

**COMPATIBILIDADE DE SISTEMAS SOLO-GEOTÊXTIL EM
ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÃO**

DAVID WILKERSON BESSA DA LUZ

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPATIBILIDADE DE SISTEMAS SOLO-GEOTÊXTIL EM
ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÃO**

ENG.º DAVID WILKERSON BESSA DA LUZ

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-120A/04

BRASÍLIA/DF: MAIO/2004

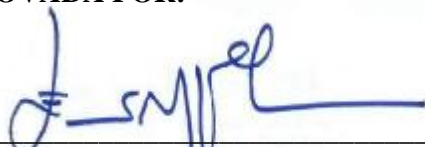
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

COMPATIBILIDADE DE SISTEMAS SOLO-GEOTÊXTIL EM
ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÃO


ENG.º DAVID WILKERSON BESSA DA LUZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

APROVADA POR:



Prof. ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)



Prof. RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



Prof.ª MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA, D.Sc. (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 28 DE MAIO DE 2004.

FICHA CATALOGRÁFICA

BESSA DA LUZ, DAVID WILKERSON

Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração sob Tensão, 2004.

(xx), 139 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2004).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------|---------------------------|
| 1. Geotêxteis | 2. Ensaio de Laboratório |
| 3. Filtração | 4. Razão entre Gradientes |
| 5. Compressão | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BESSA DA LUZ, D. W. (2004). Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração sob Tensão, Publicação nº G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.

CESSÃO DE DIREITOS

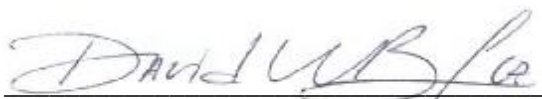
NOME DO AUTOR: David Wilkerson Bessa da Luz

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração sob Tensão.

GRAU: Mestre em Ciências

ANO: 2004

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



David Wilkerson Bessa da Luz
QRSW 08 Bl A-1 Apt. 204 – Setor Sudoeste
70.675-801 – Brasília/DF – Brasil
E-mail: bessadaluz@hotmail.com

DEDICATÓRIA

*Dedico esta dissertação primeiramente a Deus,
meu Senhor, porque d'Ele, e por Ele, e para Ele, são todas as coisas.*

*Aos meus pais, Domingos Manoel e Maria Edemir Luz; e meus irmãos,
Wellington, Wagner e Anderson Luz, em compensação à ausência do convívio familiar.*

À minha querida esposa, Nise Allyne Luz, pelo amor, apoio e compreensão.

Em especial, ao nosso bebê, fruto do amor e nossa herança da parte do Senhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu forças e condições para a execução e conclusão deste trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Ennio Marques Palmeira, por sua dedicação, paciência, amizade e conhecimentos transmitidos, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais Domingos Manoel e Maria Edemir Luz, pelo encaminhamento e esforço a fim de proporcionarem minha educação. Vocês também são vencedores juntamente comigo.

À minha querida esposa Nise Allyn Luz pelo amor, incentivo, confiança e compreensão, mesmo nos momentos de saudade quando distantes.

Ao meu sogro José Eurípedes Moraes e minha sogra Nice Laura Moraes, pelo apoio e incentivo, principalmente quando de minha chegada e a maioria de minha estada em Brasília.

Aos meus irmãos Wellington, Wagner e Anderson Luz, e meus cunhados Nilbert Allyson e Nill Allayn Moraes, pelo incentivo.

Ao amigo e companheiro Neemias Jardim Almeida pelo apoio dado no início do curso.

Aos amigos Mário Lucas, Therence Chaves, Augusto Silva, José Mendes, Kátia Andrade, Charles Santos, Helber Viana e Marcos Porto, pela convivência e companheirismo.

Aos amigos da Pós-Graduação em Estruturas, Transportes, Recursos Hídricos e, em especial, aos amigos da Geotecnia da UnB, sem distinção, pelo companheirismo, amizade e os bons momentos que passamos juntos.

Aos amigos da Coordenação de Estruturas do DNIT pelo incentivo à conclusão deste trabalho.

Aos professores Júlio Augusto de Alencar Junior e Salim Habib Fraiha Neto, do Curso de Engenharia Civil da UFPA, pelo incentivo ao ingresso no Mestrado em Geotecnia da UnB.

Aos professores da Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pela convivência amigável e conhecimentos transmitidos. Em especial, ao saudoso professor José Henrique Feitosa Pereira, nosso querido Feitosa, pelo apoio quando em vida e por garantir as condições necessárias para a conclusão deste trabalho.

À Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida pela ajuda e contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB pelo apoio e suporte sempre oportunos.

À Universidade de Brasília pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro.

À BBA pelo fornecimento dos geossintéticos que foram objeto de estudo desta dissertação.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução e conclusão deste trabalho.

“Vence quem não desiste com facilidade.”

Josué Gonçalves

COMPATIBILIDADE DE SISTEMAS SOLO-GEOTÊXTIL EM ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÃO

Ensaio de filtração em permeâmetros têm sido realizados para avaliar a Razão entre Gradientes “GR” para o fluxo unidirecional através de geotêxteis não-tecidos. Este trabalho apresenta resultados de ensaios de filtração tipo Razão entre Gradientes “GR” em sistemas solo-geotêxtil sob elevadas tensões normais, utilizando-se um equipamento construído na Universidade de Brasília capaz de aplicar tensões até 2000 kPa. Foram testados sistemas compostos pelas combinações de três geotêxteis não-tecidos agulhados de filamentos contínuos e um tecido de polipropileno, e quatro materiais granulares, sendo uma areia grossa uniforme, uma areia bem graduada, um rejeito de minério de ferro e microesferas de vidro. As amostras de solo para os ensaios de filtração foram preparadas seguindo a metodologia apresentada em Shi (1993) e tomando-se como referência os procedimentos de ensaios adotados por Gardoni (2000).

O principal objetivo do trabalho foi analisar o comportamento filtrante de geotêxteis em contato com o solo, avaliando suas propriedades físicas e hidráulicas antes e após ensaios de filtração, tipo Razão entre Gradientes, estando submetidos a diferentes níveis de tensões. Avaliou-se ainda, a abertura de filtração dos geotêxteis sob a ação de tensões verticais através da análise granulométrica do material passante pelo geotêxtil, utilizando-se um granulômetro a laser.

São apresentados e discutidos os resultados de “GR”, permeabilidade e comportamento do sistema com a tensão, enfatizando-se a necessidade do estudo de filtros geotêxteis sob a ação de tensões verticais.

**COMPATIBILITY SOIL-GEOTEXTILE SYSTEMS IN
FILTRATION TESTS UNDER STRESS**

In this dissertation filtration tests were performed to evaluate the Gradient Ratio "GR" for the unidirectional flow through nonwoven geotextiles. This work presents results of Gradient Ratio Tests in soil-geotextile systems subjected to high normal stresses. An equipment was designed e built at the University of Brasília to perform the tests capable of applying normal stresses up to 2000 kPa. Combinations of three needle-punched nonwoven geotextiles with continuous filaments, a woven polypropylene geotextile and four granular materials (uniform sand, well-graded sand, iron ore waste and glass beads) were tested. The soil samples for the filtration tests were prepared following the methodology presented in Shi (1993) and test procedures followed those presented by Gardoni (2000).

The main objective of the work was to analyze the filter behaviour of geotextiles in contact with soil and to evaluate their physical and hydraulic properties before and after filtration tests under stress. Filtration opening sizes of the geotextiles under confinement were also evaluated by grain size analyses of the material that passed through the geotextile employing a laser grain size analyser for that matter.

The results obtained are presented and discussed and emphasize the need for the study of geotextile filter behaviour under confinement.

Capítulo	Página
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS	2
1.2 - RESUMO DOS CAPÍTULOS.....	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 - INTRODUÇÃO	3
2.2 - TIPOS E FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	3
2.3 - O GEOTÊXTIL COMO ELEMENTO DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM	5
2.3.1 - PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS PARA FILTRAÇÃO E DRENAGEM.....	6
2.3.1.1 - Propriedades Físicas	6
2.3.1.2 - Propriedades Hidráulicas	15
2.3.1.3 - Propriedades Mecânicas.....	22
2.4 - CRITÉRIOS DE FILTROS.....	23
2.5 - APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM.....	29
2.5.1 - BARRAGEM DE VALCROS – FRANÇA	29
2.5.2 - BARRAGEM DE TUCURUÍ – PARÁ/BRASIL	30
2.5.3 - BARRAGEM DE REJEITOS DE MINA DE OURO.....	31
2.5.4 - BARRAGEM DE REJEITOS DA COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM	32
2.5.5 - PROJETO DO 79º VIADUTO – MIAMI/USA.....	32
2.5.6 - DRENO DA RODOVIA BR-020 – DER – BRASÍLIA/DF	33
2.5.7 - SISTEMA DE DRENAGEM DE RODOVIAS	33
2.6 - ENSAIOS LABORATORIAIS COM GEOTÊXTEIS	34
2.6.1 - ENSAIOS DE FLUXO DE LONGA DURAÇÃO (LFT)	35
2.6.2 - ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (HCR).....	35
2.6.3 - ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DINÂMICA (DF)	36
2.6.4 - ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DA FRAÇÃO FINA (F ³)	37
2.6.5 - ENSAIOS DE RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)	38

3 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	41
3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	41
3.1.1 - GEOTÊXTEIS.....	41
3.1.2 - MATERIAIS GRANULARES	42
3.1.2.1 - Areias.....	42
3.1.2.2 - Rejeito de Minério.....	42
3.1.2.3 - Microesferas de Vidro	43
3.2 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	44
3.2.1 - EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÕES TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR).....	44
3.2.2 - GRANULÔMETRO A LASER	47
4 - METODOLOGIAS UTILIZADAS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	50
4.1 - INTRODUÇÃO.....	50
4.2 - PROCEDIMENTOS PARA A PREPARAÇÃO E OPERAÇÃO DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR) SOB TENSÃO	50
4.2.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTEIS.....	50
4.2.2 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLOS	51
4.2.3 - OPERAÇÃO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO TIPO GR SOB TENSÃO	56
4.3 - PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO.....	58
5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)	60
5.1 - INTRODUÇÃO.....	60
5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO	60
5.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA GROSSA UNIFORME – AGU	64
5.3.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU–GT1	64
5.3.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU–GT2	67
5.3.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU–GT3	70
5.3.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU–GT4	73
5.4 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM MICRO- ESFERAS DE VIDRO – MEV	75
5.4.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV–GT1.....	75

5.4.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV–GT2.....	78
5.4.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV–GT3.....	81
5.4.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV–GT4.....	84
5.5 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO – RMF	87
5.5.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF–GT1	87
5.5.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF–GT2	90
5.5.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF–GT3	93
5.5.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF–GT4	96
5.6 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA BEM GRADUADA – ABG	99
5.6.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA ABG–GT1	99
5.6.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA ABG–GT2	102
5.7 - COMENTÁRIOS FINAIS	105
6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO	107
6.1 - INTRODUÇÃO.....	107
6.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO.....	107
6.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO – MEV	109
6.4 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO – RMF.....	110
6.4.1 - SISTEMA RMF–GT1.....	110
6.4.2 - SISTEMA RMF–GT2.....	111
6.4.3 - SISTEMA RMF–GT3.....	111
6.4.4 - SISTEMA RMF–GT4.....	112
6.5 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA BEM GRADUADA – ABG.....	113
6.5.1 - SISTEMA ABG–GT1.....	113
6.5.2 - SISTEMA ABG–GT2.....	113
6.6 - AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PARA OS SISTEMAS ENSAIADOS	114
6.7 - COMENTÁRIOS FINAIS	115

7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	117
7.1 - CONCLUSÕES	117
7.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
A - DADOS DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR) SOB TENSÃO	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 – Aplicações de geossintéticos em obras de filtração e drenagem: (a) Drenagem subsuperficial; (b) Adensamento de solo mole; (c) Contenção e drenagem em encostas; (d) Canais.	5
2.2 – Variação da espessura com a tensão (modificado – Faure et al., 1990).	7
2.3 – Caminhos de filtração (modificado – Giroud et al., 1998).	8
2.4 – Tamanho de constrição em arranjos de esferas (Kenney et al., 1984).	9
2.5 – Curva de distribuição de tamanhos de constrição (C) e curva de distribuição de tamanhos de abertura (O) para um geotêxtil não-tecido.	10
2.6 – Curvas de distribuição do tamanho de abertura: (1) infinitamente espesso; (2) espesso; (3) fino; (4) infinitamente fino.	11
2.7 – Representação gráfica das extensões teóricas propostas por Giroud (1996).	12
2.8 – Propriedades hidráulicas do geotêxtil (modificado – Gardoni, 1995)	17
2.9 – Leis de permeabilidade propostas para os geotêxteis (Gardoni, 2000).	21
2.10 – Anisotropia de permeabilidade (modificado – Gardoni et al., 2000).	22
2.11 – Mecanismos de colmatação em filtros de geotêxtil (Palmeira & Gardoni, 2000b).	27
2.12 – Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure et al., 1999).	30
2.13 – Detalhe da colocação do geotêxtil na barragem de Tucuruí (modificado – Dib & Aguiar, 1986).	31
2.14 – Esquema da seção típica da barragem B-5 (modificado – Montez, 1987).	32
2.15 – Sistemas de drenagem exumados (modificado – Koerner et al., 1996).	34
2.16 – Permeâmetro desenvolvido pela EPM (modificado – Shi, 1993).	35
2.17 – Desenho esquemático do Ensaio de Filtração Dinâmica (modificado – Shi, 1993).	36
2.18 – Desenho esquemático do Aparelho de Ensaio F^3 (modificado – Matheus, 1997).	38
2.19 – Permeâmetro da UBC para Ensaio de “GR” (modificado – Fannin et al., 1994b).	39
3.1 – Amostras dos geotêxteis utilizados.	41
3.2 – Amostras dos materiais granulares utilizados.	42
3.3 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais empregados.	43
3.4 – Desenho esquemático do permeâmetro usado para os ensaios de filtração.	44
3.5 – Componentes do equipamento para ensaios de filtração sob tensão.	45
3.6 – Cilindros de nitrogênio para aplicação de cargas.	46
3.7 – Equipamento para ensaios de filtração sob tensão.	46
3.8 – Quadro com escala milimetrada para leituras piezométricas.	47
3.9 – Unidade óptica e de preparação de amostra do granulômetro a laser.	48

