 5.5 mostra as curvas de distribuição granulométrica das partículas de material que passaram através dos geotêxteis. Os resultados apresentam comportamento esperado com a curva de distribuição movendo-se para a esquerda com o aumento da espessura, sendo os geotêxteis oriundos da mesma linha de produção.

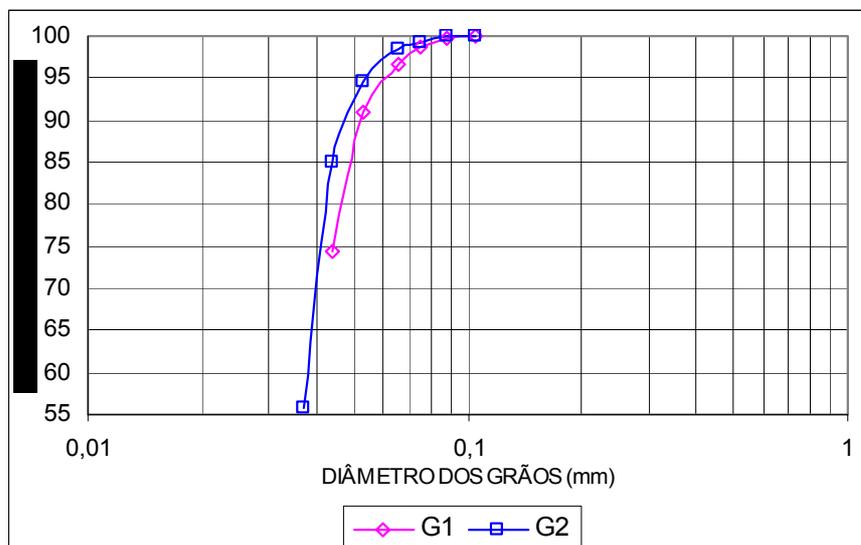
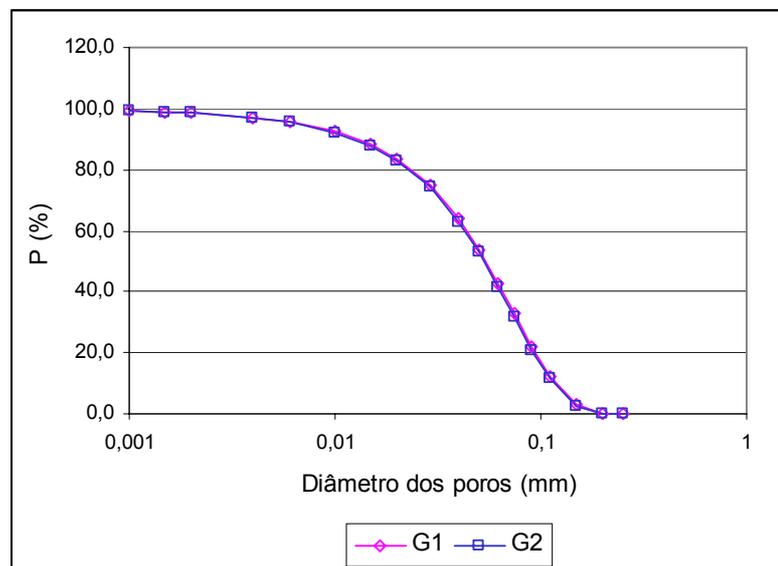


Figura 5.5. Curva de resultados do ensaio de filtração à carga variável.

A proximidade na parte superior da curva corrobora o observado nos ensaios de abertura de filtração característica. No caso do ensaio de filtração à carga variável, não havendo vibração, as partículas que não estiverem diante de um furo de agulhagem terão de atravessar a espessura do filtro e enfrentar os confrontos dos canais de fluxo da massa de geotêxtil.

Desta curva é escolhido um valor de nível de confiança de retenção ( $P'$ ) próximo do 100%, neste caso 99,83% para o geotêxtil G1 e 99,89% para o G2, para um diâmetro de partícula igual a 0,088 mm, para ambos os geotêxteis.

Utiliza-se o modelo teórico de Gourc (1982) para determinação da curva de distribuição de poros dos geotêxteis através das Equações 2.18, 2.19 e 2.20, tendo como parâmetros a porosidade e o diâmetro dos filamentos fornecidos pelo fabricante. As curvas para os geotêxteis G1 e G2 são apresentadas na Figura 5.6, onde pode-se observar a semelhança entre ambas.



**Figura 5.6. Curva de distribuição de poros obtida com proposta teórica de Gourc (1982).**

Da curva de distribuição de poros obtém-se a probabilidade de uma partícula encontrar em um confronto uma constrição que a detenha ( $P$ ). Assim, com o valor do diâmetro 0,088 mm encontra-se o valor de probabilidade igual a 0,23 e 0,22, para os produtos G1 e G2 respectivamente. Com estes dados, realiza-se uma retroanálise através da Equação 2.17 para

obtenção do número de confrontos. Os valores de número de confrontos calculados foram de 4,35 para o geotêxtil G1 e 4,64 para o geotêxtil G2.

## 5.2. Dimensionamento

### 5.2.1. Dimensionamento quanto aos Critérios de Retenção e Colmatação

O dimensionamento quanto aos critérios de retenção e de colmatação é realizado conforme critérios citados no item 2.4.

Para o Critério de retenção do CFGG (1986) devem ser estimados os valores dos coeficientes conforme as condições de contorno e aplicações previstas, assim temos:

$$C_1 = 1,00; C_2 = 0,80; C_3 = 0,80; C_4 = 1,00.$$

Utilizando a Equação 2.6, temos:

$$\text{Material A} \rightarrow O_{95} < 1,00 \times 0,80 \times 0,80 \times 1,00 \times 2,238 = 1,432 \text{ mm}$$

$$\text{Material B} \rightarrow O_{95} < 1,00 \times 0,80 \times 0,80 \times 1,00 \times 1,820 = 1,165 \text{ mm}$$

$$\text{Material C} \rightarrow O_{95} < 1,00 \times 0,80 \times 0,80 \times 1,00 \times 2,800 = 1,792 \text{ mm}$$

Quanto ao critério de colmatação do CFGG deve-se obedecer a Equação 2.8:

$$\text{Material A} \rightarrow O_{95} \geq 4 \times 0,322 = 1,288 \text{ mm}$$

$$\text{Material B} \rightarrow O_{95} \geq 4 \times 0,095 = 0,380 \text{ mm}$$

$$\text{Material C} \rightarrow O_{95} \geq 4 \times 0,125 = 0,500 \text{ mm}$$

O Critério de Lafleur (1999) avalia simultaneamente a retenção e a colmatação, devendo-se seguir as etapas indicadas no fluxograma apresentado na Figura 2.8. Assim, para cada material de base temos:

$$\text{Material A} \rightarrow d_{30} < O_{95} < 5 \times d_{30} \rightarrow 1,206 < O_{95} < 6,030 \text{ mm}$$

$$\text{Material B} \rightarrow d_{30} < O_{95} < 5 \times d_{30} \rightarrow 0,379 < O_{95} < 1,895 \text{ mm}$$

$$\text{Material C} \rightarrow O_{95} < d_{30} = 0,263 \text{ mm}$$

No Critério de retenção do FHWA (CHRISTOPHER e HOLTZ, 1985), tendo os quatro materiais menos de 50% passando na peneira 200 e sendo o filtro dimensionado para fluxo permanente, deve atender à relação:

$$AOS < B d_{85}$$

Por ser os coeficientes de uniformidade dos materiais analisados maiores que 8, utiliza-se o coeficiente B igual a 1:

$$\text{Material A} \rightarrow AOS < 1 \times 2,238 = 2,238 \text{ mm}$$

$$\text{Material B} \rightarrow AOS < 1 \times 1,820 = 1,820 \text{ mm}$$

$$\text{Material C} \rightarrow AOS < 1 \times 2,800 = 2,800 \text{ mm}$$

Quanto a colmatação o Critério FHWA recomenda que o geotêxtil apresente valor de porosidade superior a 30%, estando os produtos utilizados na campanha experimental aprovados e a realização do ensaio de Razão entre Gradientes para avaliação dos sistemas material de base geotêxtil para casos críticos, os quais serão apresentados nos próximos itens.

O critério de retenção de Giroud (1996) não foi considerado por ser utilizável apenas para solos internamente estáveis com condição de filtração não severa.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos quanto aos Critérios de Retenção e colmatação.

**Tabela 5.1. Resumo dos resultados dos Critérios de Retenção e Colmatação analisados.**

	<b>CFGG</b> mm	<b>Lafleur</b> mm	<b>FHWA</b> mm
<b>Material A</b>	$1,288 \leq O_{95} < 1,432$	$1,206 < O_{95} < 6,030$	$AOS < 2,238$
<b>Material B</b>	$0,380 \leq O_{95} < 1,165$	$0,379 < O_{95} < 1,895$	$AOS < 1,820$
<b>Material C</b>	$0,500 \leq O_{95} < 1,792$	$O_{95} < 0,263$	$AOS < 2,800$

Nota-se grande variação de resultados conforme o método de dimensionamento adotado, tendo casos, como por exemplo, o Material C que se aprovado por um método é reprovado por outro, sem poder satisfazer simultaneamente os critérios de Lafleur (1999) e CFGG (1986).

Atualmente o ensaio padronizado internacionalmente para determinação de abertura de filtração é o  $O_{90}$  obtido por peneiramento via úmida, no entanto os critérios mais aplicados para dimensionamento de filtros têxteis são baseados no valor de AOS e  $O_{95}$ . Porém, na falta de um critério que considere o valor de  $O_{90}$  muitos usam esse valor em substituição ao valor de  $O_{95}$ . Portanto realizou-se o dimensionamento com os dados de  $O_{95}$  e AOS fornecidos pelo fabricante (Tabela 4.2) e com o  $O_{90}$  determinado em laboratório substituindo o  $O_{95}$ , os resultados estão apresentados na Tabela 5.2 e Tabela 5.3, respectivamente, onde ‘A’ significa aprovado e ‘R’ reprovado.

**Tabela 5.2. Dimensionamento quanto à retenção e colmatação usando valores fornecidos pelo fabricante.**

	CFGG		Lafleur		FHWA	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2
<b>Material A</b>	R	R	R	R	A	A
<b>Material B</b>	R	R	R	R	A	A
<b>Material C</b>	R	R	A	A	A	A

**Tabela 5.3. Dimensionamento quanto à retenção e colmatação usando  $O_{90}$ .**

	CFGG		Lafleur	
	G1	G2	G1	G2
<b>Material A</b>	R	R	R	R
<b>Material B</b>	R	R	R	R
<b>Material C</b>	R	R	A	A

A Tabela 5.4 apresenta os valores de nível de confiança de retenção obtidos a partir do Critério Racional para os diâmetros indicativos propostos por Lafleur (1999) para cada curva granulométrica do material de base ( $d_{30}$ ) e o diâmetro em que se obtém 95% de confiança de retenção em cada material, calculados usando-se a Equação 2.17, as curvas de distribuição de poros de Gourc (Figura 5.6) e os números de confrontos para os geotêxteis apresentados no item 5.1.2. Também foram analisados os níveis de confiança de retenção em pontos escolhidos das curvas granulométricas a critério visual, considerando-se que retendo o diâmetro em questão, este reteria o restante dos grãos. Para cada solo foram escolhidos dois diâmetros, chamando-se diâmetro conservador aquele que teria grande possibilidade de reter as partículas de diâmetro inferior, situado na zona linear das partículas finas, e de diâmetro não conservador, aquele que aparentemente poderia reter as partículas mais finas.

**Tabela 5.4. Diâmetro com nível de confiança de retenção igual a 95% e nível de confiança de retenção para os diâmetros indicativos dos materiais de base.**

	Diâmetro em que P'=95%		P' para $d_1=d_{30}$		P' conservador*		P' não conservador*	
	G1	G2	G1 %	G2 %	G1 %	G2 %	G1 %	G2 %
<b>Material A</b>	$d_{18,1}$	$d_{18,8}$	100	100	99,96 ( $d_{25}$ )	99,98 ( $d_{25}$ )	100 ( $d_{30}$ )	100 ( $d_{30}$ )
<b>Material B</b>	$d_{36,2}$	$d_{37,7}$	83,77	86,51	52,11 ( $d_{20}$ )	55,55 ( $d_{20}$ )	99,96 ( $d_{58}$ )	99,98 ( $d_{58}$ )
<b>Material C</b>	$d_{42,0}$	$d_{43,2}$	67,14	70,65	42,41 ( $d_{18}$ )	45,55 ( $d_{18}$ )	100 ( $d_{56}$ )	100 ( $d_{56}$ )

\* Valores de nível de confiança referentes a diâmetros escolhidos visualmente nas curvas granulométricas.