4.1 – Saturação do geotêxtil através de vácuo.	51
4.2 – Saturação do solo através de fervura.....	52
4.3 – Fase de preparação da amostra através da técnica da pluviação.	52
4.4 – Fase de densificação da amostra.....	53
4.5 – Controle de altura e densidade da amostra.	54
4.6 – Desenho esquemático do controle da altura e índice de vazios da amostra.	55
4.7 – Fechamento do permeâmetro e conexão dos piezômetros.....	56
4.8 – Vista geral do equipamento de filtração sob tensão em operação.....	57
4.9 – Desmontagem do permeâmetro ao final do ensaio.....	57
4.10 – Unidade de dispersão da amostra do granulômetro a laser.	59
5.1 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT1.	65
5.2 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT1.	65
5.3 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT1.	66
5.4 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT1.	66
5.5 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT1.	66
5.6 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT1.	67
5.7 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT2.	68
5.8 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT2.	68
5.9 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT2.	69
5.10 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT2.	69
5.11 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT2.	69
5.12 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT2.	70
5.13 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT3.	70
5.14 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT3.	71
5.15 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT3.	71
5.16 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT3.	71
5.17 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT3.	72
5.18 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT3.	72
5.19 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT4.	73
5.20 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT4.	73
5.21 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT4.	74
5.22 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT4.	74
5.23 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT4.	74
5.24 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT4.	75
5.25 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT1.....	76

5.26 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT1.....	76
5.27 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT1.....	77
5.28 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT1.....	77
5.29 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT1.....	77
5.30 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT1.....	78
5.31 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT2.....	79
5.32 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT2.....	79
5.33 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT2.....	80
5.34 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT2.....	80
5.35 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT2.....	80
5.36 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT2.....	81
5.37 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT3.....	82
5.38 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT3.....	82
5.39 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT3.....	83
5.40 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT3.....	83
5.41 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT3.....	83
5.42 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT3.....	84
5.43 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT4.....	85
5.44 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT4.....	85
5.45 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT4.....	86
5.46 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT4.....	86
5.47 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT4.....	86
5.48 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT4.....	87
5.49 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT1.....	88
5.50 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT1.....	88
5.51 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT1.....	89
5.52 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT1.....	89
5.53 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT1.....	89
5.54 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT1.....	90
5.55 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT2.....	91
5.56 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT2.....	91
5.57 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT2.....	92
5.58 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT2.....	92
5.59 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT2.....	92
5.60 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT2.....	93

5.61 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT3.	94
5.62 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT3.	94
5.63 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT3.	95
5.64 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT3.	95
5.65 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT3.....	95
5.66 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT3.....	96
5.67 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT4.	97
5.68 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT4.	97
5.69 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT4.	98
5.70 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT4.	98
5.71 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT4.....	98
5.72 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT4.....	99
5.73 – Permeabilidade x Tempo para o sistema ABG-GT1.	100
5.74 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema ABG-GT1.	100
5.75 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema ABG-GT1.	101
5.76 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema ABG-GT1.	101
5.77 – Vazão x Tempo para o sistema ABG-GT1.....	101
5.78 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema ABG-GT1.....	102
5.79 – Permeabilidade x Tempo para o sistema ABG-GT2.	103
5.80 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema ABG-GT2.	103
5.81 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema ABG-GT2.	104
5.82 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema ABG-GT2.	104
5.83 – Vazão x Tempo para o sistema ABG-GT2.....	104
5.84 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema ABG-GT2.....	105
6.1 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema MEV-GT3.....	109
6.2 – Aspecto do geotêxtil do sistema MEV-GT3 após ensaio de filtração (36x).....	110
6.3 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT1.	110
6.4 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT2.	111
6.5 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT3.	112
6.6 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT4.	112
6.7 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema ABG-GT1.	113
6.8 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema ABG-GT2.	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 – Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).	24
2.2 – Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).....	28
3.1 – Características dos geotêxteis ensaiados	41
3.2 – Características dos materiais granulares	43
5.1 – Programa de ensaios de filtração.....	61
5.2 – Características das amostras dos ensaios de filtração.....	61
5.3 – Resultados dos ensaios de filtração.	62
6.1 – Características dos solos após ensaios de filtração.	108
6.2 – Avaliação dos critérios de retenção para os filtros usados.	115
A.1 – Dados do ensaio de filtração com o sistema AGU-GT1.....	126
A.2 – Dados do ensaio de filtração com o sistema AGU-GT2.....	127
A.3 – Dados do ensaio de filtração com o sistema AGU-GT3.....	128
A.4 – Dados do ensaio de filtração com o sistema AGU-GT4.....	129
A.5 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT1.	130
A.6 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT2.	131
A.7 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT3.	132
A.8 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT4.	133
A.9 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT1.....	134
A.10 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT2.....	135
A.11 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT3.....	136
A.12 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT4.....	137
A.13 – Dados do ensaio de filtração com o sistema ABG-GT1.....	138
A.14 – Dados do ensaio de filtração com o sistema ABG-GT2.....	139

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURA E SÍMBOLOS

ABG	Areia Bem Graduada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGU	Areia Grossa Uniforme
AOS	Aparent Opening Size (O_{95})
ASTM	American Society of Testing and Materials
AFNOR	Association Française de Normalization
BBA	BBA NONWOVENS (Fiberweb)
BBP	Bubble Point
C	Tamanho de constrição
C_0	Tamanho da menor constrição
C_{100}	Tamanho da maior constrição
C_c	Coefficiente de curvatura
C_D	Coefficiente de Arraste
C_u	Coefficiente de não-uniformidade
CAESB	Companhia de águas e Esgoto de Brasília
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CFGG	Comitê Francs de Geotêxteis e Geomembranas
CGS	Canadian Geotechnical Society
cm	centímetro
D	Diâmetro das partículas ou gros de solo
D_{15}	Diâmetro das partículas ou gros de solo correspondente a 15% passante em peso
D_{50}	Diâmetro das partículas ou gros de solo correspondente a 50% passante em peso
D_{85}	Diâmetro das partículas ou gros de solo correspondente a 85% passante em peso
D_c	Diâmetro de constrição
d_c	Distância entre constrições sucessivas
d_f	Diâmetro das fibras
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DF	Ensaio de Filtração Dinâmica
e	ndice de vazios
e_{min}	ndice de vazios mínimo
$e_{máx}$	ndice de vazios máximo
EPM	Escola Politécnica de Montreal
F^3	Ensaio de Filtração da Fração Fina
FHWA	Federal Highway Administration
FOS	Filtration Opening Size (D_{85})
g	Aceleração da gravidade
g	grama
G_s	Densidade específica dos grãos
GR	Ensaio de Razão entre Gradientes
GR_{ASTM}	Razão entre Gradientes da ASTM
GR_{Mod}	Razão entre Gradientes da UBC
GR_{3mm}	Razão entre Gradientes da UnB
GT1	Geotêxtil não-tecido, Bidim OP-15
GT2	Geotêxtil não-tecido, Bidim OP-30
GT3	Geotêxtil não-tecido, Bidim OP-60
GT4	Geotêxtil tecido, Propex 2044
H	Altura do permeâmetro

h	.....	hora
$h_{1/12}$	.....	Carga piezométrica
HCR	.....	Ensaio de Condutividade Hidráulica
i	.....	Gradiente hidráulico
IRIGM	.....	Universidade de Grenoble
k	.....	Coefficiente de permeabilidade
k_f	.....	Coefficiente de permeabilidade do filtro
k_n	.....	Coefficiente de permeabilidade normal ao plano
k_p	.....	Coefficiente de permeabilidade no plano
k_s	.....	Coefficiente de permeabilidade do solo
k_{sg}	.....	Coefficiente de permeabilidade solo -geotêxtil
$k_{1/7}$	.....	Coefficiente de permeabilidade no topo da amostra
$k_{1/12}$	.....	Coefficiente de permeabilidade do sistema solo -geotêxtil
$k_{7/9}$	.....	Coefficiente de permeabilidade no solo
$k_{9/12}, k_{10/12}, k_{11/12}$	.....	Coefficiente de permeabilidade da interface solo -geotêxtil
kg	.....	quilograma
km	.....	quilômetro
kN	.....	quilonewton
kPa	.....	quilopascal
L	.....	Altura da amostra de solo
l	.....	litro
LFT	.....	Ensaio de Fluxo de Longa Duração
li	.....	Altura medida em cada intervalo de controle da amostra de solo
m	.....	metro
M_A	.....	Gramatura do geotêxtil
MEV	.....	Microesfera de Vidro
min	.....	minuto
mm	.....	milímetro
n_{GT}	.....	Porosidade do geotêxtil
NOVACAP	.....	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
O_f	.....	Abertura de filtração
O_0	.....	Tamanho da menor abertura de filtração
O_{95}	.....	Tamanho de abertura de filtração obtido pelo peneiramento a seco
O_{100}	.....	Tamanho da maior abertura de filtração
PA	.....	Poliamida
PE	.....	Polietileno
PEAD	.....	Polietileno de Alta Densidade
PET	.....	Poliéster
PP	.....	Polipropileno
PVC	.....	Policloreto de Vinila
Q	.....	Vazão do Sistema
R_{eg}	.....	Número de Reynolds
RMF	.....	Rejeito de Minério de Ferro
s	.....	segundo
S_s	.....	Superfície específica dos sólidos
SAMITRI	.....	S.A. Mineração da Trindade
t	.....	Espessura da placa
t_{GT}	.....	Espessura do geotêxtil
UBC	.....	University of British Columbia
UnB	.....	Universidade de Brasília

USACE	U. S. Army Corps of Engineers
V	Volume total do geotêxtil
V_v	Volume de vazios
v	Velocidade de fluxo
W_{fws}	Peso do frasco + água + solo antes da preparação da amostra
W_{sd}	Massa seca do solo
$W_{fws\ rest}$	Peso do frasco + água + solo depois da preparação da amostra
b	Fator de forma
g	Peso específico total do geotêxtil
g_f	Peso específico da fibra
g_s	Peso específico dos grãos
h_w	Viscosidade do fluido
μm	micrometro
n	Viscosidade cinemática
q	Transmissividade do geotêxtil
r_f	Massa específica da fibra
r_s	Massa específica dos grãos
r_w	Massa específica do fluido
s_v	Tensão vertical
y	Permissividade do geotêxtil

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os requisitos de qualidade, segurança e vida útil das obras de engenharia, associados a aspectos ambientais, têm limitado a exploração e utilização de materiais naturais. Estas razões, aliadas à redução de custos, facilidade do processo de instalação na obra e o elevado controle de qualidade de fabricação do produto, vêm provocando o grande aumento da aplicação de geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente.

Os geossintéticos são compostos industriais à base de polímeros, em geral oriundos da indústria petroquímica, os quais são utilizados como inclusão em obras geotécnicas com várias finalidades, atuando na natureza como um complemento.

Os geotêxteis são os geossintéticos mais tradicionalmente conhecidos, sendo compostos de fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente, e utilizados em Geotecnia como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração e proteção. Isso se deve, em grande parte, ao fato da interação solo-geotêxtil ter se mostrado eficiente em dois aspectos relevantes no comportamento geotécnico de uma obra: hidráulico e mecânico.

Uma das aplicações mais difundidas dos geotêxteis é a de filtro, como por exemplo, em barragens e estradas. A primeira aplicação de geotêxteis ocorreu em 1953, na reconstrução de diques de proteção para ondas do mar na Holanda. No Brasil, o uso de geotêxteis data do início dos anos 70, principalmente em obras de drenagem e filtração.

Particularmente, a partir dos anos 70, vários estudos e trabalhos de pesquisa sobre a utilização de geotêxteis como elementos dreno-filtrantes foram desenvolvidos, porém a maioria, excetuando-se Palmeira et al. (1996), Palmeira & Fannin (1998), Gardoni (2000), Palmeira & Gardoni (2000a e 2002) e Gardoni & Palmeira (2003), por exemplo, não considerou o efeito da tensão vertical sobre o comportamento filtrante dos mesmos. Neste sentido, o presente trabalho trará sua contribuição dando continuidade ao estudo do comportamento filtrante dos geotêxteis levando-se em consideração níveis de tensões verticais em amostras confinadas.

1.1 - OBJETIVOS

Um dos aspectos mais importantes e geralmente ignorado em projetos de filtros geotêxteis é o efeito da tensão vertical atuante sobre o elemento drenante, pois como os geotêxteis são materiais compressíveis, espera-se que a abertura de filtração dos mesmos seja função do nível de tensões atuantes. Os critérios de dimensionamento de filtros geotêxteis não levam em consideração a pressão, não prevendo, desse modo, o comportamento real da obra.

O objetivo principal do presente trabalho foi analisar o comportamento filtrante de geotêxteis em contato com o solo, avaliando suas propriedades físicas e hidráulicas antes e após ensaios de filtração, tipo Razão entre Gradientes, estando submetidos a diferentes níveis de tensões. Avaliou-se ainda, a abertura de filtração dos geotêxteis sob a ação de tensões verticais.

1.2 - RESUMO DOS CAPÍTULOS

O Capítulo 1 apresenta uma descrição sumária da presente dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que serviu como base para as atividades realizadas, além de embasamentos teóricos de algumas metodologias empregadas neste estudo.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, suas características e propriedades.

O Capítulo 4 apresenta as metodologias empregadas nos ensaios.

Os resultados dos ensaios de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR) sob pressão são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados das análises granulométricas dos solos retidos e passantes pelos geotêxteis após os ensaios de filtração, bem como os resultados de análise de critérios de filtração.

No Capítulo 7 são sumariadas as conclusões sobre o trabalho e apresentadas sugestões para pesquisas futuras sobre o assunto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

A utilização de materiais para melhorar a qualidade dos solos é prática comum desde alguns milênios antes de Cristo. Estivas de junco, solo misturado com palha, bambus, etc., em geral materiais vegetais constituídos de fibras resistentes, foram empregados nos Ziggurats, na Grande Muralha da China e em várias obras do Império Romano (Vertematti, 2001).

Após a Segunda Grande Guerra, com o desenvolvimento da indústria petroquímica e a conseqüente disseminação dos produtos plásticos, iniciou-se a “Era dos Geossintéticos”. Alguns anos depois, uma gama fantástica de produtos plásticos e/ou correlatos vem sendo desenvolvida e tem ajudado a Engenharia Civil a se modernizar, no sentido de melhoria da qualidade, aumento da vida útil da obra, melhor trabalhabilidade, maior rapidez e menores custos.

Atualmente, os geossintéticos vêm cada vez mais se consolidando como importantes materiais de construção em países desenvolvidos, devido ao fato dos mesmos proverem soluções mais atrativas em termos técnicos e econômicos, do que as soluções convencionais, em grande parte das situações em que são aplicados.

No Brasil, os geossintéticos, em particular os geotêxteis, têm sido utilizados em milhares de obras de engenharia civil/geotécnicas, com desempenho ímpar e relação custo/benefício muito favorável. Entretanto, muitas vezes sua potencialidade e utilização vêm sendo preteridas pela comunidade técnica e os usuários, talvez devido ainda, à pouca informação e divulgação desses produtos.

2.2 - TIPOS E FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Entende-se por geossintético o material sintético utilizado como material de construção em obras geotécnicas (Palmeira, 1995). Na presente data, vários são os tipos de geossintéticos

disponíveis e usados em diversas situações em engenharia geotécnica, especialmente como elementos para reforço de solos, drenagem, filtração, camadas de separação, proteção ou barreira.

Os geossintéticos incluem os materiais naturais e industriais constituídos à base de polímeros. Os polímeros são macromoléculas compostas por unidades menores denominadas monômeros, que são estruturadas num processo químico denominado de polimerização. Os polímeros mais comumente utilizados na fabricação de geossintéticos são a Poliamida (PA), o Policloreto de Vinila (PVC), o Poliéster (PET), o Polietileno (PE), o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Polipropileno (PP). O Polietileno e o Polipropileno, por causa da semelhança em suas características básicas são denominados Poliolefinas.

Os geossintéticos para utilização em obras geotécnicas são os geotêxteis (tecidos e não-tecidos), as georredes, as geomantas, as geocélulas, as geogrelhas, as geomembranas, os geocompostos, os geotubos, os geoespaçadores e as geotiras. A seguir, são apresentados os tipos de geossintéticos mais comumente utilizados em obras de filtração e drenagem:

§ **Geotêxteis tecidos:** produtos oriundos do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), seguindo direções preferenciais denominadas trama (perpendicular à direção de fabricação) e urdume (a própria direção de fabricação). As mantas tecidas são permeáveis à água e podem ou não reter o solo, dependendo das dimensões da malha em combinação com a distribuição de tamanhos de grãos do solo;

§ **Geotêxteis não-tecidos:** produtos permeáveis compostos por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos (agulhagem), térmicos (calandragem) ou químicos (resinagem);

§ **Georredes:** produtos com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem;

§ **Geocompostos:** produtos industrializados formados pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebidos para desempenharem uma função específica. Assim, pode-se associar um geotêxtil a uma georrede, atuando com elemento de filtro e ao mesmo tempo atuando como elemento drenante;

§ **Geotubos:** produtos de forma tubular, flexíveis, utilizados como elementos de drenagem em vários tipos de drenos subterrâneos.

A Figura 2.1 apresenta alguns exemplos de aplicações de geossintéticos em obras de filtração e drenagem.

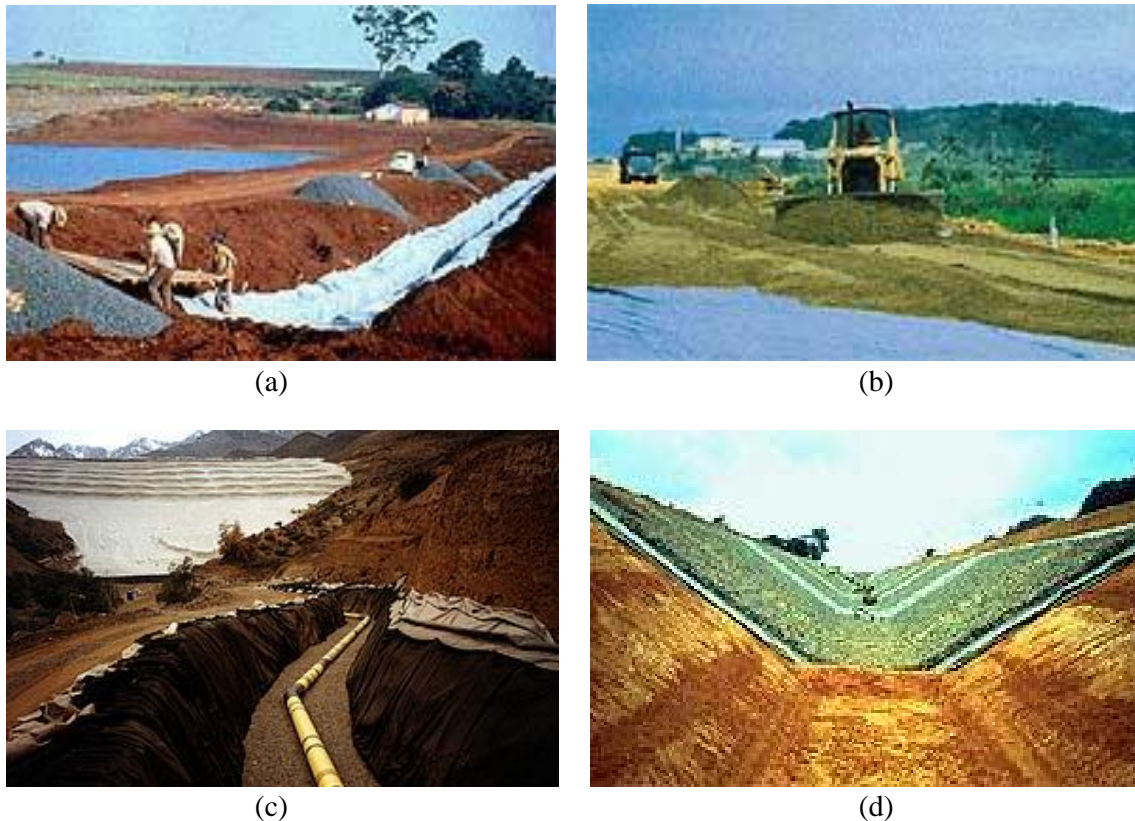


Figura 2.1 – Aplicações de geossintéticos em obras de filtração e drenagem: (a) Drenagem subsuperficial; (b) Adensamento de solo mole; (c) Contenção e drenagem em encostas; (d) Canais.

2.3 - O GEOTÊXTIL COMO ELEMENTO DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

Devido à importância que os geotêxteis desempenham como elementos de filtração e drenagem, torna-se necessário que se conheçam algumas de suas propriedades básicas, tais como as propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas. Os ensaios realizados para a determinação das propriedades dos geotêxteis se dividem em duas classes: os ensaios de caracterização e os ensaios de desempenho. Os ensaios de caracterização têm por objetivo a especificação do produto e seu controle de qualidade. Os ensaios de desempenho buscam os parâmetros necessários para projetos de engenharia com tais materiais (Vidal, 1990).

As propriedades dos geotêxteis são fortemente influenciadas pelas propriedades das fibras ou filamentos que os constituem. O conhecimento destas propriedades permite melhor interpretar os resultados de ensaios com geotêxteis, mas, sobretudo, fornece informações sobre o possível comportamento do produto face às condições do meio ambiente.

2.3.1 - PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS PARA FILTRAÇÃO E DRENAGEM

2.3.1.1 - Propriedades Físicas

Sob os aspectos anteriormente mencionados, as propriedades físicas mais importantes dos geotêxteis são: a gramatura, a espessura, a porosidade e o arranjo estrutural dos filamentos.

A gramatura, simbolizada por M_A , é definida como sendo a massa por unidade de área, expressa em gramas por metro quadrado. É um dos parâmetros mais utilizados para identificação dos geotêxteis não-tecidos e encontra-se normatizada pela norma brasileira NBR 12568 (ABNT, 1992). A gramatura também pode ser utilizada para estimar a abertura de filtração do geotêxtil (Gourc & Faure, 1990).

A espessura, simbolizada por t_{GT} e expressa em mm, é definida como a distância entre duas superfícies rígidas paralelas que comprimem a amostra de geotêxtil em dois níveis de carga pré-estabelecidos, a saber: a) sobrecarga de 2 kPa – espessura nominal; b) sobrecarga acima de 2 kPa – mais próximas às condições de campo.

A espessura encontra-se normatizada pela norma americana ASTM D5199 (ASTM, 1991) e pela norma brasileira NBR 12569 (ABNT, 1992). O geotêxtil não-tecido é um material com compressibilidade elevada e sua espessura é extremamente dependente da tensão aplicada. A espessura dos geotêxteis varia tipicamente de 0,2 a 10 mm, dependendo do produto. A Figura 2.2 exemplifica a dependência da espessura de um geotêxtil não-tecido, com gramatura igual a 200 g/m^2 , em relação à tensão normal (Faure et al., 1990).

A porosidade, simbolizada por n_{GT} e geralmente expressa em porcentagem, é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra. É uma característica importante dos geotêxteis não-tecidos, podendo ser relacionada com a espessura e a gramatura através da expressão (Giroud, 1996):

$$n_{GT} = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{g}{g_f} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \cdot r_f} \quad (2.1)$$

onde:

V_v = volume de vazios do geotêxtil;

V = volume total do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

g = peso específico total do geotêxtil;

g_f = peso específico das fibras;

M_A = gramatura do geotêxtil;

r_f = massa específica das fibras.

Giroud (1996) apresenta os seguintes valores típicos de porosidade de geotêxteis não-tecidos:

- $n_{GT} = 0,9$ para geotêxteis não-tecidos agulhados;
- $n_{GT} = 0,7$ para geotêxteis não-tecidos termoligados.

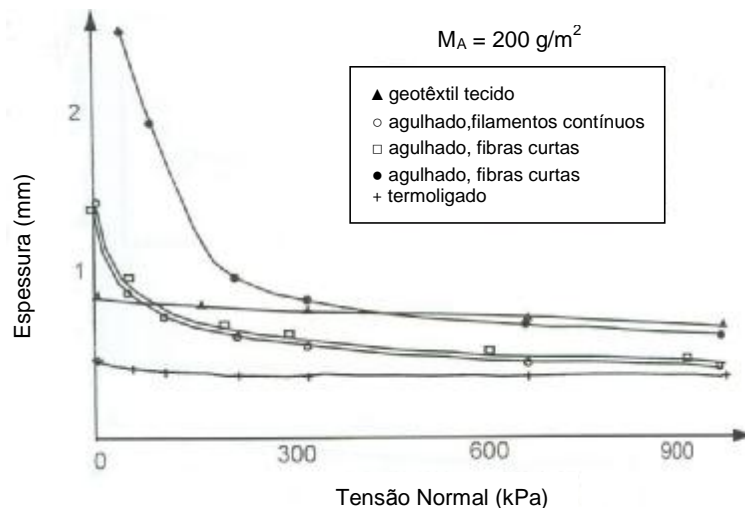


Figura 2.2 – Variação da espessura com a tensão (modificado – Faure et al., 1990).

Diversos estudos realizados mostram uma grande dificuldade na determinação da distribuição de poros de um geotêxtil não-tecido. Silveira (1965) utilizou o modelo probabilístico para estudar a estrutura granular dos solos, através do tratamento por resina. Obtinha-se, assim, um modelo bi-dimensional e o estudo era feito por meio de análise técnica das imagens obtidas pela observação de lâminas finas através de microscópios. Rollin et al. (1977) aplicaram o

mesmo procedimento para o geotêxtil, visando a quantificação da permeabilidade e o estudo da colmatção. Gourc (1982) estendeu o procedimento para o estudo probabilístico das partículas que passam através do geotêxtil, estimando a abertura de filtração.

Devido à geometria tridimensional da manta de geotêxtil, o termo poro não é adequado para designar o espaço entre as fibras. Um novo termo, denominado “constriction”, foi introduzido por Kenney et al. (1984) para filtros granulares. Ele é igual ao diâmetro da maior partícula que pode atravessar a espessura do material. Este parâmetro é útil, pois ele infere uma medida quantitativa do tamanho de canais dentro do filtro e ajuda a entender o comportamento de filtração. A denominação constrição será adotada nesta dissertação, significando o tamanho do estreitamento circular.

Uma partícula de solo que atravessa um filtro de geotêxtil segue certo caminho de filtração, como mostrado na Figura 2.3. O caminho de filtração é tortuoso, mas sua direção geral é aproximadamente perpendicular ao plano do geotêxtil (Giroud et al., 1998). Nessa trajetória a partícula atravessa constrições até encontrar uma constrição menor do que ela, sendo retida.

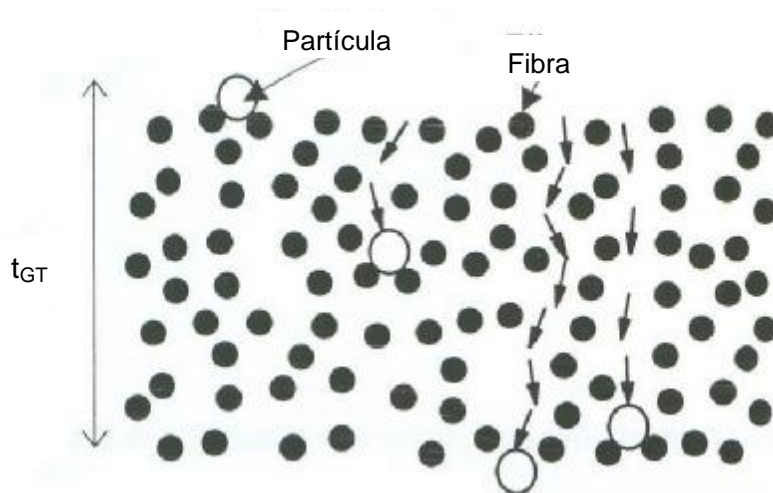


Figura 2.3 – Caminhos de filtração (modificado – Giroud et al., 1998).