### 5.2.2. Dimensionamento quanto ao Critério de Permeabilidade

Utilizando-se o Critério CFGG (1986) considerando a condição de gradientes elevados e obras de grande responsabilidade, temos:

$$\text{Material A} \rightarrow K_{GT} > 10^5 \times t_g \times 3 \times 10^{-2} = 3000 \times t_g \text{ cm / s}$$

$$\text{Material B} \rightarrow K_{GT} > 10^5 \times t_g \times 1 \times 10^{-3} = 100 \times t_g \text{ cm / s}$$

$$\text{Material C} \rightarrow K_{GT} > 10^5 \times t_g \times 5 \times 10^{-4} = 50 \times t_g \text{ cm / s}$$

Onde  $t_g$  é a espessura do geotêxtil em metros.

Para o Critério Lafleur (1999) os sistemas devem atender a condição da Equação 2.10:

$$\text{Material A} \rightarrow K_{GT} > 20 \times 3 \times 10^{-2} = 6 \times 10^{-1} \text{ cm / s}$$

$$\text{Material B} \rightarrow K_{GT} > 20 \times 1 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-2} \text{ cm / s}$$

$$\text{Material C} \rightarrow K_{GT} > 20 \times 5 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-2} \text{ cm / s}$$

O Critério adotado pela FHWA (CHRISTOPHER e HOLTZ, 1985) considera a Equação 2.11, assim utilizando o coeficiente C igual a 10 para aplicação de gradientes elevados e solos instáveis temos:

$$\text{Material A} \rightarrow K_{GT} > 10 \times 3 \times 10^{-2} = 3 \times 10^{-1} \text{ cm / s}$$

$$\text{Material B} \rightarrow K_{GT} > 10 \times 1 \times 10^{-3} = 1 \times 10^{-2} \text{ cm / s}$$

$$\text{Material C} \rightarrow K_{GT} > 10 \times 5 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3} \text{ cm / s}$$

A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos resultados de dimensionamento quanto ao Critério de Permeabilidade para o geotêxtil G1 e G2 utilizando-se os valores de espessura nominal e condutividade hidráulica apresentados anteriormente.

Para o dimensionamento foram consideradas as piores situações de aplicação existentes nos critérios, sendo o material de base A reprovado nos critérios do CFGG e de Lafleur e aprovado no critério da FHWA. O restante dos sistemas foram aprovados em todos os critérios.

**Tabela 5.5. Resumo dos resultados dos Critérios de Permeabilidade.**

	CFGG		Lafleur		FHWA	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2
Material A	R	R	R	R	A	A
Material B	A	A	A	A	A	A
Material C	A	A	A	A	A	A

### 5.3. Ensaio de Razão entre Gradientes

#### 5.3.1. Influência da aplicação do gradiente

Para análise da influência do modo de aplicação do gradiente hidráulico no ensaio foram realizados dois ensaios com o mesmo material de base e mesmo geotêxtil para comparação. Assim, foram utilizados corpos de prova de geotêxteis da amostra G1 e material de base A.

No ensaio E1 o gradiente inicial de ensaio foi de 5,9, sendo mantido durante todo o experimento. No ensaio M1 foi aplicado inicialmente um gradiente de 1,2, o qual foi mantido até estabilização do sistema em cerca de 72 horas, sendo elevado para 3,5 e mantido durante 30 minutos e então elevado para 5,7 e mantido até o tempo final de ensaio em 127 horas.

O gráfico apresentado na Figura 5.7 mostra nitidamente que no ensaio com gradiente imediato 5,9 a vazão caiu bruscamente nas primeiras 20 horas de ensaio tendo apresentado colmatação intensa que levou ao término do ensaio, enquanto no outro caso a vazão manteve-se bem mais elevada, com picos de aumento nos momentos em que a perda de partículas pelo geotêxtil foi percebida. No ensaio M1 coletou-se o material carreado, chegando a um valor de cerca de 100 g/m<sup>2</sup> durante todo o tempo de ensaio, enquanto no sistema do ensaio E1 a quantidade de partículas passantes foi praticamente nula.

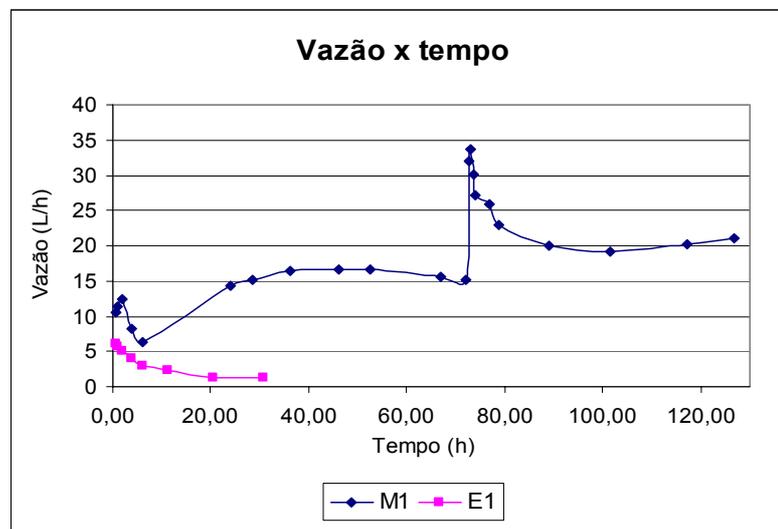


Figura 5.7. Vazão versus tempo para ensaios M1 e E1.

Observando o gráfico das condutividades hidráulicas apresentado na Figura 5.8 pode -se notar um início de acúmulo do material fino na interface nas primeiras horas de ensaio e após uma ligeira desobstrução com aumento da condutividade hidráulica na interface.

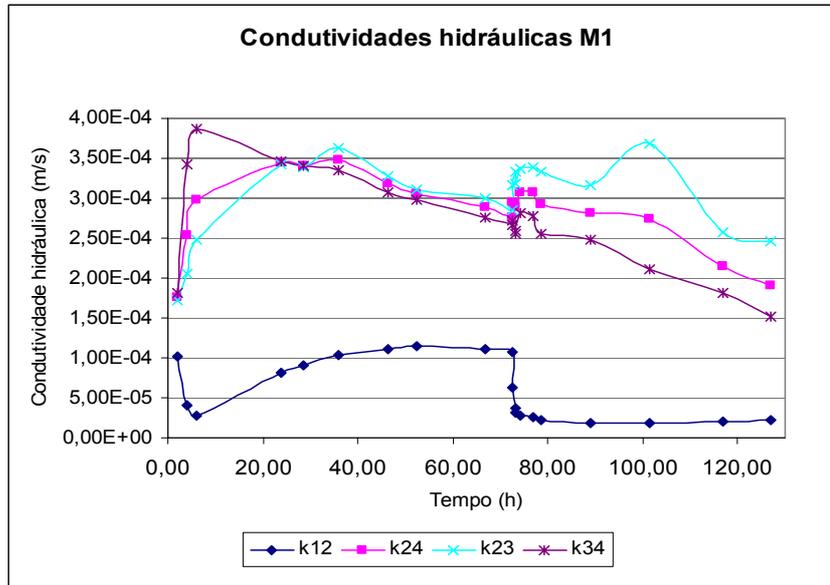


Figura 5.8. Condutividades hidráulicas em diferentes camadas do solo base.

Analisando os gráficos apresentados na Figura 5.9 pode-se constatar que os dois sistemas apresentaram leituras piezométricas finais com tendências semelhantes, no entanto o sistema em que aplicou-se o gradiente hidráulico gradativo demorou em torno de 127 horas para alcançar este comportamento.

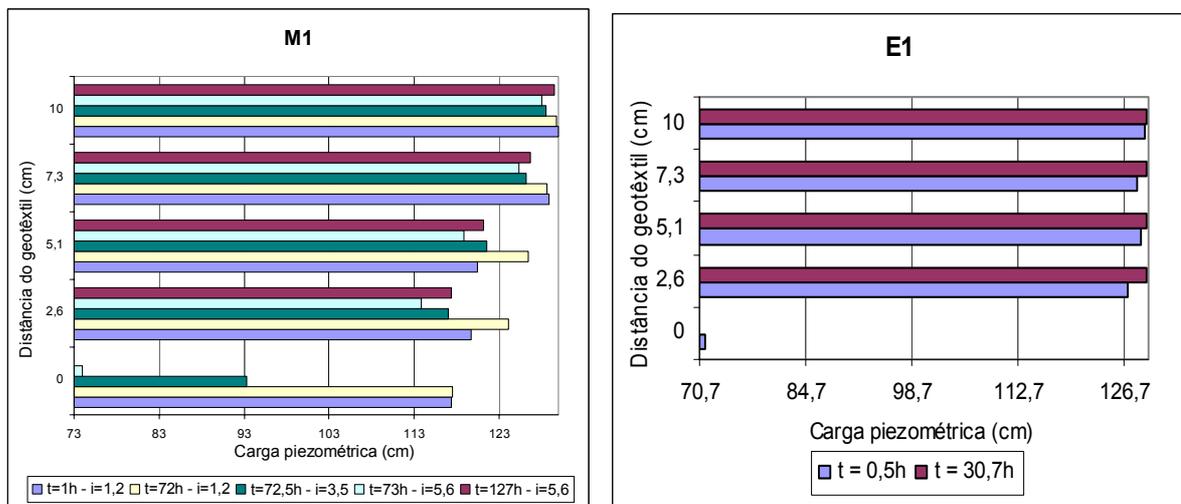


Figura 5.9. Gráficos representando as cargas piezométricas ao longo da altura do material de base a partir da superfície do geotêxtil nos ensaios M1 e E1.

A Razão entre Gradientes apresentou valores indicando colmatação para os dois ensaios, tendo valores máximos de GR para o ensaio M1 de 15, como indica o gráfico da Figura 5.10, e acima de 20.000 para o ensaio E1.

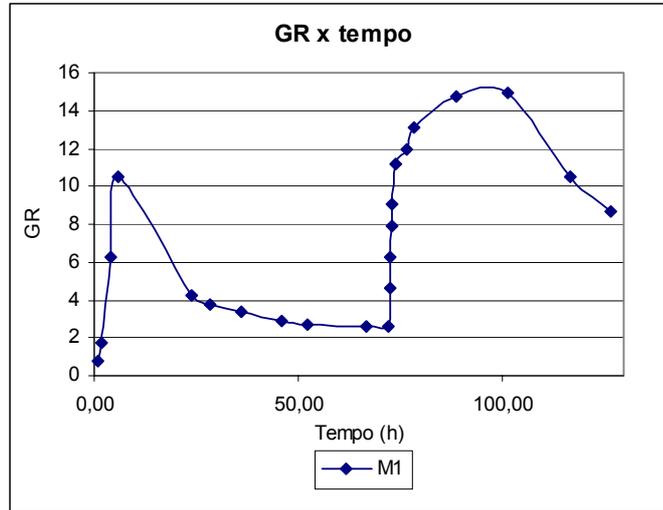


Figura 5.10. Oscilação da Razão entre Gradientes no tempo, ensaio M1.

Comparando o ensaio M2, com geotêxtil G2 e material de base C, o qual foi submetido a um gradiente hidráulico de início do ensaio igual a 8,7, com o ensaio E6, com os mesmos produtos mas gradiente igual a 5,8, nota-se o maior valor de GR no começo do ensaio para o conjunto em que o gradiente foi mais elevado, como pode-se observar na Figura 5.11.

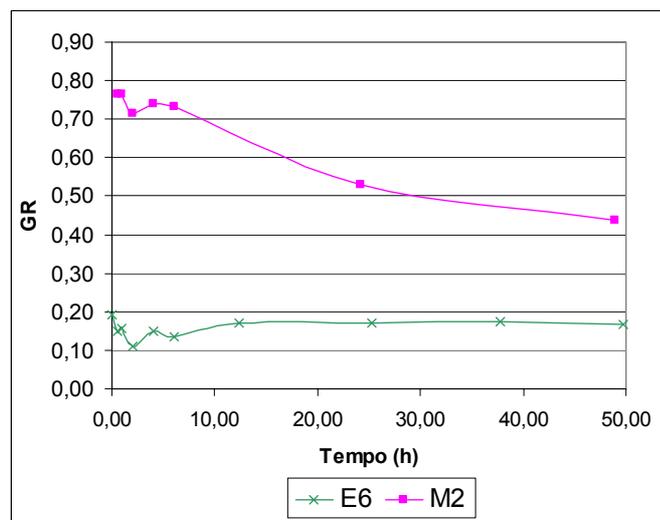


Figura 5.11. Razão entre Gradientes no tempo, ensaio M2 e E6.

Analisando os resultados de ensaios acima apresentados pode-se perceber uma tendência maior à colmatção dos sistemas solo/geotêxtil em virtude do gradiente hidráulico inicial de ensaio. Assim, o ensaio com alto valor de gradiente hidráulico aplicado de imediato no início do fluxo apresentou resultados mais crítico.