O espaço vazio em um meio granular é uma rede contínua de poros interconectados (Kenney et al., 1984). A Figura 2.4 (a) apresenta um arranjo denso de esferas de diâmetros iguais a D com formato tetraédrico. O espaço entre quatro partículas, denominado poro, pode acomodar uma esfera de diâmetro $0,33 D$ e tem quatro entradas ou saídas, que permitem a passagem de esferas menores do que o diâmetro $0,16 D$. Estas aberturas formam constrições

ao longo do caminho de fluxo através do material de filtro. Assim, uma clara distinção pode ser feita entre poros e constrições: um poro é um espaço volumétrico formado entre quatro ou mais partículas e a constrição é uma abertura conectando dois poros. Também no caso de um geotêxtil o significado de poro é diferente do de constrição, pois enquanto a constrição é estritamente definida, um poro é um volume localizado entre as fibras (Giroud et al., 1998).

Kenney et al. (1984) definem tamanho de constrição (D_c) como o diâmetro da maior esfera que passará através de uma constrição específica. Assim, para o arranjo uniforme de esferas da Figura 2.4 (a), $D_c = 0,16 D$, onde D é o diâmetro das esferas. Para arranjos de partículas mais espaçadas, pode-se antecipar que o tamanho de constrição será maior. Isto induz à constatação de que os tamanhos das constrições, apesar do tamanho dos poros, controlam a capacidade de filtração de um material.

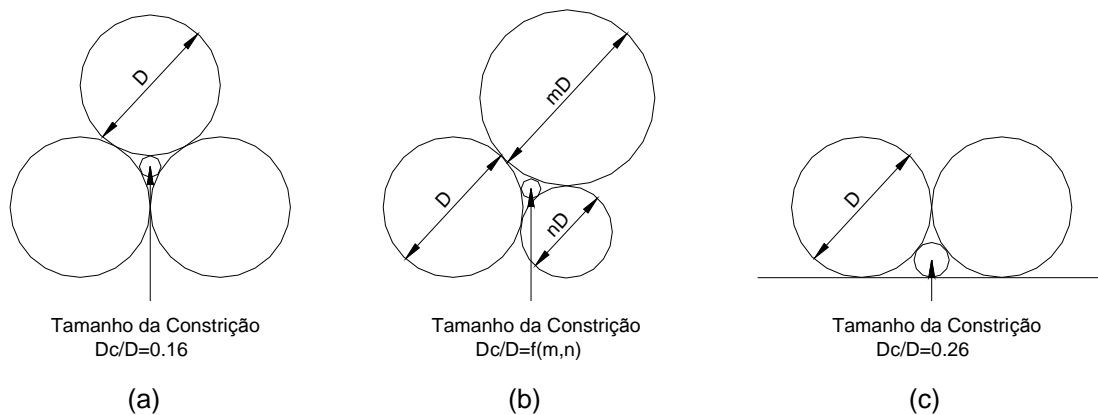


Figura 2.4 – Tamanho de constrição em arranjos de esferas (Kenney et al., 1984).

Giroud (1996), considerando o geotêxtil como um conjunto de camadas paralelas espaçadas igualmente e cuja abertura é igual ao diâmetro das fibras, apresenta uma relação para o cálculo da distância média entre duas constrições sucessivas, como:

$$d_c = \frac{d_f}{\sqrt{1-n}} \quad (2.2)$$

onde:

d_c = distância média entre as constrições;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil.

A curva de distribuição de tamanhos de constrições é uma característica intrínseca do material não-tecido que está relacionada com parâmetros tais como, a porosidade e o diâmetro das fibras. Segundo Kenney et al. (1984), a curva de distribuição de constrição é estimada para meios granulares a partir de uma analogia com a curva de distribuição de tamanhos de partículas tradicionalmente usada em engenharia geotécnica. Considerando-se um bloco de geotêxtil contendo um número considerável de constrições, é possível obter as curvas de distribuição de tamanhos de constrições como mostrado na Figura 2.5 (Giroud et al., 1998). O tamanho de constrição varia na faixa correspondente a C_0 , o tamanho da menor constrição, até C_{100} , o tamanho da maior constrição no material considerado, onde 100% das constrições são menores ou iguais a C_{100} . Segundo Giroud et al. (1998), a consideração de que o menor tamanho de constrição $C_0 = 0$ (as fibras se encontrando em um só ponto) não procede do ponto de vista de filtração, pois a partícula que encontra uma constrição menor não será parada, mas divergida lateralmente. As partículas não seguem necessariamente um caminho reto, selecionando naturalmente o caminho que opõe menor resistência.

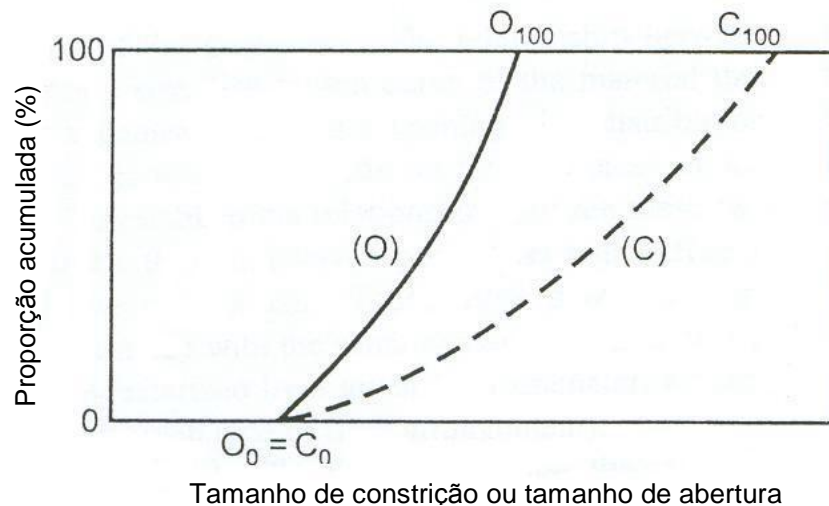


Figura 2.5 – Curva de distribuição de tamanhos de constrição (C) e curva de distribuição de tamanhos de abertura (O) para um geotêxtil não-tecido.

Em cada caminho de filtração há uma constrição que é menor do que as demais. Esta constrição determina o tamanho da maior partícula que pode passar através do geotêxtil seguindo o caminho de filtração considerado. Esta constrição foi denominada, segundo terminologia proposta por Kenney et al. (1984) para filtros granulares, de constrição de controle do caminho considerado.

Segundo Giroud et al. (1998), em um filtro de geotêxtil não-tecido há muitos caminhos diferentes de filtração. Para um geotêxtil não-tecido os tamanhos das aberturas variam de O_0 , o tamanho da menor abertura, até O_{100} , o tamanho da maior abertura no geotêxtil considerado. Em outras palavras, 100% das aberturas do geotêxtil não-tecido são menores ou iguais a O_{100} , sendo O_{100} denominada de abertura de filtração do geotêxtil “geotextile opening size”.

A curva de distribuição de tamanhos de constrição do geotêxtil é uma característica intrínseca do material que constitui o geotêxtil, enquanto que a curva de distribuição do tamanho de aberturas é uma característica do geotêxtil (Giroud et al., 1998). A relação entre as duas curvas depende da espessura do geotêxtil como mostra a Figura 2.6. Estudos efetuados (Fayoux & Evon, 1982; Rigo et al., 1990; Bhatia et al., 1994; Vermeersch & Mlynarek, 1996; Palmeira & Gardoni, 2000a), mostraram que o tamanho de abertura de um geotêxtil não-tecido tende a um limite finito com o aumento da espessura.

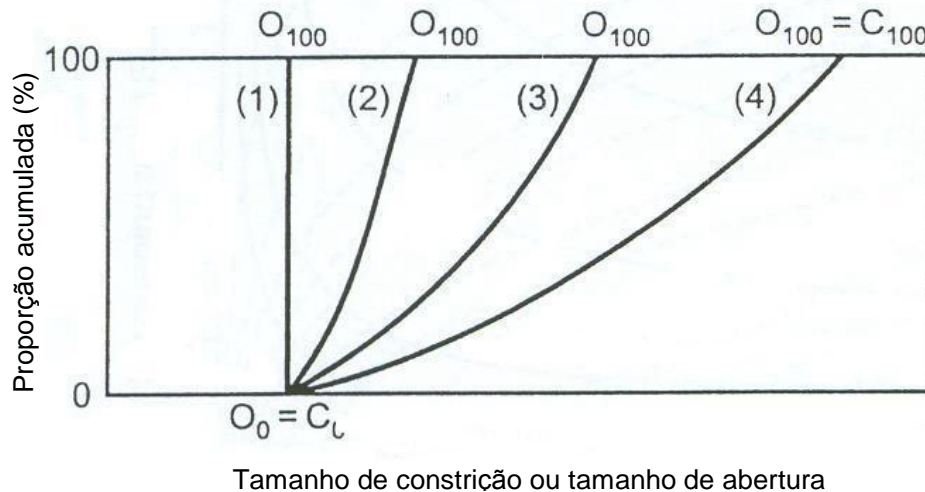


Figura 2.6 – Curvas de distribuição do tamanho de abertura: (1) infinitamente espesso; (2) espesso; (3) fino; (4) infinitamente fino.

Do ponto de vista prático, a abertura de filtração (O_f) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante em dimensionamento de filtros de geotêxteis, sendo definida como o diâmetro da maior partícula de solo capaz de atravessar a manta de geotêxtil.

Giroud (1996) propõe uma equação semi-empírica para a abertura de filtração:

$$\frac{O_f}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1-n}} - 1 + \frac{\xi_n}{(1-n)t_{GT}/d_f} \quad (2.3)$$

Esta equação é equivalente a:

$$\frac{O_f}{d_f} = \left[\frac{t_{GT}/d_f}{M_A/(\rho_f d_f)} \right]^{1/2} - 1 + \frac{\xi \left[1 - \frac{M_A/(\rho_f d_f)}{t_{GT}/d_f} \right]}{M_A/(\rho_f d_f)} \quad (2.4)$$

onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

M_A = gramatura do geotêxtil;

x = parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio.

As Equações 2.3 e 2.4 mostram que para um geotêxtil submetido a tensão de compressão, os valores da espessura e porosidade são reduzidos, o que implica em redução da abertura de filtração. A Equação 2.3 representa uma família de curvas para valores constantes de porosidade (curvas de traçado cheio, Figura 2.7), mas diferentes valores de espessura, ou seja, diferentes valores de O_f/d_f . A Equação 2.4 representa uma outra família de curvas com valores constantes de $M_A/(r_f d_f)$ (curvas tracejadas, Figura 2.7). Para um geotêxtil submetido à tensão de compressão, os valores da espessura são reduzidos e, assim, o valor da abertura de filtração. A Figura 2.7 mostra as famílias de curvas resultantes das extensões propostas por Giroud (1996).

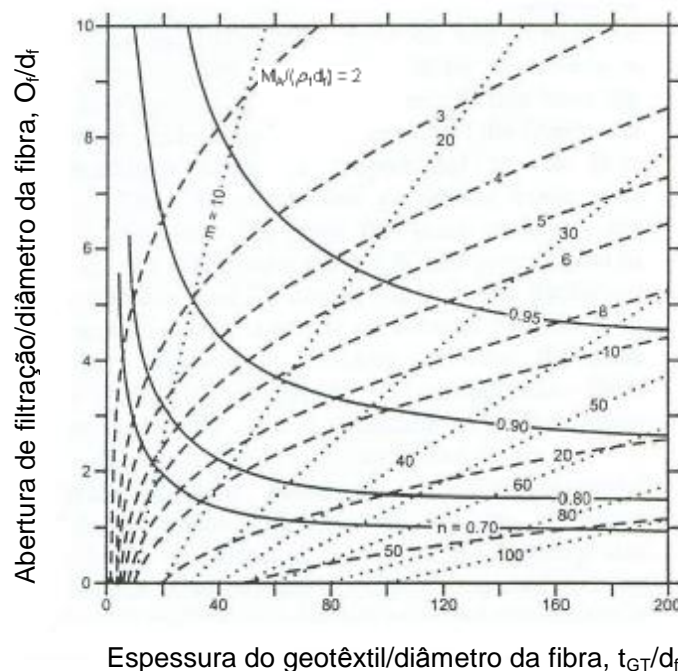


Figura 2.7 – Representação gráfica das extensões teóricas propostas por Giroud (1996).

Uma terceira família de curvas (curvas pontilhadas, Figura 2.7) foi obtida levando em consideração o número de confrontos, que é igual à razão entre a espessura e a distância entre as restrições dadas pela Equação 2.2.

Faure et al. (1990), utilizando soluções estatísticas, apresentaram um método para estimar a abertura de filtração de um geotêxtil não-tecido em função da sua porosidade e do diâmetro das suas fibras.

Um grande número de métodos tem sido desenvolvido para medir o tamanho de abertura de filtração do geotêxtil. Estes métodos são classificados segundo Giroud (1996) como:

- Métodos que consistem em peneiramento de partículas de areia calibradas ou esferas de vidro através do espécime do geotêxtil, podendo ser caracterizados por: peneiramento seco (Calhoun, 1972; Gerry & Raymond, 1983), peneiramento úmido e peneiramento hidrodinâmico (Fayoux, 1977; Mlynarek et al., 1993);
- Métodos baseados na análise morfológica (análise de imagens) de seções transversais de geotêxteis, onde os poros são preenchidos com resina (Rollin et al., 1977) usando um tratamento matemático para derivar a distribuição de tamanho de poros de medidas feitas na seção;
- Métodos baseados no fenômeno da capilaridade: intrusão de mercúrio (Prapaharan et al., 1989) e “bubble point” (Bhatia et al., 1994; Fischer, 1994; Bhatia & Smith, 1995; Vermeersch & Mlynarek, 1996; Palmeira & Gardoni, 2000a).

O processo mais comumente utilizado na determinação da abertura de filtração tem sido o emprego de técnicas de peneiramento, utilizando-se o próprio geotêxtil em substituição à malha da peneira. A abertura de filtração é então determinada por meio da análise granulométrica do material passante pelo geotêxtil (Palmeira & Fannin, 1998). Valores comumente utilizados são o AOS “Aparent Opening Size” e o FOS “Filtration Opening Size”, que estão associados aos diâmetros correspondentes a 95% do material passante pelo geotêxtil para os ensaios de peneiramento seco e hidrodinâmico, respectivamente.

Basicamente, a técnica de peneiramento pode ser dividida em três tipos: o peneiramento seco, que consiste de vibrações de partículas de areia ou esferas de vidro para que passem através

do geotêxtil; o peneiramento úmido, que consiste do peneiramento por vibração enquanto a água é jogada sobre as partículas de areia ou esferas, e o peneiramento hidrodinâmico, em que as partículas de areia ou esferas de vidro são depositadas sobre o espécime de geotêxtil, contido em um recipiente, e o conjunto é submetido a um fluxo alternado de água pela imersão repetida dentro de um tanque de água.

Comparações entre os diferentes tipos de ensaios de peneiramento têm sido feitas. Faure et al. (1990), Rigo et al. (1990), Gourc & Faure (1990), Bhatia et al. (1994) e Fischer (1994) apresentaram excelentes comparações entre os resultados obtidos por peneiramento hidrodinâmico ou peneiramento úmido com partículas de areia.

É importante observar que o resultado obtido para a abertura de filtração pode também ser afetado pelo material granular empregado no peneiramento (solo ou micro-esferas de vidro). A abertura de filtração de geotêxteis também depende da tensão normal atuante sobre a manta geotêxtil. No caso de geotêxteis não-tecidos agulhados, a abertura deixada pela agulha na manta pode ser um fator determinante no valor de sua abertura de filtração, particularmente para as mantas de maior gramatura (Palmeira & Fannin, 1998).

Os métodos baseados no peneiramento são métodos diretos, pois permitem obter o tamanho máximo de partículas que pode passar através de um geotêxtil. Os grãos de solo passantes pelo geotêxtil no processo de peneiramento estão associados com o tamanho de constrição entre os poros, que é o que governa a filtração. Por outro lado, os métodos da análise de imagens e da capilaridade são métodos indiretos, pois requerem cálculos para derivar os tamanhos de abertura de filtração a partir das medidas efetuadas.

O método da análise de imagens foi desenvolvida por Rollin et al. (1977). O espaço de poros do geotêxtil é preenchido por uma resina transparente e a utilização de um analisador de imagens permite a visualização dos poros e a obtenção de medidas em seções transversais do geotêxtil. Um tratamento matemático é então usado para derivar a curva de distribuição de tamanho de poros. Segundo Wittmann (1982), os resultados obtidos com o analisador de imagens são mais relevantes para o tamanho de poros do que para o tamanho de constrições.

Os métodos de análise da distribuição de poros por medidas de tensão capilar fornecem informações de volume de poros e não de abertura de filtração, que é o fator relevante para a filtração. Prapaharan et al. (1989), viabilizaram uma sistemática para determinação da

distribuição de poros, valendo-se de uma técnica de intrusão de mercúrio. Segundo Bathia (1994), a intrusão de mercúrio pode fornecer dados errôneos de tamanho de poros, pois, por se tratar de um metal pesado, o mercúrio pode causar deslocamento das fibras do geotêxtil durante o ensaio.

Vermeersch & Mlynarek (1996) e Palmeira & Gardoni (2000a) mostraram que é possível obter medidas acuradas de tamanho de aberturas de filtração, mesmo sob tensão de compressão, com o método do “bubble point”. O método do “bubble point” combina medidas de tensão capilar com medidas de fluxo de um fluido através do espécime de geotêxtil. Este método é baseado no princípio do fluxo capilar, no qual o material poroso somente permitirá a passagem do líquido quando a tensão aplicada exceder a atração capilar do líquido no maior poro. O método completo é baseado em dois teste, um teste úmido e um teste seco. No teste úmido o material poroso é saturado com líquido que é facilmente absorvido por todos os poros do geotêxtil. A tensão de ar é então gradualmente aplicada de um lado do geotêxtil saturado, e para uma tensão crítica, a primeira bolha da ar atravessará o maior poro do geotêxtil. Esta tensão empurra o líquido para fora deste poro, e é conhecida como o ponto de bolha. Este ponto é então usado para calcular o tamanho de poro máximo do geotêxtil. O fluxo de ar e a tensão aplicada são automaticamente registrados pelo porosímetro. No final do teste úmido, todos os poros estão vazios. Os dados registrados são plotados em uma curva de vazão versus tensão aplicada.

O teste seco é conduzido imediatamente após o teste úmido sem a manipulação da amostra. Durante este teste, o fluxo de ar atravessa todos os poros do material. No final do teste, uma segunda curva de vazão versus tensão aplicada é traçada.

Duas características da curva de distribuição de tamanho de poros são imediatamente avaliadas: o tamanho máximo de poros O_{98} (“bubble point” ou BBP) e o mínimo tamanho de poros O_2 , definido como o tamanho de poro para o momento quando o fluxo do teste úmido é 98% do fluxo do teste seco.

2.3.1.2 - Propriedades Hidráulicas

A finalidade de um filtro em uma estrutura geotécnica é permitir a passagem de fluidos, retendo a massa de solo de forma que o conjunto seja estável, ou seja, o geotêxtil deve

satisfazer os requisitos de permeabilidade e retenção do solo, ambos contraditórios tendo em vista que a permeabilidade do filtro aumenta com o aumento do tamanho dos poros.

Um filtro deve ser suficientemente permeável para permitir a passagem da água livremente. Isto é quantificado pela determinação da permeabilidade do filtro, que deve atender a dois requisitos: a tensão de água no solo, junto à interface com o filtro, deve ser igual àquela que ocorreria sem a presença do filtro e não deve ocorrer decréscimo significativo da vazão de fluxo devido à presença do filtro (Giroud, 1996).

A permeabilidade do geotêxtil sob condições de fluxo laminar pode ser obtida pela Lei de Darcy:

$$v = k \cdot i \quad (2.5)$$

onde:

v = velocidade aparente de fluxo;

k = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

i = gradiente hidráulico.

Quando o geotêxtil trabalha como elemento de filtro é necessário conhecer sua permeabilidade na direção normal ao plano da manta, ou seja, sua permissividade (Figura 2.8 a).

A permissividade, razão entre a permeabilidade normal ao plano do geotêxtil e sua espessura, é definida por:

$$Y = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (2.6)$$

onde:

k_n = coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

Uma vez que k_n e t_{GT} variam de forma diferente com a tensão normal, a permissividade do geossintético também é dependente da tensão normal.

Segundo Gourc (1982), para dois geotêxteis de estruturas e porosidades idênticas, mas de espessuras diferentes, o valor de k será o mesmo, mas as permissividades serão inversamente proporcionais às respectivas espessuras. O coeficiente de permeabilidade é uma propriedade intrínseca do geotêxtil e varia com a porosidade da manta.

Quando há interesse na consideração de drenagem através do geotêxtil é necessário conhecer sua permeabilidade transversal, indicada pela capacidade que a manta possui de conduzir fluido no seu próprio plano, ou seja, sua transmissividade (Figura 2.8 b).

A transmissividade, produto da permeabilidade no plano do geotêxtil por sua espessura, é definida por:

$$q = k_p \cdot t_{GT} \quad (2.7)$$

onde:

k_p = coeficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

Na Figura 2.8 estão esquematizadas as condições de fluxo associadas à permissividade e à transmissividade do geotêxtil.

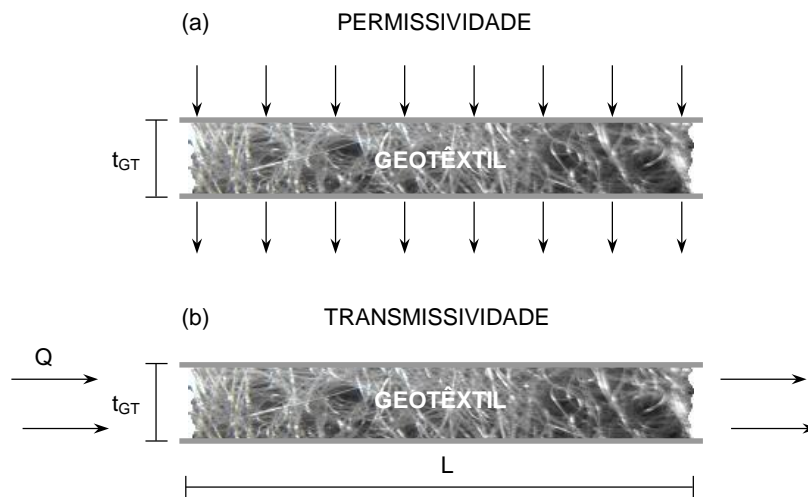


Figura 2.8 – Propriedades hidráulicas do geotêxtil (modificado – Gardoni, 1995)

Os drenos não-tecidos homogêneos, geralmente os agulhados, possuem uma estrutura constituída de um conjunto de fibras aleatoriamente distribuídas numa manta. Segundo Faure et al. (1990), a massa de fibras por unidade de área, sob condição de tensão nula, intervem indiretamente na transmissividade.

Gardoni & Palmeira (1998) e Gardoni et al. (2000) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade com geossintéticos sob condições de tensão de compressão e constataram que a gramatura possui influência na transmissividade dos geotêxteis não-tecidos agulhados de poliéster analisados. Para os geocompostos com diferentes gramaturas avaliados neste mesmo estudo, os resultados mostraram o mesmo comportamento de transmissividade encontrado para os geotêxteis não-tecidos. No presente caso, a tensão de compressão e a gramatura do produto são as variáveis de maior influência na transmissividade. No entanto, a espessura é um parâmetro físico de significativa influência nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos. Raumann (1982), Koerner & Sandey (1982), Campbell & Wu (1994) e Giroud et al. (2000) chegaram a conclusões semelhantes em estudos de transmissividade de geotêxteis tecidos, não-tecidos e georredes.

Os filtros são submetidos a tensões durante a construção e em serviço, porém apesar dos geotêxteis serem extensivamente usados em obras de engenharia, o conhecimento do comportamento destes materiais sob compressão ainda é pequeno. Em relação às tensões durante a construção, Giroud (1996) faz os seguintes comentários:

- A compactação pode causar a quebra de algumas partículas de solo o que pode alterar a distribuição de tamanho de partículas, com repercussão nos critérios de filtro;
- Altas tensões de compressão geralmente não afetam os filtros granulares, mas os geotêxteis não-tecidos são muito compressíveis, o que acarreta os seguintes efeitos: (a) como o geotêxtil não-tecido comprime, sua abertura de filtração decresce; (b) a transmissividade hidráulica decresce com o decréscimo da espessura e (c) em um geocomposto para drenagem, a cobertura de geotêxtil não-tecido pode penetrar nos vazios da georrede interna diminuindo a capacidade drenante do geocomposto.

Como os geotêxteis são materiais de elevada porosidade, a possibilidade de ocorrência de fluxo turbulento para gradientes relativamente pequenos é bastante significativa. Como na maioria das situações práticas tem-se condição de fluxo laminar, é importante a identificação dos limites de gradiente que garantem tal condição. Isto é conseguido através da definição do número de Reynolds para mantas têxteis, obtido a partir do estudo de fluxo através de tubos capilares, e dado por Giroud (1996):

$$R_{eg} = \frac{4\sqrt{2b} r_w v}{h_w (1-n) S_s} \quad (2.8)$$

onde:

R_{eg} = número de Reynolds do meio permeável;

b = fator de forma, função da tortuosidade do meio;

r_w = massa específica do fluido (para a água, 1000 kg/m³);

v = velocidade aparente de fluxo;

h_w = viscosidade do fluido (para a água, 10⁻³ kg⁻¹s⁻¹);

n = porosidade do geotêxtil;

S_s = superfície específica dos sólidos (relação entre a área do sólido e seu volume).

Os valores de b indicados para os geotêxteis não-tecidos em função da porosidade são (Giroud, 1996): 0,09 para $n = 0,90$; 0,10 para $n = 0,85$; 0,11 para $n = 0,80$ e 0,115 para $n = 0,60$ a $0,70$.

Para uma fibra têxtil com forma cilíndrica tem-se:

$$S_s = \frac{\text{área}}{\text{volume}} = \frac{\rho d_f L}{\frac{L \rho d_f^2}{4}} = \frac{4}{d_f} \quad (2.9)$$

onde:

L = comprimento das fibras do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil.

Gourc (1982) sugere que R_{eg} seja menor que 5 para se ter fluxo laminar em geotêxteis não-tecidos. Assim, através da Lei de Darcy, da Equação 2.9 e para $R_{eg} = 5$, obtém-se:

$$i_{lim} = \frac{5h_w (1-n)}{\sqrt{2b} r_w d_f k} \quad (2.10)$$

onde:

i_{lim} = gradiente limite para fluxo laminar;

k = permeabilidade do meio.

A forma mais tradicionalmente conhecida de relação entre permeabilidade e porosidade de um meio granular foi a obtida assumindo-se a solução de Koseny-Carman para o fluxo através de um meio composto de esferas com a mesma área específica da massa de solo, e dada por:

$$k = \frac{1r_w g n^3}{80h_w (1-n)^2} D_e^2 \quad (2.11)$$

onde:

r_w = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

n = porosidade do geotêxtil;

D_e = diâmetro das esferas;

h_w = viscosidade do fluido.