### 5.3.2. Influência do material de base

Nos gráficos apresentados nas Figura 5.12 e Figura 5.13 pode-se analisar a tendência da vazão dos sistemas durante o tempo de ensaio. Observa-se que os ensaios realizados com o material de base A (E1 e E4) apresentam constante queda de vazão para ambos geotêxteis em virtude da colmatção dos sistemas.

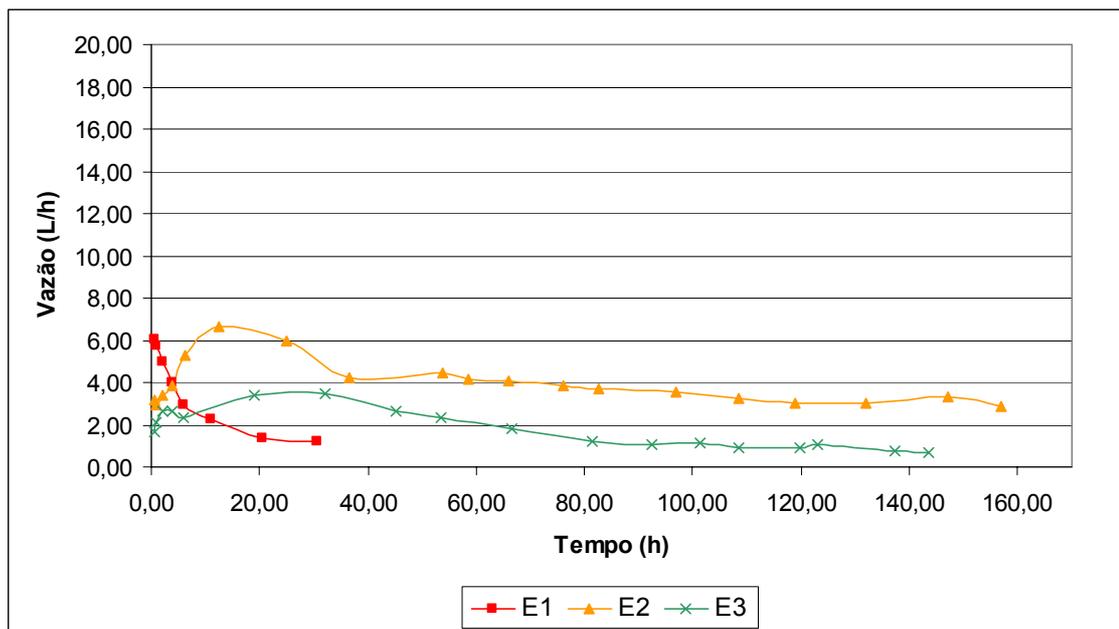


Figura 5.12. Dados de vazão versus tempo para ensaios com geotêxtil G1.

Já os sistemas com os materiais B e C apresentaram uma ascensão de vazão nas primeiras horas de ensaio e uma posterior queda suave até tender à estabilização. Esta ascensão da vazão pode ser devido à lenta saída de bolhas de ar retidas no solo, como demonstraram os ensaios realizados por Fischer et al. (1999) (Figura 4.11). Nos ensaios E1 e E4 (material A),

tendo o material de base maior valor de permeabilidade e vazios maiores entre seus grãos, a saída do ar retido pode ter ocorrido de forma mais fácil e rápida.

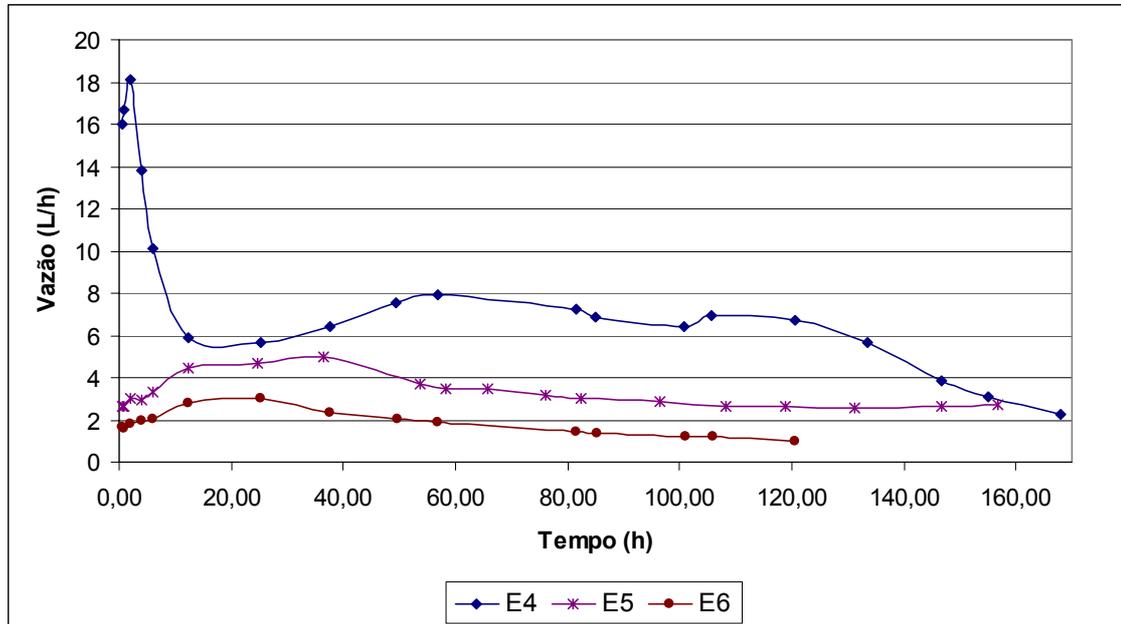
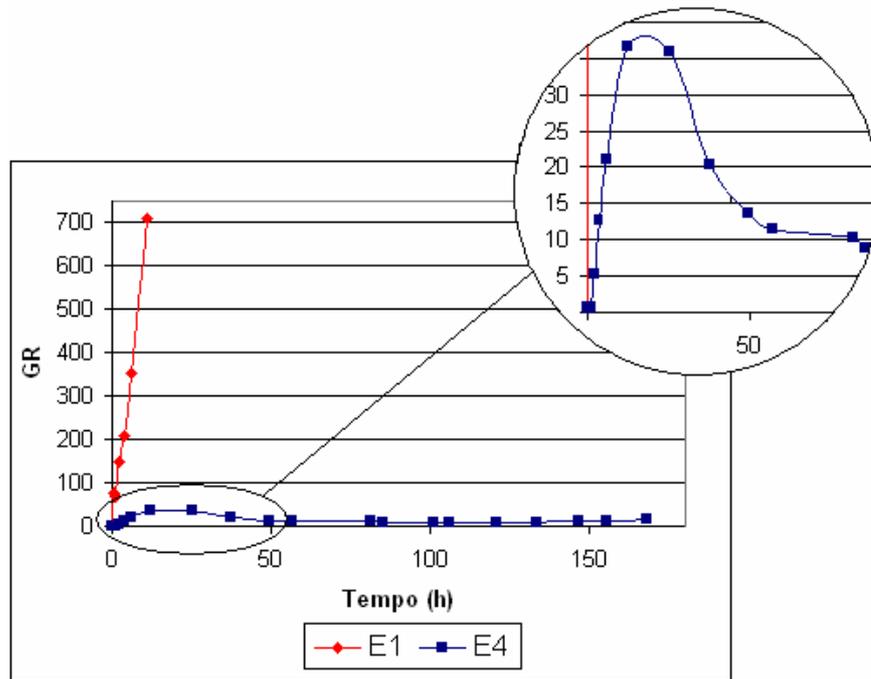


Figura 5.13. Dados de vazão versus tempo para geotêxtil G2.

Os ensaios realizados com material de base C apresentam uma pequena redução progressiva da vazão na fase final do ensaio de filtração possivelmente devido à retenção de ar presente na água na interface superior do material de base, visto que a água utilizada é destilada, mas não deaerada e é possível ocorrer aumento da quantidade de bolhas de ar retidas na água em circulação ao longo do tempo de reutilização.

Os resultados de Razão entre Gradientes com material de base A, apresentados na Figura 5.14, apresentaram grandes valores de GR, estando estes muito acima do valor 3, limite máximo aceito. O ensaio realizado com geotêxtil G1 apresentou valores de GR mais elevados que o realizado com o G2, coincidindo com alguns resultados obtidos por Lafleur (1999), onde os geotêxteis com menor espessura apresentaram pior resultado quanto à colmatação, quando submetidos a gradientes elevados, comparados com produtos de mesma abertura de filtração, mas espessura maior.



**Figura 5.14. Razão entre gradientes versus tempo com material de base A.**

Este fato pode ser decorrente da maior flexibilidade do geotêxtil pouco espesso, o qual é susceptível à formação de depressões entre os espaços vazios da malha de sustentação quando aplicado gradiente elevado. Estas depressões podem criar áreas sem contato na interface entre o solo e o geotêxtil fazendo com que ocorra o fenômeno de filtração em suspensão das partículas finas do material de base.

Outro ponto importante ressaltar é que este comportamento ocorreu apenas com o material de base A, o qual possui estrutura granular mais aberta apresentando maior permeabilidade e velocidade de percolação que os demais materiais utilizados na pesquisa.

Os valores de GR obtidos nos ensaios E2, E5 e E6, apresentados nas Figura 5.15 e Figura 5.16, indicam a ocorrência de “piping” segundo valores estabelecidos pela ASTM D-5101 (2001) e Lafleur et al. (2002). No entanto, a perda de particulado fino no decorrer do ensaio foi imperceptível e os valores de GR começaram baixos e se mantiveram, sem apresentar queda representativa entre os primeiros valores e os últimos durante o decorrer do ensaio.

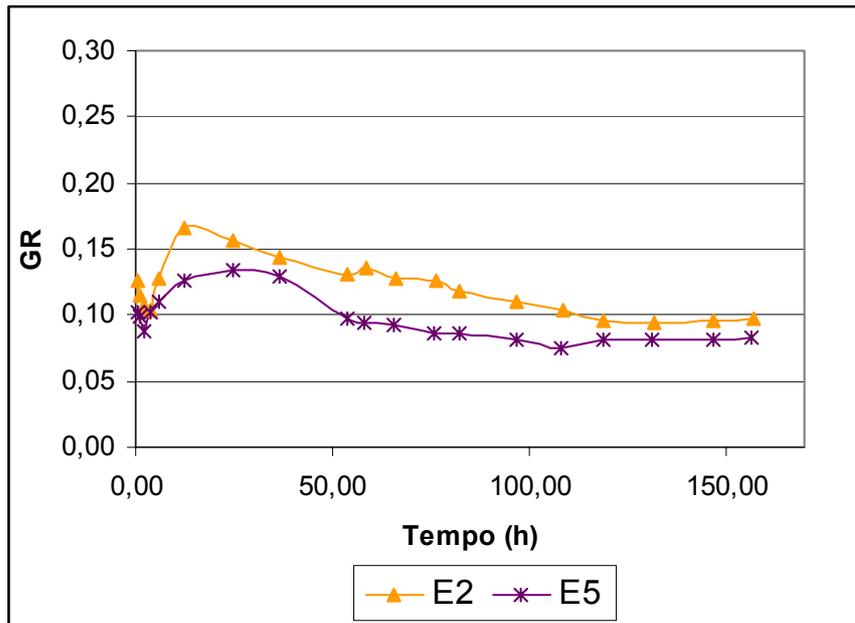


Figura 5.15. Razão entre Gradientes versus tempo com material de base B.

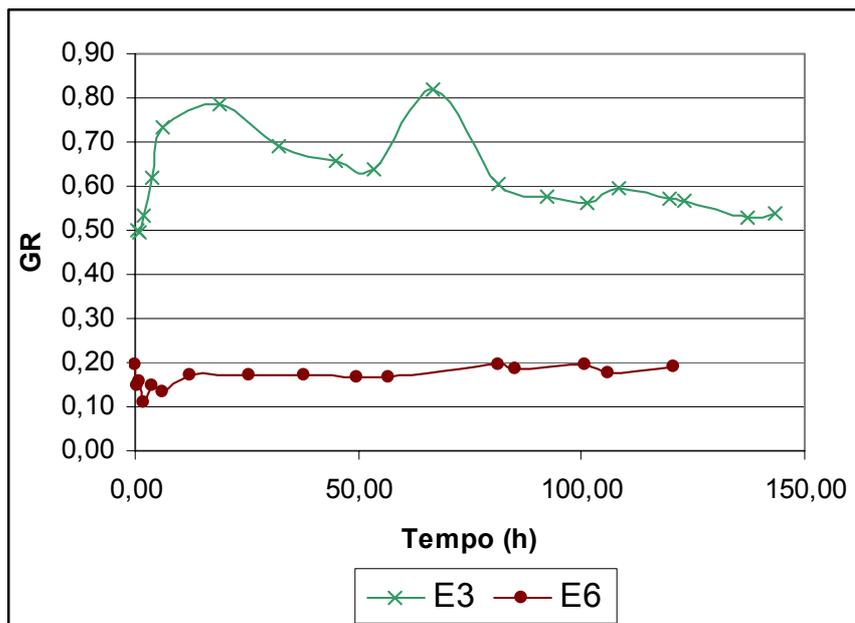


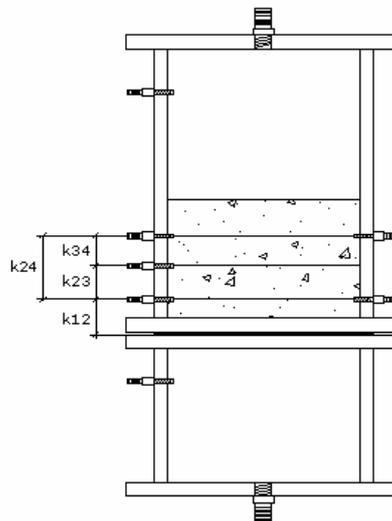
Figura 5.16. Razão entre Gradientes versus tempo com material de base C.

Todos os sistemas ensaiados, inclusive com o material de base A, apresentaram os primeiros resultados de GR abaixo de 1. O que pode significar a influência de algum outro fator no procedimento de ensaio, como a colocação do material no permeâmetro, pois o material seco ao ser colocado sobre o geotêxtil úmido forma grumos ou arcos devido à ascensão de água por capilaridade na primeira camada de material de base colocada. Em

ensaios GR realizados por Araújo (2005), os valores de GR encontrados no início do ensaio foram superiores a 1, sendo o material de base colocado no equipamento de ensaio na forma de lama.

O sistema E3 apresentou valores de GR entre 0,5 e 1, podendo ser considerado com desempenho de filtração adequado. O sistema sofreu variações, mas em torno de 80 horas de ensaio estabilizou, ocorrendo até o final do ensaio apenas pequenas oscilações.

A Figura 5.17 indica as diferentes camadas em que são avaliadas as condutividades hidráulicas parciais nos gráficos das Figura 5.18 até Figura 5.23.



**Figura 5.17. Indicação das camadas de material de base consideradas para cálculo das condutividades hidráulicas parciais.**

Claramente pode-se perceber a diminuição da condutividade hidráulica na zona de interface solo/filtro nos ensaios E1 e E4 (Figura 5.18 e Figura 5.21), o que mais uma vez confirma a colmatação dos sistemas observada nos gráficos de GR e vazão.

Os ensaios E2, E3, E5 e E6 apresentaram valores de condutividade hidráulica maiores na zona de interface.

Os ensaios E2, E5 e E6 apontaram uma grande diferença na ordem de valores da condutividade hidráulica na interface em relação às demais, com um intervalo de variação pequeno para k23, k34 e k24 ao longo do tempo de ensaio.

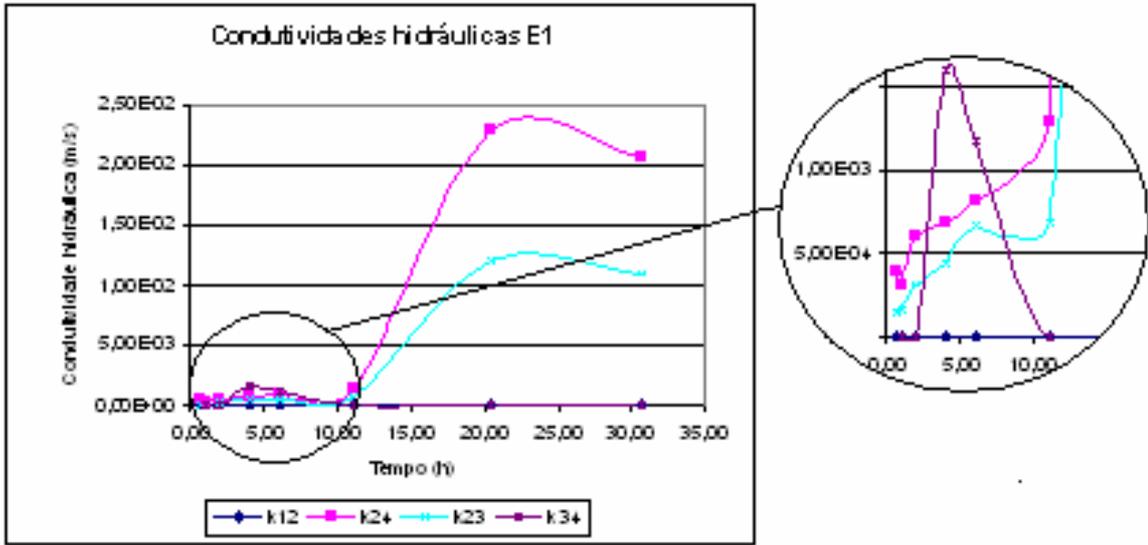


Figura 5.18. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E1.

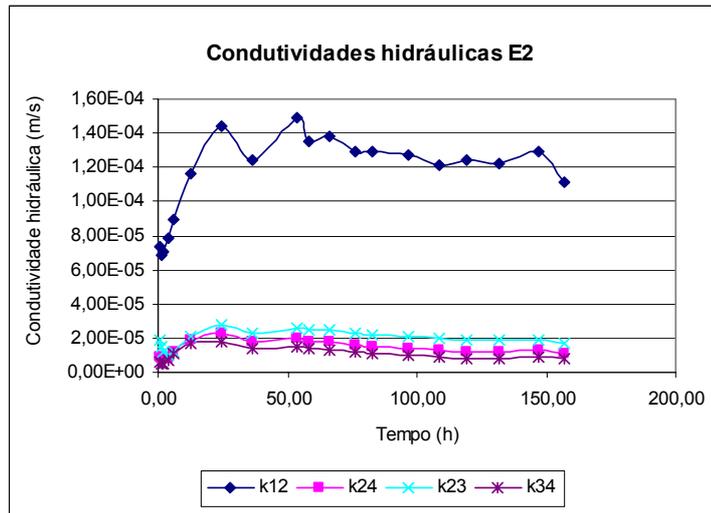


Figura 5.19. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E2.

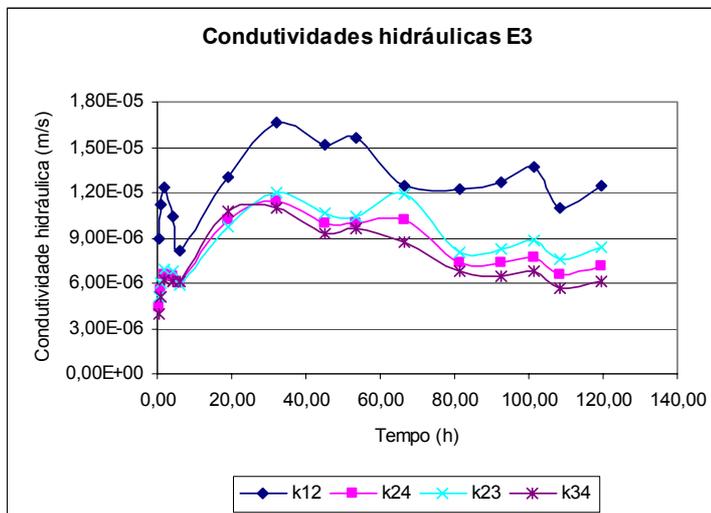


Figura 5.20. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E3.

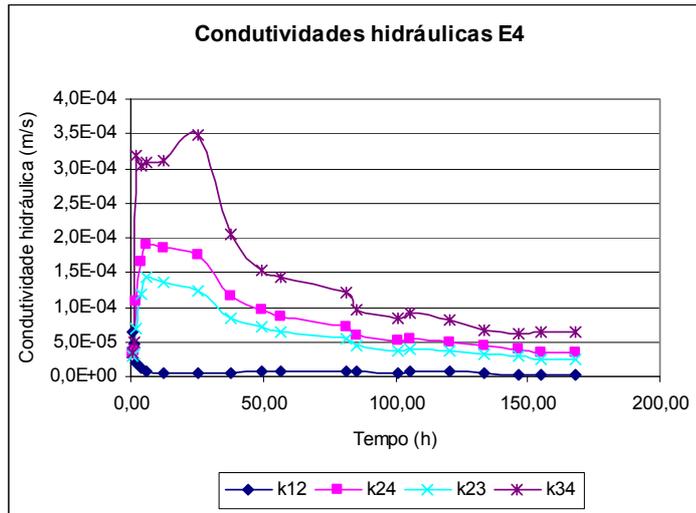


Figura 5.21. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E4.

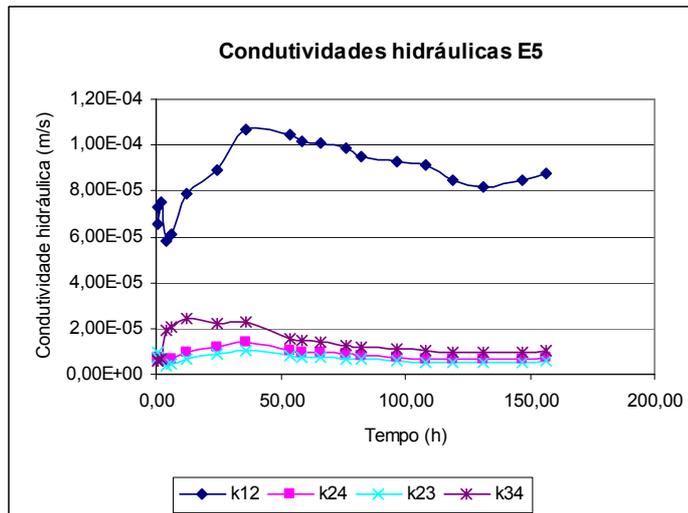


Figura 5.22. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E5.

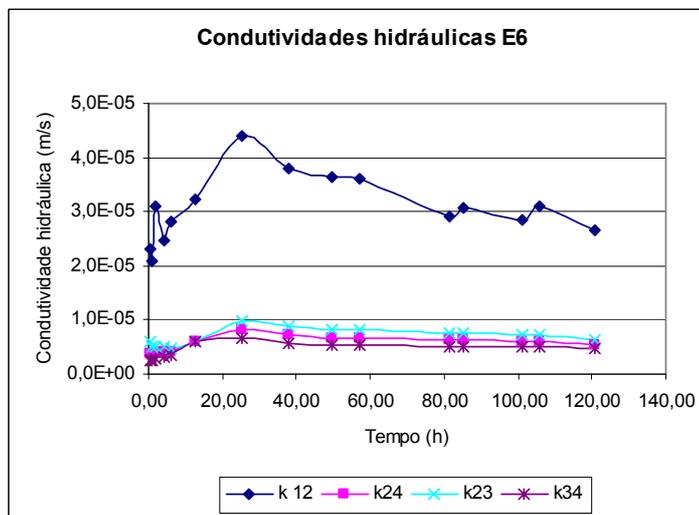


Figura 5.23. Condutividade hidráulica versus tempo ensaio E6.

As Figura 5.24 e Figura 5.25 apresentam as curvas granulométricas do material de base após os ensaios E3 e E4 dividido em duas camadas, retiradas cuidadosamente com auxílio de uma colher adaptada. A camada inferior compreende desde o material próximo à interface do geotêxtil (evitando raspar o corpo de prova em geotêxtil) até cerca de 4 centímetros acima deste e a camada superior compreende o material acima da camada inferior.

Através das curvas percebe-se no ensaio E4 a migração de partículas para a parte inferior do solo de base estando a curva do solo inicial na região entre as curvas da camada superior e inferior. No ensaio E3 não houve variação entre a camada superior e inferior, mostrando que praticamente não houve migração de partículas durante o ensaio; a pequena variação observada entre o material após ensaio de filtração e a curva inicial provavelmente se deve ao fato da amostra de pó de brita original não ter sido corretamente homogeneizada por se tratar de um grande volume.