Lord (1955), citado por Palmeira (1996), apresentou a expressão abaixo para o fluxo de gases através de meio fibroso:

$$k = \frac{1r_w g n^5}{17,72h_w (1-n)^{1,32}} d_f^2 \quad (2.12)$$

Baseado na equação de Poiseuille para fluxo em tubos capilares, Giroud (1996) propôs a seguinte expressão para a estimativa da permeabilidade de um geotêxtil não-tecido, sob fluxo laminar, em função da sua porosidade:

$$k = \frac{br_w g}{16h_w} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_f^2 \quad (2.13)$$

Giroud (1996) também apresentou uma expressão relacionando permeabilidade do geotêxtil com a sua abertura de filtração (diâmetro do maior grão de solo capaz de atravessar a manta geotêxtil), escrita como:

$$k = \frac{r_w g n O_f^2}{32h_w} \quad (2.14)$$

onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil.

Se acuradas, as Equações 2.13 e 2.14 se tornam ferramentas bastante úteis para a previsão de permeabilidade de geotêxteis sob pressão. Palmeira (1996), Gardoni & Palmeira (1999) e Palmeira & Gardoni (2000a) aferiram as extensões teóricas apresentadas por Giroud (1996) com os resultados de ensaios de laboratório para mantas virgens não-tecidas e obtiveram boa concordância entre resultados.

Para o escoamento ao redor de um cilindro isolado, Gourc (1982) propôs a seguinte expressão:

$$k = \frac{g}{n} \frac{p}{2} \frac{d_f^2}{(1-n)} \frac{1}{C_D R_{eg}} \quad (2.15)$$

onde:

g = aceleração da gravidade;

ν = viscosidade cinemática;

C_D = coeficiente de arraste.

Rollin et al. (1982) utilizaram a Equação 2.15 para valores de C_D compreendidos entre 6 e 10 com números de Reynolds entre 1 e 10. Lombard (1985) determinou o coeficiente C_D dos geotêxteis não-tecidos termoligados não comprimidos e os números de Reynolds variaram de 0,1 a 10 durante os ensaios (Gardoni, 2000).

A Figura 2.9 mostra os resultados obtidos por Gourc (1982) para os modelos propostos.

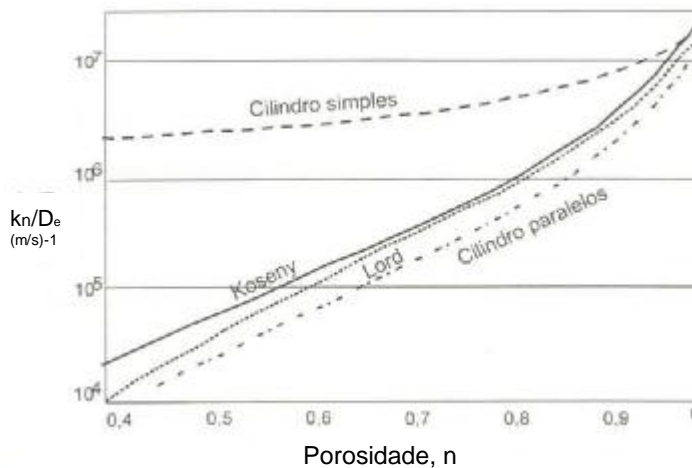


Figura 2.9 – Leis de permeabilidade propostas para os geotêxteis (Gardoni, 2000).

A sensibilidade do valor da permeabilidade com a estrutura é evidente para os geotêxteis e este aspecto é levado em conta nas extensões acima através dos coeficientes de ajuste (β e C_D , por exemplo). Do mesmo modo, uma anisotropia da estrutura das fibras pode traduzir-se em uma anisotropia de permeabilidade (Gourc, 1982; Gourc et al., 1982; Ionescu & Kellner, 1982; Faure et al., 1990 e Gardoni et al., 2000). A Figura 2.10 mostra um exemplo de anisotropia de permeabilidade para o geotêxtil de gramatura igual a 200 g/m².

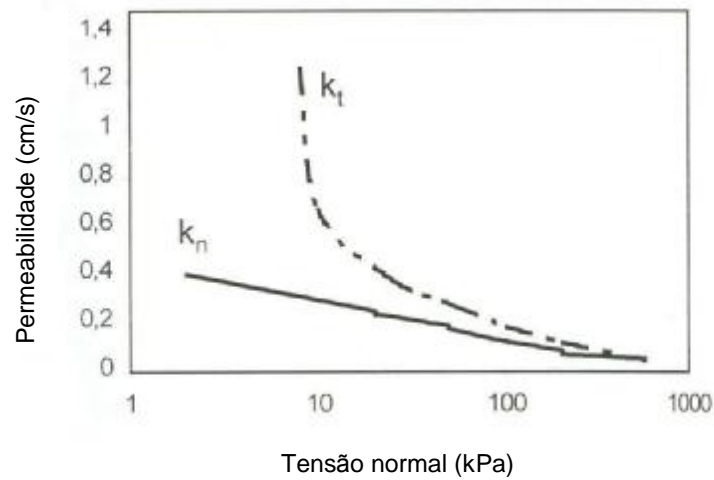


Figura 2.10 – Anisotropia de permeabilidade (modificado – Gardoni et al., 2000).

Segundo Fannin et al. (1998), uma relação curvilínea pode ser observada entre a vazão por unidade de área da manta ensaiada e o gradiente hidráulico, indicando um regime de fluxo não Darciano para as georredes e os geocompostos para drenagem. Embora esta natureza não Darciana do regime de fluxo seja reconhecida (Koerner, 1994; Campbell & Wu, 1994; Zhao & Montanelli, 1999) é possível analisar estes tipos de geossintéticos, considerando a analogia com a permeabilidade relativa definida para meios granulares.

2.3.1.3 - Propriedades Mecânicas

A compressibilidade de um geotêxtil, ou seja, a variação de sua espessura quando carregado é uma das propriedades mecânicas de particular importância no que diz respeito às suas propriedades hidráulicas. A alta compressibilidade do geotêxtil não-tecido impõe que a permeabilidade seja função da tensão normal a que ele é submetido (Gardoni, 1995).

Segundo Gardoni (2000), em aplicações como barragens, pilhas de rejeito de mineração, aterros, etc. as mantas sintéticas podem estar submetidas a cargas estáticas muito grandes e que podem alterar sua estrutura. Apesar do mecanismo de compressão do geotêxtil ser muito importante, a maioria dos trabalhos de pesquisas realizados foram efetuados com os geotêxteis sob condições de tensão nula ou sob níveis de tensão relativamente baixos (Rollin et al., 1982; Gourc et al., 1982; Vidal & Righetti, 1990; Fannin et al., 1994a, 1994b e 1998; Gardoni, 1995; Lafleur et al., 1996).

2.4 - CRITÉRIOS DE FILTROS

Os filtros, de maneira geral, devem possuir características específicas que assegurem um funcionamento efetivo. Para tanto, devem funcionar de forma a reter o solo sem que haja uma migração excessiva de partículas deste solo através do filtro e devem, ao mesmo tempo, permitir um fluxo livre do líquido no sistema.

Retenção do solo não significa prevenir a migração das partículas de solo e, portanto, que as maiores aberturas do filtro sejam necessariamente menores do que as menores partículas do solo. Reter o solo significa que o solo adjacente ao filtro permanecerá estável, ou seja, algumas partículas podem migrar para dentro ou através do filtro desde que a migração não afete a estabilidade da estrutura do solo (Giroud, 1994).

Diversos critérios têm sido desenvolvidos desde Calhoun (1972), todos consistindo de relações empíricas, mas embora sejam individualmente diferentes, tendem para resultados similares quando usados para solos de gradação comum (Lawson, 1982).

Os critérios de filtro disponíveis, basicamente comparam dimensões típicas de grãos do solo a serem retidos com a abertura de filtração do geotêxtil. A prática corrente também negligencia os efeitos da tensão normal atuante sobre a manta e da impregnação dos poros do geotêxtil por partículas de solo na capacidade de retenção do filtro geotêxtil.

Akagi (1994), analisando os critérios de filtros, apresenta quatro critérios para o desempenho de filtros com geotêxteis: Critério de Retenção, Critério de Permeabilidade, Critério de Anti-Colmatação e Critério de Durabilidade. Os quatro critérios foram examinados em detalhes por Christopher & Fisher (1992).

Normalmente, o critério de retenção é apresentado como uma relação entre o tamanho de partículas do solo e o tamanho de abertura de filtração do geotêxtil, como por exemplo:

$$O_f < N \cdot D \quad (2.16)$$

onde: O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

N = número que depende do critério utilizado;

D = diâmetro característico das partículas do solo a ser retido (D_{85} , por exemplo, que é o diâmetro correspondente a 85% passando).

O valor da abertura de filtração do geotêxtil é usualmente assumido como o valor do maior grão que passou pelo geotêxtil em ensaios de abertura de filtração. Um valor comumente utilizado é o O_{95} , que está associado ao diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passando.

Vários critérios têm sido propostos para os filtros de geotêxtil. Giroud (1996) propôs um critério de retenção com base no coeficiente de não-uniformidade do solo, definido como a razão entre os diâmetros das partículas correspondentes a 60% e 10 % dos grãos passando na curva de distribuição de tamanho de partículas do solo. Mlynarek et al. (1993), propuseram um critério baseado no tamanho de abertura de filtração. A Tabela 2.1 sumaria alguns critérios de dimensionamento de filtros geotêxteis que têm sido pesquisados e revisados por muitos autores e que podem ser encontrados na literatura.

Tabela 2.1 – Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).

Fonte	Critério	Aplicação
USACE – U. S. Army Corps of Engineers (1977)	$0.149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq 0.211 \text{ mm}$ $0.149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq D_{85}$	$D_{50} > 0.074 \text{ mm}$ $D_{50} \leq 0.074 \text{ mm}$ Geotêxteis não devem ser usados se $D_{85} < 0.074 \text{ mm}$
AASHTO Task Force #25 (1986)	$O_{95} < 0.59 \text{ mm}$ $O_{95} < 0.30 \text{ mm}$	Se $50\% \leq 0.074 \text{ mm}$ Se $50\% > 0.074 \text{ mm}$ Não há limitação quanto ao tipo de geotêxtil ou solo
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$ $O_{95} \leq 0.2 \text{ mm}$	Tecidos, solos com $\leq 50\%$ passando na peneira 200 Tecidos, solos coesivos
Zitscher, 1974	$O_{50}/D_{50} \leq 1.7 - 2.7$ $O_{50}/D_{50} \leq 2.5 - 3.7$	Tecidos, solos com $Cu \leq 2$, $D_{50} = 0.1$ a 0.2 mm Não-tecidos, solos coesivos
Ogink (1975)	$O_{90}/D_{90} \leq 1$ $O_{95}/D_{85} \leq 1.8$	Tecidos Não-tecidos

Tabela 2.1 – Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b) – cont.

Fonte	Critério	Aplicação
Sweetland (1977)	$O_{15}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não-tecidos, solos com $C_u = 1.5$ Não-tecidos, solos com $C_u = 4$
Schober & Teindl (1979)	$O_{90}/D_{50} \leq 2.5 - 4.5$ $O_{90}/D_{50} \leq 4.5 - 7.5$	Tecidos e Não-tecidos finos, dependendo de C_u Não-tecidos espessos, dependendo of C_u , solos arenosos e siltosos
Millar, Ho & Turnbull (1980)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Tecidos e Não-tecidos
Rankilor (1981)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não-tecidos, solos com $0.02 \leq D_{85} \leq 0.25 \text{mm}$ Não-tecidos, solos com $D_{85} > 0.25 \text{mm}$
Giroud (1982)	$O_{95}/D_{50} < C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 9/C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 1.5C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 13.5/C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 2C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 18/C'_u$	$I_D < 35\%$, $1 < C'_u < 3$ $I_D < 35\%$, $C'_u > 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $1 < C'_u < 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $C'_u > 3$ $I_D > 65\%$, $1 < C'_u < 3$ $I_D > 65\%$, $C'_u > 3$ Assume migração de finos do solo para C_u elevado
Carroll (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2 - 3$	Tecidos e Não-tecidos
Mlynarek (1985), Mlynarek et al. (1990)	$2 D_{15} < O_{95} < 2 D_{85}$	Não-tecidos
Lawson (1986)	$O_{90}/D_n = C$	Desenvolvido para solos residuais de Hong Kong Valores de n e C são obtidos através de dados da região de ensaios em filtros
John (1987)	$O_{95}/D_{50} \leq (C'_u)^a$	a é dependente do tamanho da partícula a ser retida (a = 0.7 for D_{85})
FHWA – Christopher & Holtz (1985)	$O_{95}/D_{85} \leq 1 - 2$ $O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou $O_{50}/D_{85} \leq 0.5$	Dependendo do tipo de solo e C_u . Fluxo dinâmico, pulsante e cíclico, se o solo pode mover para o filtro geotêxtil
CFGG (1986) – French Committee on Geotextiles and Geomembranes	$O_f/D_{85} \leq 0.38 - 1.25$	Dependendo do tipo de solo, condições hidráulicas, compactação e condições de aplicação
Grenoble / École Polytechnique	$O_{95}/D_{85} \leq 1.5$ $1.5 < O_{95}/D_{85} < 3.0$	Solos uniformes Solos bem graduados
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 0.8$ $O_{95}/D_{15} \leq 1.8 - 7.0$ $O_{50}/D_{50} \leq 0.8 - 2.0$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, dependendo do C_u do solo
Canadian Geotechnical Society – CGS (1992)	$O_f/D_{85} < 1.5$ $O_f/D_{85} < 3.0$	Solos uniformes Solos amplamente graduados
UK DTP – Murray and McGown (1992), from Corbet (1993)	$O_{90}/D_{90} = 1$ a 3 $O_{90}/D_{90} < 1$ a 3 $O_{90}/D_{50} < 1.8$ a 6	Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não-tecidos Solos com with $5 < C_u < 10$, tecidos e não-tecidos finos ($t_{GT} \leq 2 \text{mm}$) - alternativo Solos com $5 < C_u < 10$, não-tecidos espessos ($t_{GT} > 2 \text{mm}$) – critério alternativo
Fannin et al. (1994) - UBC	$O_f/D_{85} < 1.5$ e $O_f/D_{50} < 1.8$ $O_f/D_{85} < 0.2$, $O_f/D_{50} < 2.0$, $O_f/D_{50f} < 2.5$ e $O_f/D_{15} < 4.0$	Não-tecidos, $1 < C_u < 2$ Não-tecidos, $3 < C_u < 7$

Tabela 2.1 – Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b) – cont.