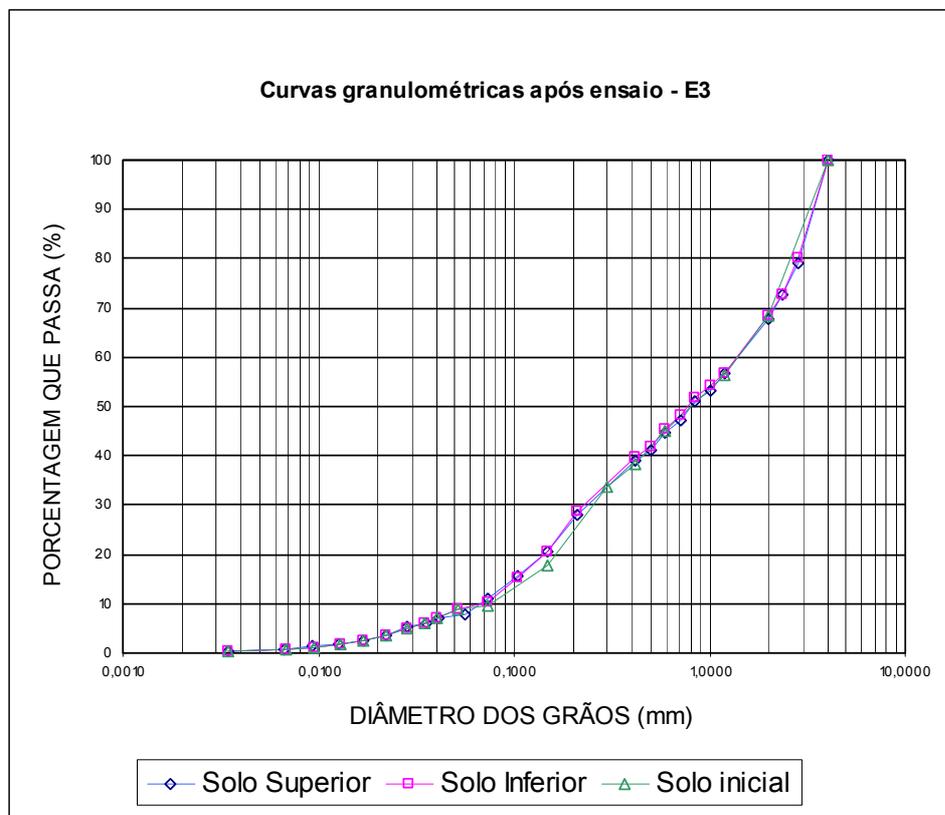
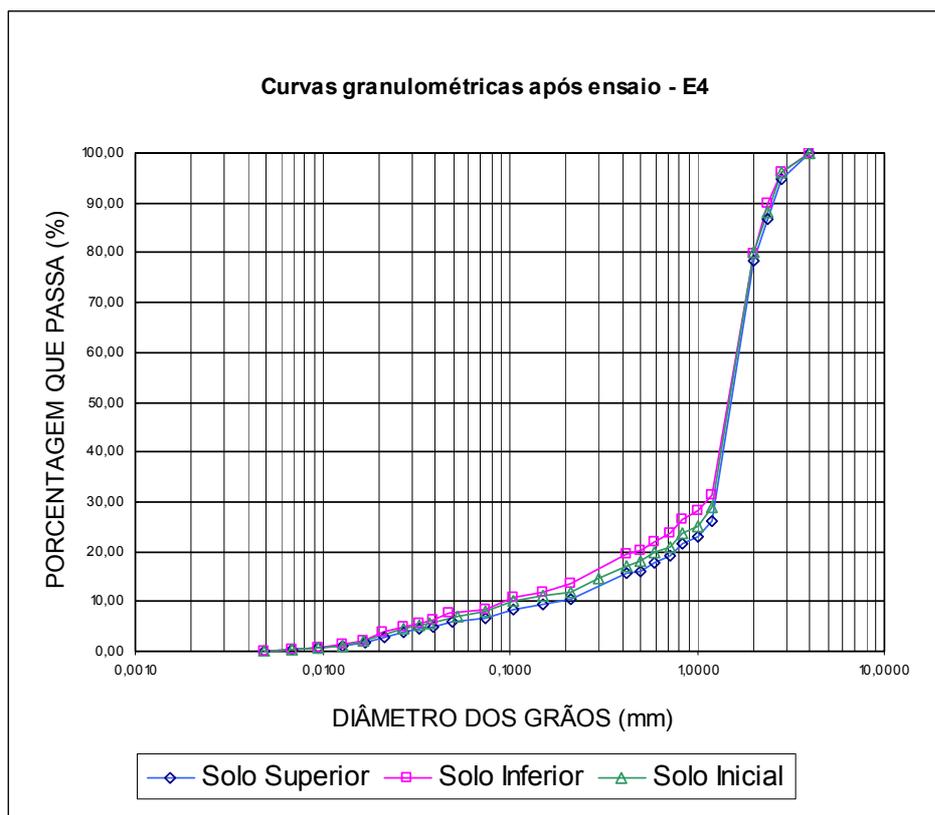


Figura 5.24. Curvas granulométricas inicial e de duas camadas do material de base após ensaio E3.

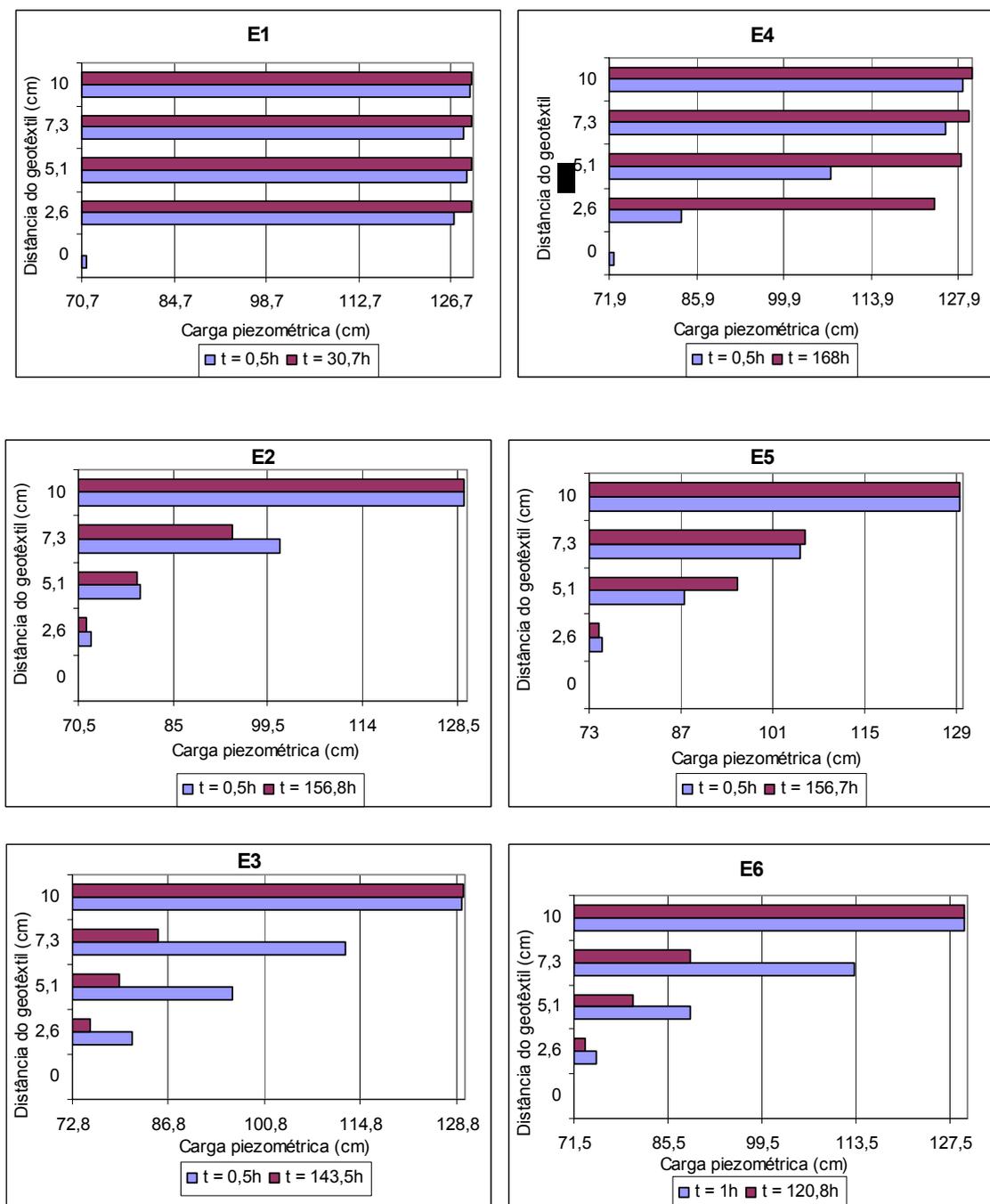


**Figura 5.25. Curvas granulométricas inicial e de duas camadas do material de base após ensaio E4.**

A Figura 5.26 apresenta os gráficos das cargas piezométricas em quatro diferentes alturas do material de base em relação à superfície do geotêxtil nas primeiras horas de ensaio e no final, quando o sistema alcançou estabilização.

No ensaio E1 percebe-se que em 30 minutos de fluxo as cargas hidráulicas possuíam aproximadamente os mesmos valores obtidos no final do ensaio, estando praticamente toda a perda de carga do sistema na interface do material de base com o geotêxtil. No ensaio E4, com mesmo material de base e geotêxtil mais espesso, após 168 horas de ensaio a carga hidráulica ainda não havia atingido o valor observado no início do ensaio E1.

Os ensaios E2 e E5 apresentaram pouca variação da carga piezométrica no tempo, enquanto os ensaios E3 e E6 apresentaram redução da carga piezométrica na camada superior do solo corroborando o observado na discussão sobre a variação da vazão no tempo.



**Figura 5.26.** Gráficos das cargas piezométricas ao longo do material de base a partir da superfície do geotêxtil no início e fim de ensaio.

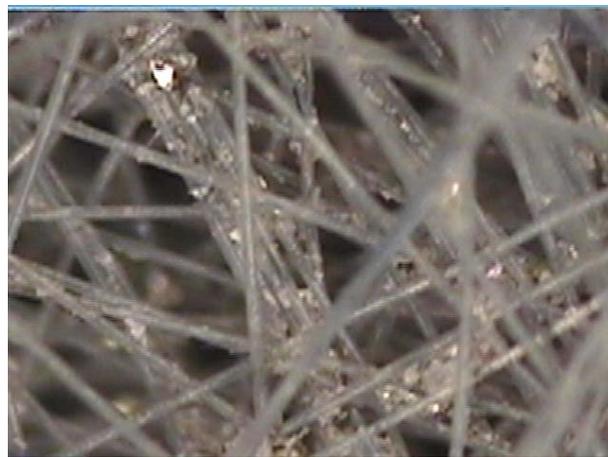
As Figura 5.27 a Figura 5.31 apresentam imagem da superfície inferior dos geotêxteis após realização dos ensaios.

O geotêxtil oriundo do ensaio E4 apresentou menos presença de partículas acumuladas na parte inferior do geotêxtil, sendo este um ensaio em que houve colmatção do sistema acredita-se que, provavelmente, tenha ocorrido cegamento do sistema com a formação de

“cake” na superfície do geotêxtil e apenas poucas partículas tenham penetrado na estrutura da manta, não conseguindo atravessar toda sua espessura.



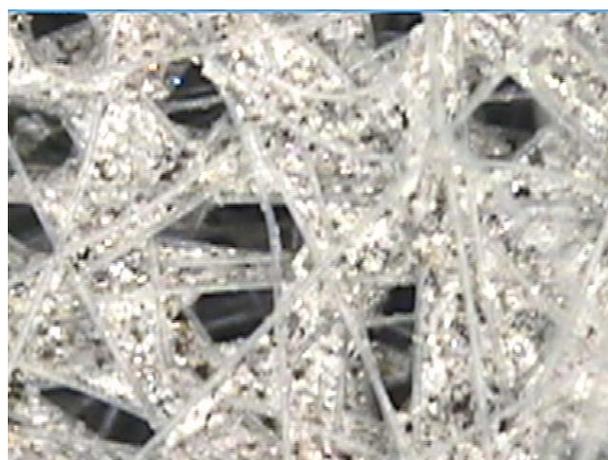
**Figura 5.27.** Imagem parte inferior do geotêxtil G1 após ensaio E1.



**Figura 5.28.** Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E4.



**Figura 5.29.** Imagem parte inferior do geotêxtil G1 após ensaio E2.



**Figura 5.30.** Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E5.



**Figura 5.31.** Imagem parte inferior do geotêxtil G2 após ensaio E6.

No ensaio E1 percebe-se a presença de partículas na parte inferior em mais quantidade, pois embora este ensaio também tenha ocorrido colmatação e material de base seja o mesmo, o geotêxtil utilizado possui espessura menor.

#### **5.4. Comentários**

Comparando os dados obtidos em ensaio com as previsões dos critérios de dimensionamento podemos concluir que os resultados de dimensionamento obtidos para os critérios do CFGG e de Lafleur apresentaram conservadorismo quanto a colmatação para os materiais B e C, mas com avaliação adequada quanto ao material A.

Quanto à utilização da abertura de filtração  $O_{90}$  ou  $O_{95}$ , apesar da grande diferença entre seus valores, não houve diferença entre os resultados obtidos para o dimensionamento pelos critérios de retenção e colmatação, para os solos analisados.

O Critério da FHWA aparentou ser não conservador aprovando inicialmente todos os sistemas quanto à permeabilidade, retenção e colmatação. No entanto este critério recomenda para casos críticos a realização do ensaio GR não aceitando conjuntos em que a razão de ensaio ultrapasse o valor 3. Portanto os sistemas ensaiados com material A estariam reprovados. Vale ressaltar que o ensaio GR é bastante complexo e demorado, sendo difícil realizar experimentos para cada dimensionamento necessário, o que inviabiliza, muitas vezes, a prática deste método.

A avaliação pelo Critério Racional é bastante afetada pela escolha do diâmetro de partícula analisado, pois adotando uma postura não conservadora consegue-se um nível de confiança de retenção de 100%. Avaliando os diâmetros indicativos propostos por Lafleur (1999) os materiais B e C não apresentaram valor de confiança de retenção que garanta a retenção das partículas, no entanto não houve perdas de material durante a realização dos ensaios.

Os critérios de permeabilidade do CFGG e de Lafleur reprovaram os sistemas com material de base A, o que está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios, pois estes demonstraram queda na vazão ao longo do tempo e baixa condutividade hidráulica na interface solo/filtro.

As imagens apresentadas na Figura 5.32 mostram a superfície superior do geotêxtil após realização dos ensaios, apontando partículas grandes no meio dos filamentos da manta, o que indica que as partículas podem percorrer caminhos não obrigatoriamente próximos da vertical na tentativa de transpor a espessura do filtro.



**Figura 5.32. Imagens da superfície de interface do geotêxtil com o solo após ensaio.**

## 6. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 6.1. Conclusões e comentários finais

Este trabalho visa o entendimento do comportamento de geotêxteis quando utilizados para filtração de solos considerados internamente instáveis, sendo os comentários e conclusões mais relevantes obtidos com o estudo resumidos em:

- Os métodos de avaliação da estabilidade interna dos solos são ferramentas importantes para uma previsão rápida do comportamento dos solos. A proposta de Kenney e Lau (1985), embora desenvolvida para filtros granulares, é citada na literatura como apresentando resultados satisfatórios para os meios granulares.
  - O material de base desta pesquisa com curva granulométrica mais côncava (material A) pela análise das curvas de Lafleur et al. (1989) e instável pela proposta de Kenney e Lau (1985), realmente mostrou-se instável durante os ensaios de filtração em todas as condições analisadas. Avaliando-se pela proposta de Chen et al. (1981) o material é considerado estável, demonstrando pouca precisão desta proposta em comparação às outras utilizadas; cabe lembrar que considera apenas quatro diâmetros do solo em sua análise.
  - O material de base B, considerado internamente instável pelas duas propostas, mas apresentando curva granulométrica menos côncava que o solo A, demonstrou comportamento estável durante os ensaios de filtração.
  - O material de base C, considerado estável pelas duas propostas e apresentando uma curva granulométrica côncava, realmente assim se apresentou durante os ensaios.
- As três formas de avaliação da estabilidade interna encontradas na literatura levam em consideração apenas a curva granulométrica dos solos. A instabilidade, sendo um fenômeno associado ao carreamento de partículas deveria também considerar a força de

percolação, a forma e textura dos grãos e a possibilidade de vibração por forças dinâmicas.

- Evidência da importância da realização do ensaio de filtração de longa duração para compreender o comportamento do sistema. Os ensaios demonstraram a necessidade da verificação do critério de colmatação, visto que frequentemente as preocupações são voltadas apenas à retenção.
- Constatação da influência do modo de aplicação do gradiente hidráulico no ensaio de GR no comportamento do sistema com solos com risco de sufusão, sendo observada rápida colmatação de solos submetidos a gradientes elevados imediatos com queda brusca da vazão nas primeiras 20 horas de ensaio. Filtração mais estável ocorreu em ensaio em que a aplicação da carga hidráulica se realizou de forma gradativa, acontecendo perdas de algumas partículas da interface com aumento da vazão durante o tempo de ensaio.
- Para ensaios com material de base A e aplicação de gradiente hidráulico 5, notou-se a colmatação mais rápida com geotêxtil menos espesso, apresentando valores de GR muito elevados. Estes dados confirmam alguns resultados obtidos por Lafleur (1999), onde os geotêxteis com menor espessura apresentaram pior resultado quanto à colmatação, quando submetidos a gradientes elevados, comparados com produtos de mesma abertura de filtração, mas espessura maior. Este fato pode ser decorrente da grande deformabilidade do geotêxtil pouco espesso, o qual é susceptível à formação de depressões entre os espaços vazios da malha de sustentação quando aplicado gradiente elevado. Estas depressões podem criar áreas sem contato na interface entre o solo e o geotêxtil fazendo com que ocorra o fenômeno de filtração em suspensão das partículas finas do material de base. Outro ponto importante a ressaltar é que este comportamento ocorreu apenas com o material de base A, o qual possui estrutura granular mais aberta

apresentando maior permeabilidade e velocidade de percolação que os demais materiais utilizados na pesquisa.

- O material de base C, considerado estável pelas classificações adotadas apresentou valores de GR indicativos de bom desempenho à filtração quando utilizado geotêxtil G1. No entanto, no ensaio realizado com geotêxtil G2 os resultados de GR indicaram a ocorrência de “piping” segundo Lafleur et al. (2002), mas não houve perda de partículas do solo e nem redução significativa do GR durante a realização do ensaio. Mesmo comportamento aconteceu com o material de base B em ensaios realizados com ambos os geotêxteis, com GR variando em torno de 0,10 durante o tempo de duração do experimento.
- Em todos os ensaios realizados os GRs iniciais foram menores que 1, inclusive com o material de base A, o que pode indicar a influência de algum outro fator no procedimento de ensaio, como a colocação do material no permeâmetro.
- Os valores das condutividades hidráulicas parciais apresentados para os sistemas solo/geotêxtil ensaiados estão de acordo com o esperado, apresentando diminuição da condutividade na zona de interface nos sistemas que indicaram colmatção e maior condutividade hidráulica na interface nos ensaios em que os valores de GR foram inferiores a um.
- As vazões nos ensaios E1 e E4 apresentaram diminuição contínua de valores devido à migração de partículas finas, enquanto os ensaios realizados com os materiais de base B e C apresentaram uma ascensão de vazão nas primeiras horas de ensaio e uma posterior queda suave até tender à estabilização. Provavelmente esta ascensão da vazão é função da lenta expurgação de bolhas de ar retidas nos vazios do solo, já nos ensaios com material de base A, os quais possuem estrutura mais aberta e maior valor de permeabilidade, a saída do ar pode ocorrer mais rapidamente.

- Avaliando as previsões dos critérios de dimensionamento podemos concluir que os resultados de dimensionamento obtidos para os critérios do CFGG e de Lafleur apresentaram conservadorismo quanto à colmatação para os materiais B e C, mas com avaliação adequada quanto ao material A. O Critério da FHWA recomenda para casos críticos a realização do ensaio GR, o qual é complexo e demorado, sendo difícil realizar experimentos para cada dimensionamento necessário, o que restringe a prática deste método à obras de maior responsabilidade. Quanto à utilização do Critério Racional, vale salientar a importância da escolha do diâmetro de partícula a ser retido, pois nos solos internamente instáveis o diâmetro que asseguraria a retenção das demais partículas do solo é muitas vezes de difícil definição.
- A avaliação das curvas granulométricas após realização dos ensaios de filtração comprovou os resultados obtidos durante ensaios, apresentado o material de base A migração de partículas para a parte inferior do solo e o material C mantendo-se praticamente igual em ambas camadas.

## **6.2. Sugestões para pesquisas futuras**

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa e dificuldades encontradas, são apresentadas as seguintes sugestões de pesquisas futuras:

- Realização de ensaios GR com solos instáveis com diferentes níveis de gradientes, com patamares de mudança de aplicação do gradiente final mais reduzidos. Examinando a influência de baixos gradientes no aumento de perda de partículas.
- Análise da filtração dos solos internamente instáveis em diferentes direções e sentidos, principalmente filtração horizontal.

- Avaliação do uso de geotêxteis tecidos com grande porcentagem de área aberta como filtro de solos com tendência à sufusão, permitindo a passagem dos finos através da manta.
- Análise do comportamento à filtração de solos coesivos com curva granulométrica côncava.
- Exumação de amostras de filtros sintéticos e solo adjacente em obras geotécnicas para retroanálise do comportamento dos solos internamente instáveis em condições de campo.
- Avaliação detalhada da importância da espessura e flexibilidade dos geotêxteis no processo de colmatação dos sistemas filtrantes em solos com tendência à sufusão.
- Desenvolvimento de um critério de dimensionamento para solos com condições de instabilidade utilizando a abertura de filtração  $O_{90}$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Aplicações em filtração. In: VERTEMATTI, J. C. (Org). **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher. 2004. cap. 5, p. 175-198.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D-4751**: standard test method for determining apparent opening size of a geotextile. Philadelphia, 2003.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D-5493**: standard test method for permittivity of geotextiles under load. Philadelphia, 1993.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D-4716**: standard test for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of a geosynthetic using a constant head. Philadelphia, 2004.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D-5101**: standard test method for measuring the soil-geotextile system clogging potential by the Gradient Ratio. Philadelphia, 2001.

ARAÚJO, G. S. 2005. **Estudo experimental do comportamento dreno – filtrante de interfaces de rejeitos finos – geotêxteis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BHATIA, S. K.; HUANG, Q. Geotextile filters for internally stable unstable soils. **Geosynthetics International**, v. 2, n. 3, p. 537-565. 1995

COMITE FRANÇAIS DES GEOTEXTILES ET GEOMEMBRANES. **Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration**. Boulogne Billancourt, 1986.

CHEN , Y. H.; SIMONS, D. B.; DEMERY, P. M. **Hydraulic testing of plastic filter fabrics**. Virginia: ASCE. 1981. v.107. (n° IR3)

CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D.. **Geotextile engineering manual**. [s.l.]: U.S. Federal Highway Administration. 1985. 1044 p. (Report n° FHWA-TS-86/203)

CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D.; FISCHER, G. R.. Research needs in geotextile filter design. In: BRAUNS, J.; HEIBAUM, M.; SCHULER, U. (Eds). **Filters in geotechnical and**

**hydraulic engineering.** Rotterdam: Balkema. 1993. p. 19-26. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe)

FANNIN, R. J.; SHI, Y. C.; VAID, Y. P. Permeability requirements for geotextile filter-design . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998, Atlanta. **Proceedings...** [S.l.]: IGS, 1998. v. 2, p. 1001-1004.

FAURE, Y.H. et al. Geotextile filter behaviour with critical filtration conditions. In: BRAUNS, J.; HEIBAUM, M.; SCHULER, U. (Eds). **Filters in geotechnical and hydraulic engineering.** Rotterdam: Balkema. 1993. p. 209-2162. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe)

FISCHER, G. R.; MARÉ, A. D.; HOLTZ, R. D. Influence of procedural variables on the gradient ratio test. **Geotechnical Testing Journal**, v. 22, p. 22-31, 1999.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos: fosfogesso e lama vermelha.** 122 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GARDONI, M. G. A. **Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão.** 313 f. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GIROUD, J. P. 1996. Granular filters and geotextile filters. In: GEOFILTERS, 1996, Montréal. **Proceedings...** Montréal: [s.n.], 1996. p. 565 - 680.

GIROUD, J. P.; DELMAS, P.; ARTIÈRES, O. Theoretical basis for development of a two-layer geotextile filter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., Montreal, 1998.. **Proceedings...** Montreal: IGS, 1998. p.1037-1044

GOURC, J. P. **Quelques aspects du comportement des geotextiles en mécanique des sols.** 1982. Thèse (Docteur) - Université Scientifique et Médicale, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11058:** geotextiles and geotextile-related products: determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load. Genève, 1999. 18p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12956:** geotextiles and geotextile-related products : determination of the characteristic opening size. Genève, 1999. 13p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12958:** geotextiles and geotextile-related products: determination of water flow capacity in their plane. Genève, 1999. 14p.

JOHN, N.W. **Geotextiles**. Glasgow: Black and Son, 1987. 347 p.

KENNEY, T. C.; LAU, D. Internal stability of granular filters. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 22, p. 215-225, 1985.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1999. 761p.

LACERDA, W. A. Comportamento geotécnico de massas coluviais. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 3., 2002, Joinville. **Anais ...** Joinville: ABMS, 2002. p. 219-231.

LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. Filtration of broadly graded cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 115, n. 12, p. 1747 – 1768, 1989

LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A.L. 1993. Filter criteria for graded cohesionless soils. In: BRAUNS, J.; HEIBAUM, M.; SCHULER, U. (Eds). **Filters in geotechnical and hydraulic engineering**. Rotterdam: Balkema. 1993. p. 97-106. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe)

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

LAFLEUR, J.; FRANCOEUR, J.; FAURE, Y. Piping, bridging and blinding of geotextiles as evaluated from the gradient ratio test. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice. **Proceedings...** Nice: IGS, 2002. p. 1069 – 1074.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 553p.

LEE, I. M.; KIM, J. H.; REDDI, L. N. Clogging phenomena of the residual soil-geotextile filter system. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 4, p.1-12, 2002.