Fonte	Critério	Aplicação
Bhatia and Huang (1995)	$O_{95}/D_{85} < 0.65 - 0.05C_c$ $O_{95}/D_{85} < 2.71 - 0.36C_c$ $O_{95} < D_{85}$	$n_{GT} < 60\%$ e $C_c > 7$ $n_{GT} < 60\%$ e $C_c < 7$ $n_{GT} < 60\%$
Lafleur (1999)	$O_f/D_I < 1$ $1 < O_f/D_I < 5$	Solos estáveis ($C_u \leq 6$ e $D_I = D_{85}$ neste caso), solos com $C_u > 6$ mas linearmente graduados ($D_I = D_{50}$, neste caso), mal graduado ($C_u > 6$) solos internamente estáveis ($D_I = D_G$) e solos com $C_u > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e internamente estáveis ($D_I = D_{30}$) Solos instáveis: $D_I = D_{30}$ para solo mal graduado internamente instável com curva granulométrica côncava para cima (rico de migração de finos). Critério desenvolvido para solos sem coesão

Notas: O_X = abertura de filtração do geotêxtil correspondente a “X” tamanho de partícula baseado no peneiramento seco de esferas de vidro, O_f = abertura de filtração baseada no peneiramento hidrodinâmico, D_I = tamanho indicativo de solo de base protegido, D_G = tamanho mínimo do solo, D_Y = partícula do solo correspondente a “Y” por cento passando, C_u = coeficiente de não-uniformidade do solo = D_{60}/D_{10} , C'_u = coeficiente linear de uniformidade do solo = $(D'_{100}/D'_{10})^{0.5}$, D'_Y = partícula de solo correspondente a “Y” por cento passando obtida através de uma linha reta passando na parte central da curva granulométrica, I_D = densidade relativa, t_{GT} = espessura do geotêxtil, C_c = coeficiente de curvatura do solo = $(D_{30})^2/(D_{60} \cdot D_{10})$, D_{50f} = fração de partículas do solo menores que o valor de O_f do geotêxtil, n_{GT} = porosidade do geotêxtil.

Segundo Giroud (1994), para que um filtro possa reter satisfatoriamente um solo, algumas condições são requeridas:

- O solo deve possuir uma distribuição uniforme das partículas (solo bem graduado) e se encontrar no estado denso que assegure uma perfeita interação entre as partículas;
- As aberturas do filtro de geotêxtil devem ser devidamente selecionadas;
- O solo deve estar em contato íntimo com o filtro de geotêxtil, não havendo espaço aberto entre o solo e o geotêxtil para onde as partículas possam se mover ou acumular.

Quando as condições acima são satisfeitas e houver um fluxo d'água, algumas poucas partículas, que não se encontram consolidadas na matriz do solo, irão mover-se em direção ao filtro geotêxtil e mesmo que não passem através dele não poderão causar nenhum dano ao mesmo. Porém, se as condições acima não são satisfeitas, as partículas de solo que se

deslocam devido ao fluxo d'água, se não passarem através do geotêxtil podem interagir com ele de três diferentes formas: cegando (“blinding”), bloqueando (“blocking”) ou colmatando fisicamente (“clogging”) o geotêxtil. No cegamento (Figura 2.11a), somente uma pequena parcela dos solos bloqueia internamente os vazios do geotêxtil, enquanto as aberturas superficiais da manta são fechadas por partículas (“cake”). Este é um mecanismo particularmente relevante em solos que apresentam curva granulométrica descontínua (solos de graduação aberta) e que são sujeitos ao fenômeno de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo). No bloqueamento (Figura 2.11b), o geotêxtil pode perder consideravelmente a sua permeabilidade devido ao fechamento dos vazios superficiais por partículas de solo retidas. Na colmatção física (Figura 2.11c), as partículas de solo ficam impregnadas dentro do geotêxtil. A descrição detalhada destes processos pode ser vista em Spada (1992).

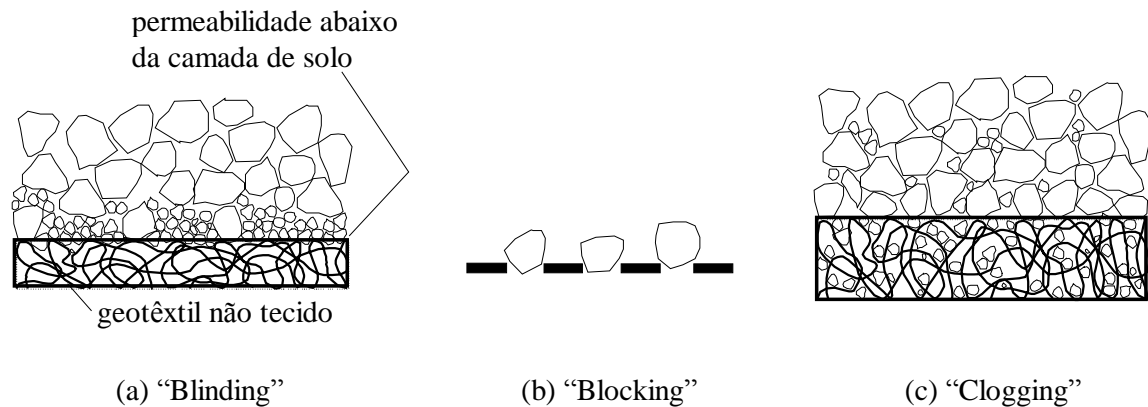


Figura 2.11 – Mecanismos de colmatção em filtros de geotêxtil (Palmeira & Gardoni, 2000b).

Relações como a dada pela Equação 2.16 são válidas somente se o solo é internamente estável, ou seja, a curva de distribuição de tamanho de partículas é contínua. Segundo Giroud (1994), a continuidade da curva de distribuição de tamanho de grãos é necessária, mas não suficiente para assegurar a estabilidade interna de um solo não coesivo. Assim, é essencial distinguir entre solos internamente estáveis e internamente instáveis, para a definição do projeto de filtro.

Os parâmetros que podem intervir na retenção de partículas (Gourc, 1982) são:

- A porometria (dimensão e uniformidade dos diâmetros de poros);

- A porcentagem de vazios, caracterizada pela porosidade para um geotêxtil não-tecido e pela porcentagem de área de vazios para um geotêxtil tecido;
- A espessura, sendo que a retenção para um geotêxtil espesso pode ocorrer dentro da matriz de fibras (colmatação interna) e na interface para um geotêxtil fino.

Assim, a concepção de um filtro sintético requer o conhecimento das condições de bloqueio das partículas pelo meio fibroso, a qual depende da espessura e da distribuição do tamanho de poros (Gardoni, 2000).

O critério de permeabilidade está baseado no conceito de que o geotêxtil deve proporcionar uma adequada capacidade de fluxo e também deve ter uma permeabilidade suficientemente alta para prevenir algum excesso de poro-pressão após sua instalação e funcionamento (Matheus, 1997).

A maioria das mantas, devido à sua porosidade e pequena espessura, introduz pequena perda de carga hidráulica no sistema. Portanto, todos os critérios e permeabilidade propostos são baseados no princípio de que a manta deve ser suficiente permeável de modo a evitar o desenvolvimento de pressão d'água e providenciar capacidade de fluxo adequada. A Tabela 2.2 sumaria alguns critérios de permeabilidade para o dimensionamento de filtros geotêxteis.

Tabela 2.2 – Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).

Fonte	Critério	Aplicação
Calhoun (1972), Schober & Treindl (1979), Wates (1980), Carroll (1983), Christopher & Holtz (1985); e outros	$k_f \geq k_s$	Fluxo estacionário, aplicações não críticas e condições de solo não severas.
Carroll (1983); e Christopher & Holtz (1985)	$k_f \geq 10 k_s$	Aplicações críticas e condições severas de solo ou hidráulica.
Giroud (1982)	$k_f \geq k_s$	Sem fator de segurança.
CFGG (1986)	Baseado na ψ , com $\psi \geq 10^{3-5} k_s$	Situação crítica $10^5 k_s$; Situação menos crítica $10^4 k_s$; Areias limpas $10^3 k_s$.
Corbet (1993)	$k_f > 10 k_s$ $k_f > 100 k_s$	Tecidos e não-tecidos finos ($t_{GT} \leq 2\text{mm}$); Não-tecidos espessos ($t_{GT} > 2\text{mm}$).
Lafleur (1999)	$k_f > 20 k_s$	Solos não coesivos.

Notas: k_f = coeficiente de permeabilidade do filtro, k_s = coeficiente de permeabilidade do solo, t_{GT} = espesura do geotêxtil.

O critério de anti-colmatação exige que a maioria das aberturas seja larga o suficiente para deixar passar as partículas pequenas através do filtro de modo a que ele não colmate (Gardoni, 1995).

O critério de durabilidade exige que o filtro seja resistente e durável para sobreviver ao processo de instalação e às condições operacionais durante sua vida útil (Akagi, 1994).

Os critérios usuais para filtros de geotêxtil não consideram a influência da tensão de compressão e nem a colmatação parcial dos filtros antes do início da sua vida útil devido ao espalhamento e compactação do solo sobre a manta. 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 necessária uma revisão geral dos critérios (Gardoni, 2000).

2.5 - APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

São inúmeros os casos de utilização de geotêxteis em obras de grande porte na engenharia civil. Alguns dos casos de maior relevância apresentados por Gardoni (2000), pelo tamanho da obra e condições severas de tensão de compressão a que os geotêxteis foram submetidos serão apresentados a seguir:

2.5.1 - BARRAGEM DE VALCROS – FRANÇA

A barragem de Valcros foi construída na França em 1970. É uma barragem de terra homogênea, com 20 m de altura e 140 m de comprimento, com taludes de jusante e de montante de 1V:3H (Faure et al., 1999). Nesta obra o geotêxtil foi usado para cumprir as seguintes funções:

- À jusante, como filtro para dreno de pé, sendo o material granular envolvido por um geotêxtil não-tecido com gramatura de 300g/m^2 ;
- À montante, como filtro sob 250 mm de enrocamento colocado diretamente sobre um geotêxtil não-tecido de poliéster de gramatura igual a 400g/m^2 .

Segundo Faure et al. (1999) esta foi a primeira vez que o geotêxtil foi usado em uma barragem de terra. Foram analisadas amostras do geotêxtil retiradas à montante da barragem, a uma profundidade de 4 m, e no filtro situado à jusante, em uma região ao nível d'água do reservatório e, por isso, constantemente sujeita a ondas. Foram retiradas três amostras em

diferentes alturas do recobrimento de geotêxtil. Amostras de solo foram coletadas nos mesmos locais das amostras de geotêxtil, bem como blocos de solo e geotêxtil. A Figura 2.12 mostra um desenho esquemático da amostragem feita na barragem.

Foram efetuados ensaios nas amostras de geotêxtil, tais como: gramatura, espessura, resistência à tração, abertura de filtração, nível de impregnação por solo e permissividade.

Resultados de ensaios efetuados em diferentes épocas (1976 e 1992) não apresentaram nenhuma diferença nas características de resistência, ou seja, após vinte anos de uso, os geotêxteis apresentavam um desempenho mecânico tão bom quanto o original. Em relação às propriedades hidráulicas, a permissividade foi ligeiramente mais baixa para as amostras coletadas sob o enrocamento do que aquelas coletadas entre elementos de enrocamento. Isto pode ser devido às tensões de compressão nos pontos de contato. Assim, as propriedades hidráulicas dos geotêxteis exumados à montante e jusante estavam conservadas após 20 anos de uso no solo.

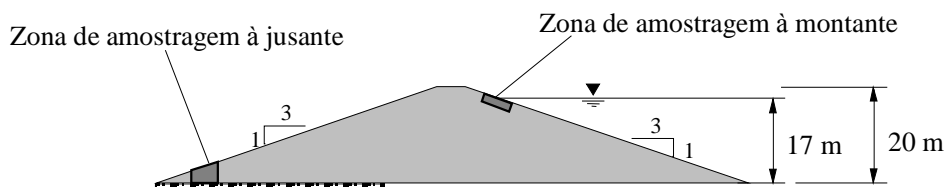


Figura 2.12 – Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure et al., 1999).

2.5.2 - BARRAGEM DE TUCURUÍ – PARÁ/BRASIL

A barragem de Tucuruí é uma das maiores do mundo e situa-se na região Amazônica, ao norte do Brasil, no rio Tocantins (Dib & Aguiar, 1986). Sua construção foi iniciada em 1976, sendo finalizada em 1984. Tucuruí foi a primeira grande barragem construída numa floresta tropical. Seu reservatório, com 2.875 km², é o maior lago artificial nesse tipo de ecossistema.

Nesta obra o geotêxtil foi empregado como barreira “anti-piping” devido às suas propriedades de filtro e à presença de canículos no solo de fundação. Foi utilizado o geotêxtil não-tecido, agulhado de filamentos contínuos de poliéster da marca Bidim OP-60, atualmente fabricado pela BBA. A manta de geotêxtil foi instalada sobre a face do “cut-off” à jusante com um recobrimento mínimo necessário. O desempenho do sistema até a presente data tem sido totalmente satisfatório. A Figura 2.13 mostra a seção transversal da barragem onde é indicada a posição do geotêxtil.