MENDONÇA, M. B. et al. 2000. Ochre biofilm formation on geotextile filters in geotechnical works. In: WOLSKI, W.; MLYRAREK, J. (Eds). **Filters and drainage in geotechnical and environmental engineering**. Rotterdam: Balkema. 2000. p. 223-229. (Proc. Third International Conference GeoFilters 2000, Warsaw)

MLYNAREK, J., 2000. Geo drains and geo filters – Retrospective and future trends. In: WOLSKI, W.; MLYRAREK, J. (Eds). **Filters and drainage in geotechnical and environmental engineering**. Rotterdam: Balkema. 2000. p. 27-47. (Proc. Third International Conference GeoFilters 2000, Warsaw)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15224**: geotêxteis: instalação em trincheiras drenantes. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553**: geossintéticos: terminologia. São Paulo, 2003. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12568**: geossintéticos: determinação da massa por unidade de área. São Paulo, 2003. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12569**: geotêxteis: determinação da espessura. São Paulo, 1992. 2p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF G-38-020**: textiles: articles à usages industriels – essais des géotextiles: détermination de la résistance à la traversée de l'eau. 1988.

OLSON, R.E.; DANIEL, D.E.. Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. In: ZIMMIE, T.F.; RIGGS, C.O.[Eds]. **Permeability and Groundwater Contaminant Transport**. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken. 1981. p. 18-64. (ASTM STP 746)

PALMEIRA, E. M. Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: ABMS/IGS - Brasil, 2003. cd.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. **Geosynthetics International**, v. 7, n. 4-6, p. 403-431, 2000. (Special issue on liquid collection systems)

ROLLIN, A. L.; DENIS, R. Geosynthetic filtration in landfill design. In: GEOSYNTHETIC, 1987. New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: [s.n.], 1987. p. 456-470.

SANTOS, C. T. **Influência do desempenho de filtros têxteis na estabilização de solos colúviais**. 153f. 2004. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SHERARD, J. L. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 13., 1979. New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: ICOLD, 1979. v. 2, p. 25 - 35.

SILVEIRA, A. An analysis of the problem of washing through in protective filters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOILS MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, Montreal, 6., 1965, Montreal. **Proceedings...** Montreal: ISSMFE, 1965. p. 551-555.

SILVEIRA, A. A method for determining the void size distribution curve for filter materials. In: BRAUNS, J.; HEIBAUM, M.; SCHULER, U. (Eds). **Filters in geotechnical and hydraulic engineering**. Rotterdam: Balkema. 1993. p. 71-73. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe)

URASHIMA, D. C. **Dimensionamento de filtros têxteis por teoria probabilística**. 103f. 1996. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

URASHIMA, D. C.. **Simulação do processo de retenção de partículas por filtros têxteis**. 100 f. 2002. Tese (Doutorado em Aerodinâmica, Propulsão e Energia) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

URASHIMA, D. C.; Vidal, D. Análise de sistemas de filtração por teoria probabilística e por simulação do processo de retenção de partículas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IGS, 2003.

VIDAL, D.; RIGHETTI, C.C.. Propriedades hidráulicas dos geotêxteis em geossintéticos. In: SEXTO CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E NONO CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DO SOLO E FUNDAÇÕES, 3., 1990, Salvador. **Anais ...** Salvador: ABMS, 1990. v.1, p. 589-595.

VIDAL, D.; URASHIMA, D. C.. Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos. **Primeiro Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos. /Terceiro Simpósio Brasileiro de Geossintéticos**, Rio de Janeiro, v.1, 16 p. 1999

VIDAL, D. **Os geossintéticos e suas principais aplicações: módulo II propriedades**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2002.(Apostila disponível em: <<http://www2.ita.br/~delma/cursos/dlcpaa.html>>. Acesso em: 20 maio 2005.)

## **APÊNDICE A**

**Gráficos leitura piezométrica versus tempo**

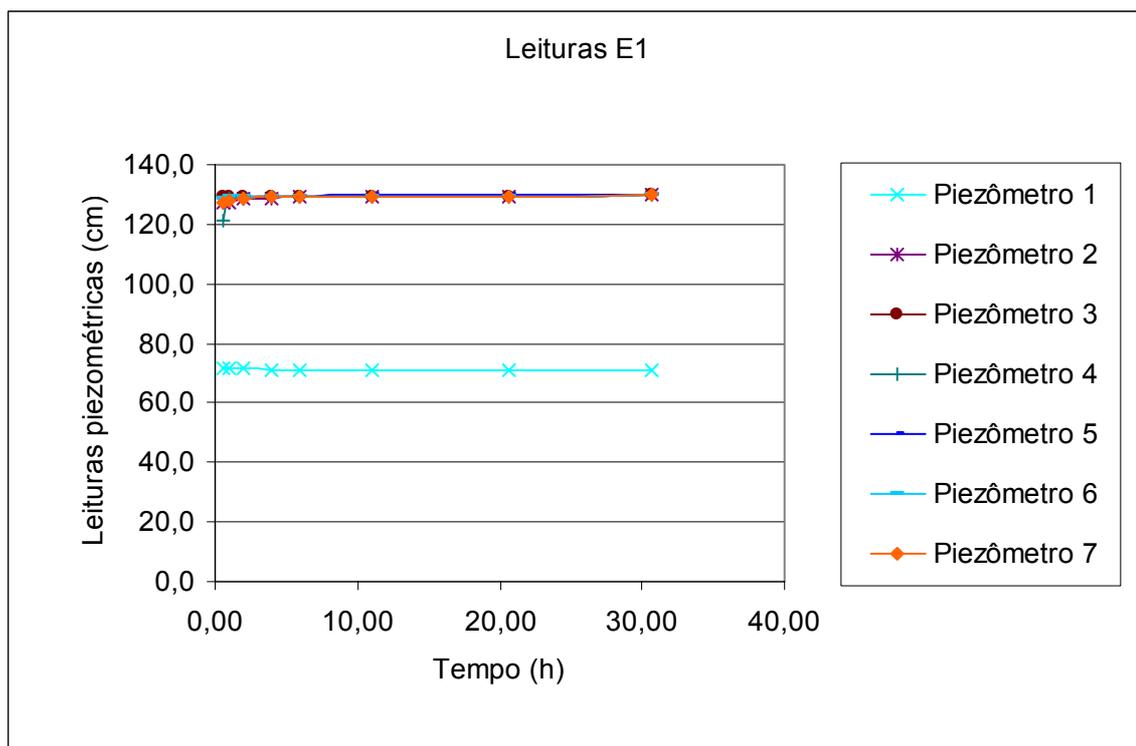


Figura A.1. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E1.

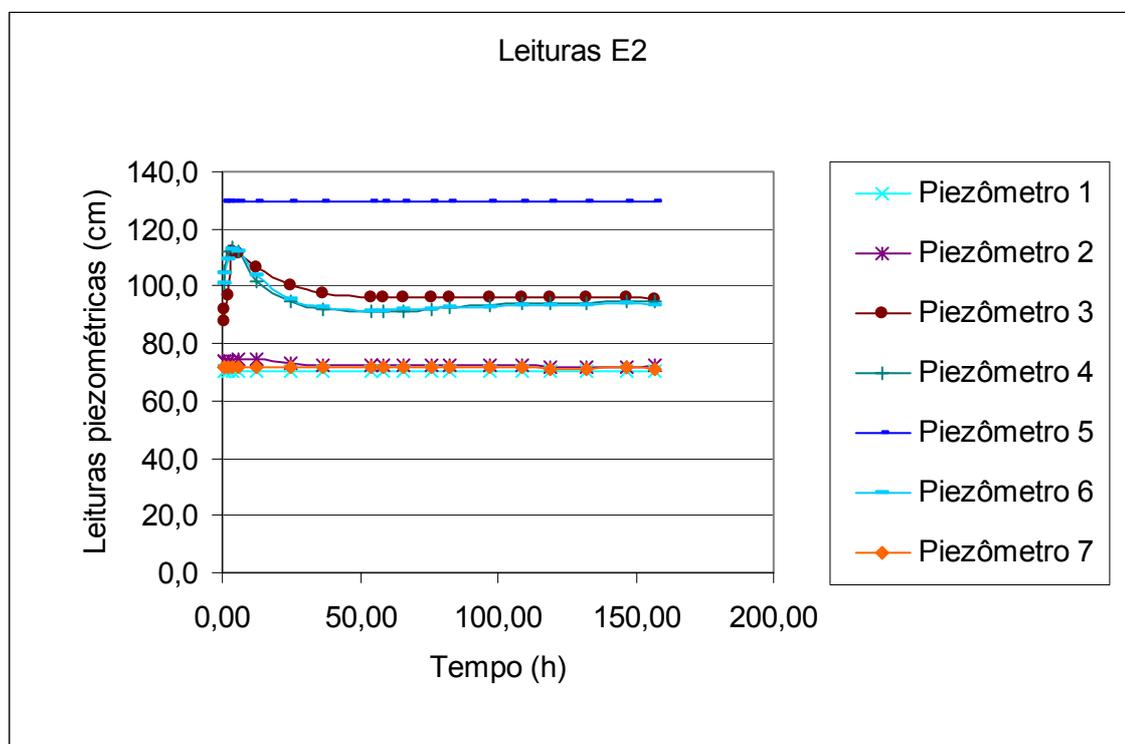


Figura A.2. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E2.

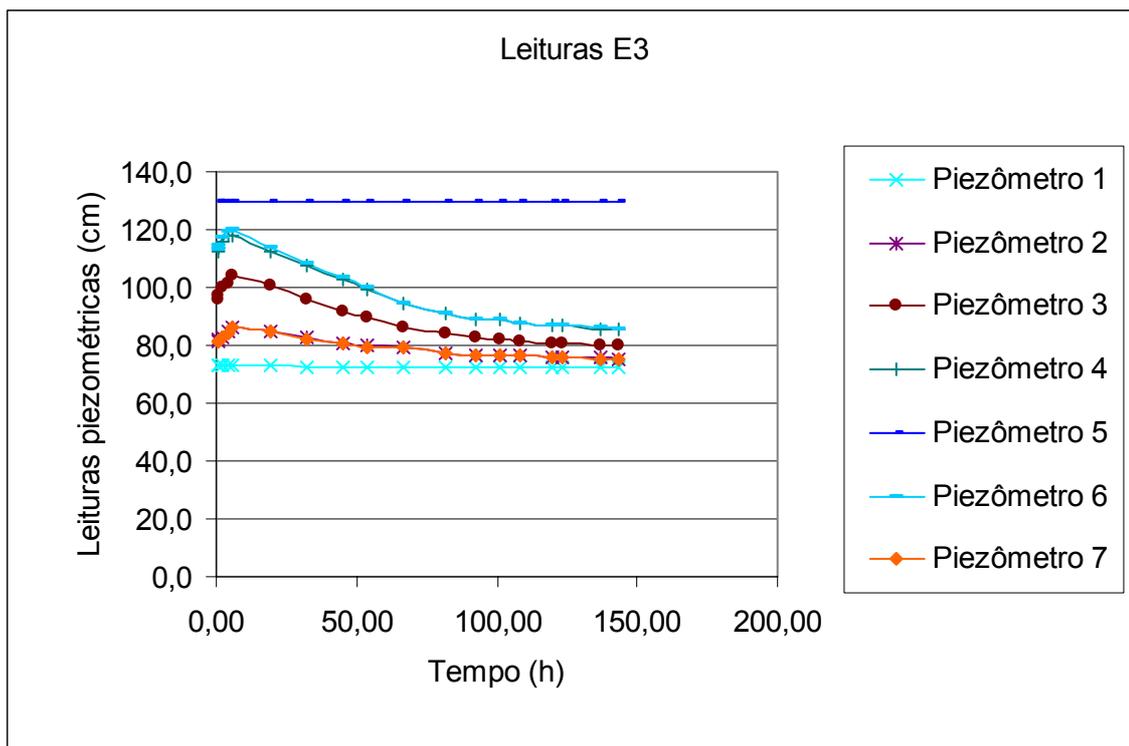


Figura A.3. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E3.

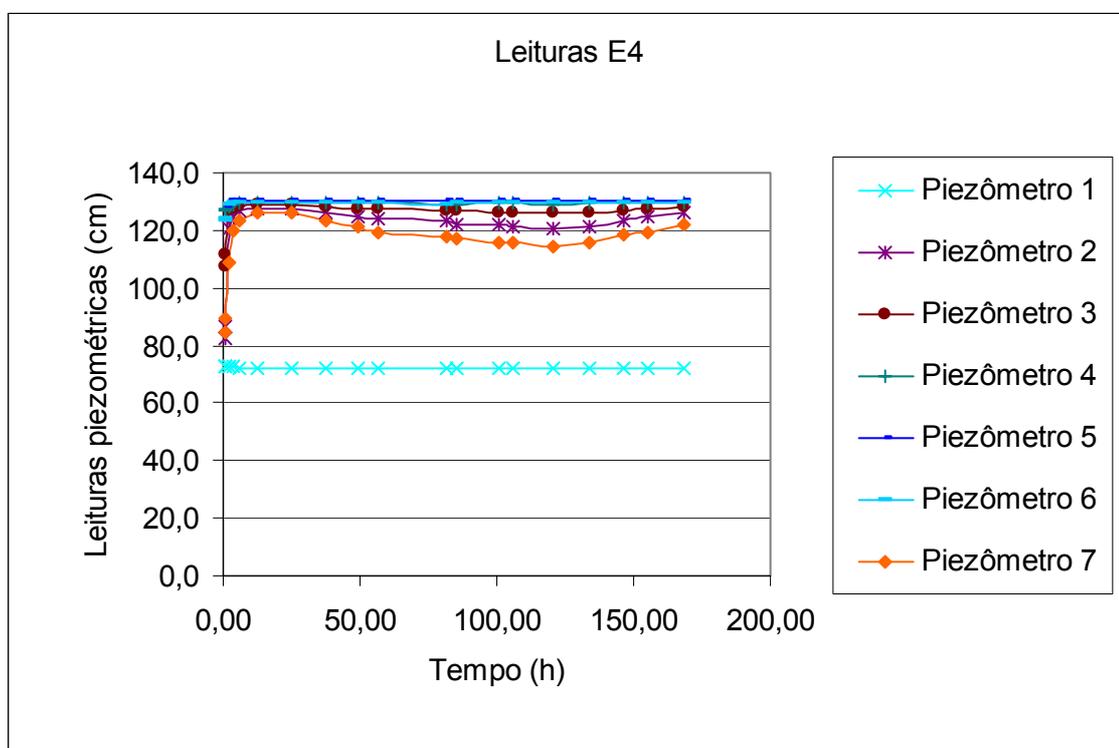


Figura A.4. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E4.

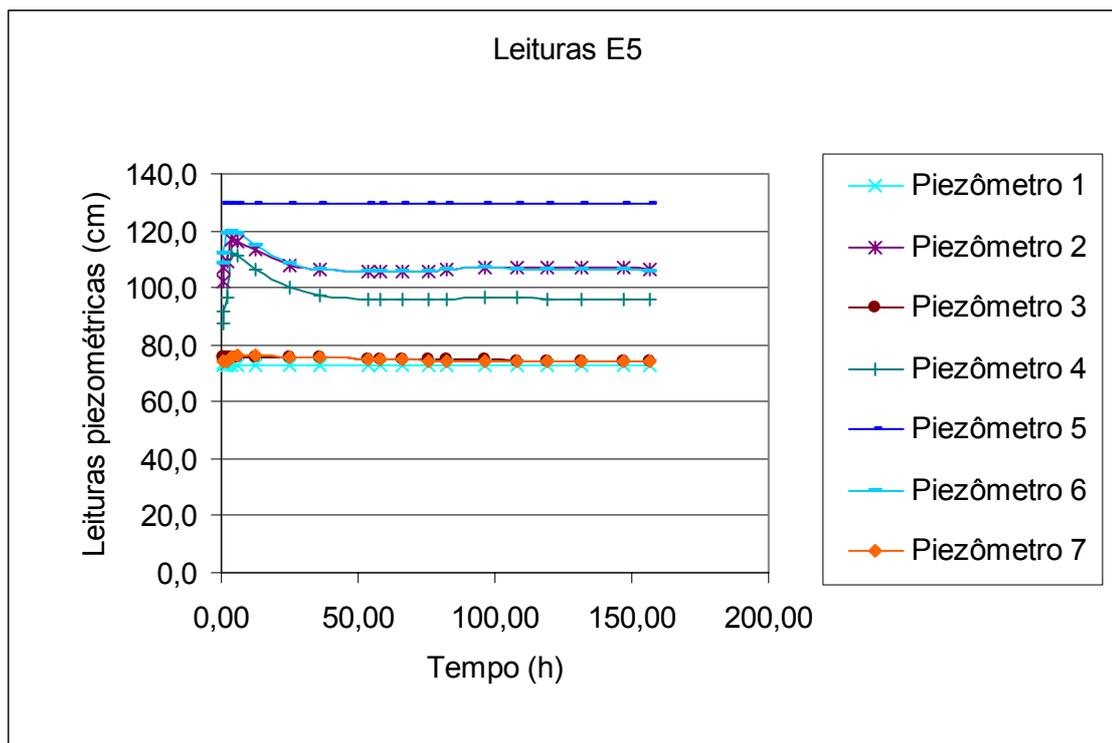


Figura A.5. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E5.

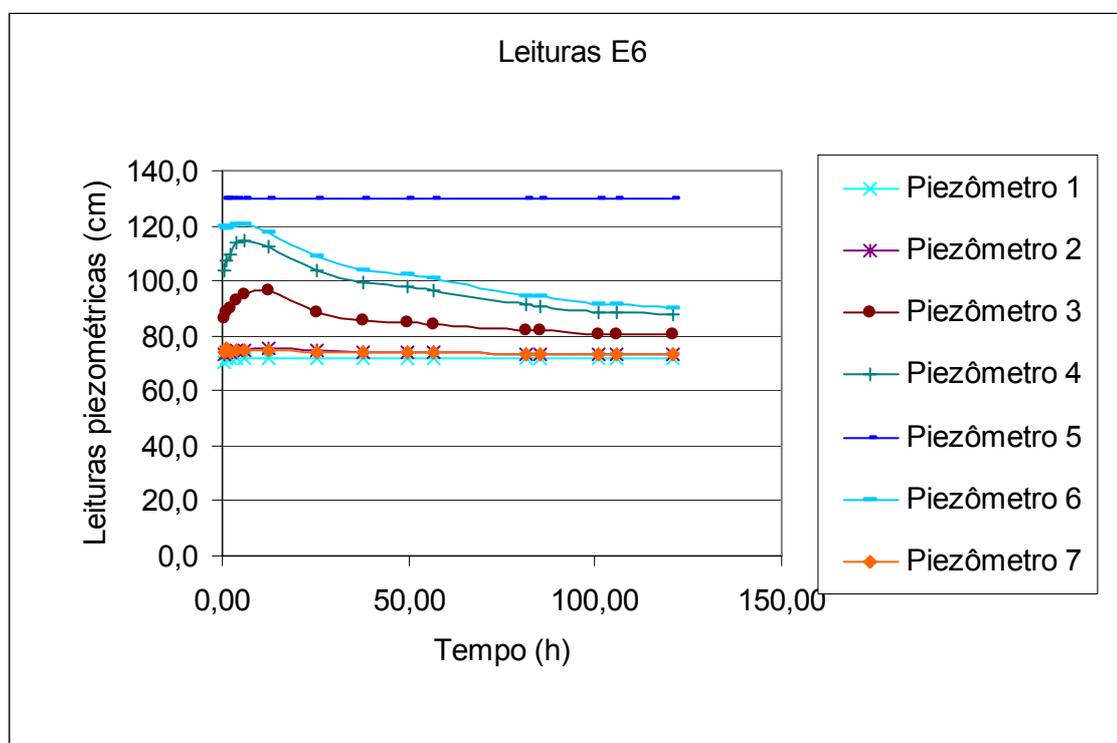


Figura A.6. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio E6.

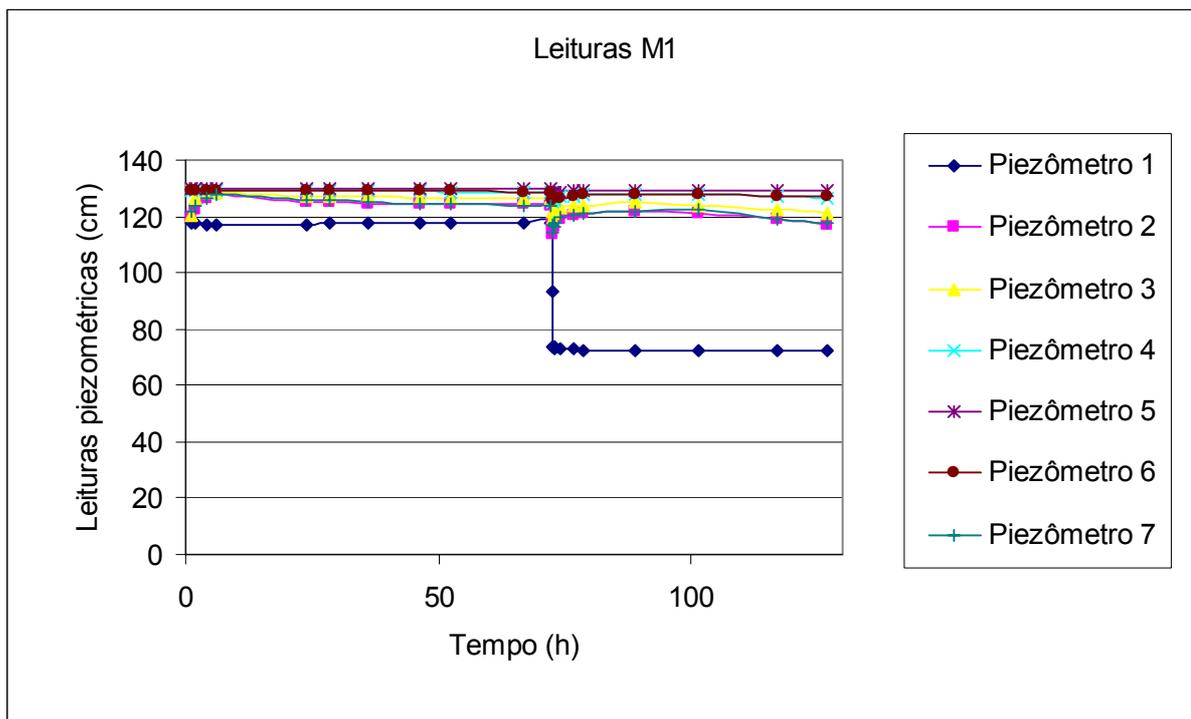


Figura A.7. Leitura piezométrica versus tempo, ensaio M1.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

<sup>1</sup> CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TM</p>	<sup>2</sup> DATA <p style="text-align: center;">22 de setembro de 2005</p>	<sup>3</sup> DOCUMENTO N° <p style="text-align: center;">CTA/ITA-IEI/TM-008/2005</p>	<sup>4</sup> N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">119</p>			
<sup>5</sup> TÍTULO E SUBTÍTULO: Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis						
<sup>6</sup> AUTOR(ES): <b>Catarina Silveira Muñoz</b>						
<sup>7</sup> INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI						
<sup>8</sup> PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Geotêxteis, Filtração, Solos internamente instáveis.						
<sup>9</sup> PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Geossintéticos; Filtragem; Estabilização de solo; Mecânica dos solos; Engenharia geotécnica						
<sup>10</sup> APRESENTAÇÃO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 20%; text-align: center;"><b>X Nacional</b></td> <td style="width: 20%; text-align: center;"><b>Internacional</b></td> </tr> </table> ITA, São José dos Campos, 2005. 119 páginas					<b>X Nacional</b>	<b>Internacional</b>
	<b>X Nacional</b>	<b>Internacional</b>				
<sup>11</sup> RESUMO: <p>A filtração de solos com granulometria ampla pode apresentar problemas devido ao risco de ruptura da estrutura do solo ou de colmatação do filtro, pois este tipo de solo pode não ser capaz de reter suas próprias partículas finas, apresentando um comportamento internamente instável. Assim, um solo é descrito como tendo uma granulometria instável se apresentar carreamento de suas partículas finas devido à ação de algum agente perturbador. Esta pesquisa apresenta um estudo sobre o desempenho de geotêxteis não-tecidos agulhados aplicados na filtração desses solos críticos</p> <p>A campanha experimental envolve ensaios de caracterização dos geotêxteis e ensaios de filtração de longa duração tipo Razão entre Gradientes para avaliação do comportamento dos sistemas solo/filtro, tendo sido testados dois geotêxteis não tecidos de massa por unidade de área diferentes e três materiais de base preparados com frações de pó de brita, a partir de curvas granulométricas específicas com formato côncavo.</p> <p>O trabalho analisa a condição de estabilidade interna dos solos de base e discute a aplicabilidade dos métodos de classificação para solos granulares. O desempenho dos filtros é avaliado considerando critérios de retenção, colmatação e permeabilidade, aplicáveis a solos instáveis. Um critério de retenção racional, baseado em análises probabilísticas, é também considerado.</p> <p>Os resultados obtidos nos ensaios demonstram a influência da intensidade e do modo de aplicação do gradiente hidráulico no comportamento de um geotêxtil como elemento filtrante, sendo no caso estudado, a colmatação do sistema agravada com o aumento do gradiente. Dos solos utilizados apenas o de estrutura mais aberta e curva granulométrica com concavidade mais acentuada apresenta colmatação ao longo do tempo, enquanto os dois outros apresentam pouca variação do GR no decorrer do ensaio.</p>						
<sup>12</sup> GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO                      ( ) RESERVADO                      ( ) CONFIDENCIAL                      ( ) SECRETO						