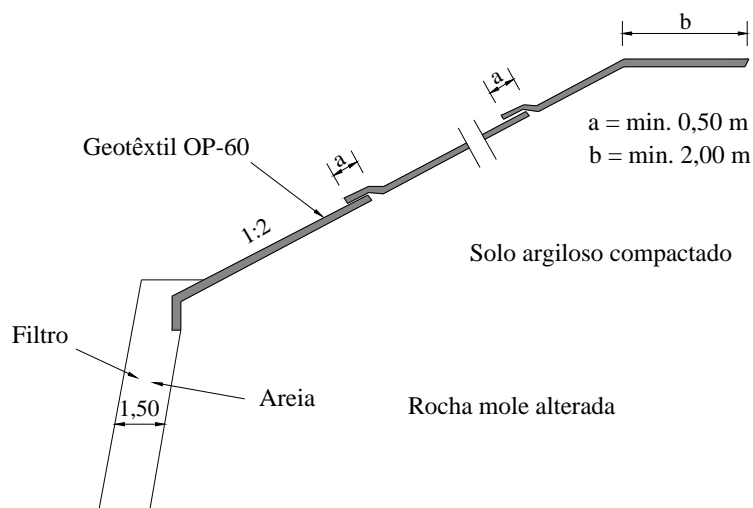


Figura 2.13 – Detalhe da colocação do geotêxtil na barragem de Tucuruí (modificado – Dib & Aguiar, 1986).

2.5.3 - BARRAGEM DE REJEITOS DE MINA DE OURO

Barragens de rejeito de mineração com utilização de geotêxteis foram construídas no noroeste do estado de Orange Free, África do Sul, nos anos compreendidos entre 1976 e 1982 (Bentel et al., 1982).

O geotêxtil não-tecido, agulhado de filamentos contínuos do tipo OP-30 foi empregado em 4 drenos cegos, um dreno de pé do talude, no poço de alívio e no dreno de saída, a fim de assegurar a estabilidade de um dique de vedação, com as seguintes finalidades:

- Acelerar a consolidação e, conseqüentemente, obter um ganho de resistência do material depositado no dique de vedação;
- Acelerar a dissipação de poro-pressão no dique de vedação.

Bentel et al. (1982), reportam que os drenos com geotêxtil foram uma opção excelente, sendo economicamente viáveis e proporcionando uma simplificação no processo construtivo da barragem. Foi também observado que o material sintético não foi afetado pelos produtos químicos associados com barragens de rejeito de mineração de ouro.

2.5.4 - BARRAGEM DE REJEITOS DA COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM

A CBMM construiu duas barragens de rejeito de mineração pelo método de jusante. Na primeira delas em 1976 (denominada de barragem B-4), com 48 m de altura, foi utilizado o geotêxtil não-tecido, agulhado de filamentos contínuos tipo Bidim OP-30, no seu sistema drenante (Montez, 1987). A segunda barragem (B-5) começou a ser erguida em 1982, tendo 74 m de altura e também geotêxtil não-tecido no seu sistema drenante, sendo considerada uma das mais importantes barragens de rejeito de mineração do Brasil. A Figura 2.14 mostra o esquema da barragem B-5.

As barragens possuem um rígido sistema de monitoramento, composto por piezômetros, poços de observação, medidores de recalques, vertedores de pé e pluviômetro. Observações periódicas comprovam o bom desempenho do sistema drenante utilizado.

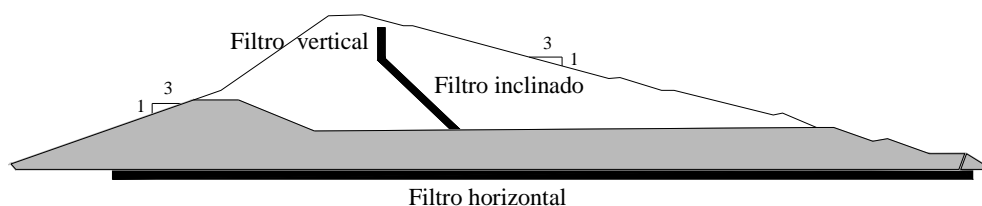


Figura 2.14 – Esquema da seção típica da barragem B-5 (modificado – Montez, 1987).

2.5.5 - PROJETO DO 79º VIADUTO – MIAMI/USA

Este projeto representa uma das primeiras aplicações de geotêxteis na América do Norte e foi construído em 1969. Um geotêxtil tecido foi instalado como filtro, mas também para exercer a função de proteção contra erosão (Christopher & Valero, 1999).

Durante este tempo, a estrutura foi submetida ao ataque de ondas provocadas por furacões e tempestades que ocorreram na Flórida e o geotêxtil foi submetido a condições de fluxo reverso, devido ao movimento de ondas. As amostras exumadas da obra foram analisadas por microscopia e a maioria delas se mostraram intactas e sem danos. As amostras foram analisadas em laboratórios para avaliação da durabilidade e características de filtração. Os resultados mostraram que não ocorreu perda de resistência durante os 30 anos de operação da

obra. Algum nível de degradação (envelhecimento) foi notado, principalmente nas amostras exumadas das seções descobertas.

2.5.6 - DRENO DA RODOVIA BR-020 – DER – BRASÍLIA/DF

O dreno da BR-020 foi construído em 1975 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (Gardoni & Palmeira, 1998). Trata-se de um dreno de 400 m de extensão instalado dos dois lados de trecho da rodovia e construído com a técnica “espinha de peixe”. Nessa obra foi utilizado o geotêxtil não-tecido, agulhado tipo Bidim OP-20, com gramatura nominal 200 g/m², fabricado atualmente pela BBA.

O dreno foi aberto em 1994 e amostras do geotêxtil foram exumadas do envelopamento do topo e da lateral do dreno, bem como foram coletadas amostras do solo circundante e das britas interna à vala de drenagem. Análises de gramatura, espessura, nível de impregnação, permissividade e ensaios de filtração foram efetuados com as amostras coletadas. Os resultados obtidos com as amostras de geotêxtil exumadas mostraram que o geotêxtil não apresentava sinais de danos mecânicos e ainda possuía uma área aberta de poros significativa, o que junto com os resultados dos ensaios de permissividade permitiram afirmar que o dreno se encontrava em bom estado.

2.5.7 - SISTEMA DE DRENAGEM DE RODOVIAS

Este estudo foi elaborado por Koerner et al. (1996) em sistemas de drenagens em rodovias em 91 locais, de 17 estados nos EUA. Os sistemas compreendem filtros de geotêxtil, drenos laterais de geocompostos e camadas drenantes com geocompostos. A Figura 2.15 mostra os esquemas do sistemas de drenagem exumados.

Amostras dos geossintéticos utilizados nos sistemas foram exumadas, bem como amostras de solo e do material dos núcleos e analisadas em laboratório em termos de permissividade e tamanho de abertura de poros. Os geotêxteis desempenharam bem a função de filtro, mas alguns geocompostos apresentaram problemas com a retenção do solo base, que apresentava partículas menores do que a abertura do filtro de geotêxtil de cobertura. Isto permitiu que partículas do solo fossem carreadas para dentro do núcleo do geocomposto, colmatando-o completamente.

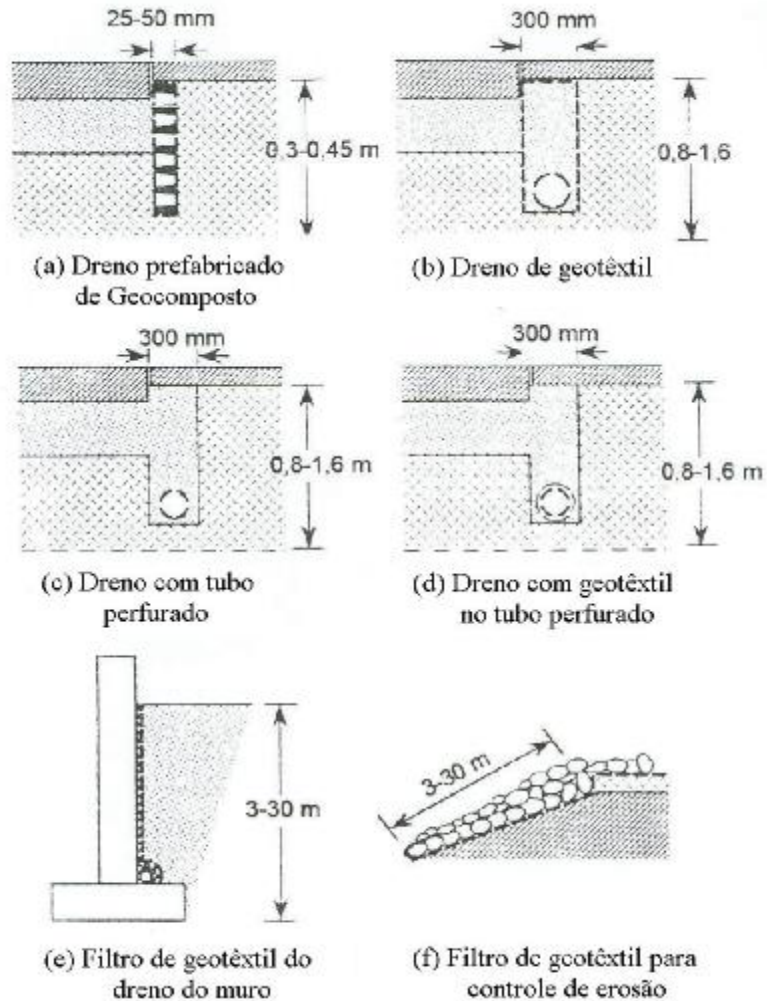


Figura 2.15 – Sistemas de drenagem exumados (modificado – Koerner et al., 1996).

2.6 - ENSAIOS LABORATORIAIS COM GEOTÊXTEIS

Para o funcionamento de um filtro geotêxtil, deve-se estabelecer um padrão de comportamento para as partículas de solo retidas à montante. Para isso o geotêxtil deverá apresentar um comportamento que satisfaça dois requisitos básicos, ou seja: deverá ter aberturas pequenas o suficiente para prevenir excessiva migração de partículas de solo, entretanto, essas aberturas devem ser grandes o suficiente para permitir um adequado fluxo de líquido.

Há vários ensaios de laboratório direcionados a verificar o comportamento das propriedades hidráulicas do sistema solo-geotêxtil-água, e para isso foram desenvolvidos diferentes tipos de equipamentos e metodologias para a análise desse estudo.

2.6.1 - ENSAIOS DE FLUXO DE LONGA DURAÇÃO (LFT)

O objetivo do Ensaio de Fluxo de Longa Duração (LFT) é que a variação da vazão de fluxo seja medida com o tempo e a interação solo-geotêxtil seja simulada. O ensaio é realizado em uma célula, na qual é colocado no cilindro central, com cerca de 35 mm de diâmetro, uma amostra de solo com aproximadamente 8 g sobre o geotêxtil (Figura 2.16). O ensaio não possui nenhuma padronização do tamanho da amostra de solo, da técnica de preparação da amostra e gradientes hidráulicos impostos ao ensaio. O ensaio dura até que o sistema alcance um equilíbrio, isto é, quando a vazão de fluxo for constante. Normalmente o ensaio deve durar 24 h, do início do fluxo até a estabilização, porém, alguns solos requerem que o ensaio seja estendido por até 100 h de duração, como é o caso de solos siltosos (Shi, 1993).

As críticas que são apresentadas em relação a este ensaio se aplicam à não reprodução das tensões no campo, tamanho muito pequeno da amostra e também que o mesmo não dispõe de informações sobre a distribuição de carga hidráulica na amostra de solo.

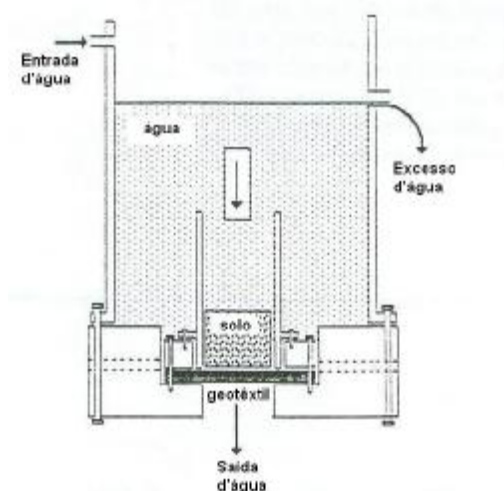


Figura 2.16 – Permeâmetro desenvolvido pela EPM (modificado – Shi, 1993).

2.6.2 - ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (HCR)

Luetlich & Williams (1989) propuseram o Ensaio de Condutividade Hidráulica (HCR), citado por Shi (1993). O ensaio procura simular as condições de campo com amostra indeformada (bloco) ou compactada, sendo posicionada dentro de uma célula triaxial. O geotêxtil é colocado no topo da amostra de solo e a saturação se dá com um fluxo descendente. O ensaio é de rápida duração e altos gradientes são utilizados.

O HCR é expresso pela relação entre a permeabilidade do solo, k_s , e a permeabilidade do conjunto solo-geotêxtil, k_{sg} . Para valores de $HCR \leq 1$ o filtro de geotêxtil é satisfatório, ao passo que para valores de $HCR > 1$ deve-se avaliar a compatibilidade de k_{sg} com o projeto.

A vantagem que este ensaio apresenta sobre os demais é que em virtude de ser realizado em uma célula triaxial, é possível se impor ao sistema uma tensão confinante, simulando melhor as condições de tensão de campo. Como limitação é apresentado que o ensaio é melhor destinado a solos com permeabilidade relativamente baixa, tipicamente menor que 5×10^{-2} cm/s. Outra limitação é o tamanho da amostra ser pequeno (Shi, 1993).

2.6.3 - ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DINÂMICA (DF)

O ensaio de Filtração Dinâmica (DF) é também um ensaio rápido que pode ser utilizado para avaliar o desempenho do geotêxtil sob carregamentos cíclicos ou em carregamentos dinâmicos. A Figura 2.17 mostra o aparelho desenvolvido por Narejo & Koerner (1992) para execução deste ensaio.

O ensaio permite que a vazão de fluxo seja monitorada após períodos de incrementos de ciclos dinâmicos no sistema de ensaio. O ensaio é realizado com uma amostra de solo de 150 mm de diâmetro, colocada no sistema através de 2 entradas localizadas na parte superior do aparelho (Shi, 1993).

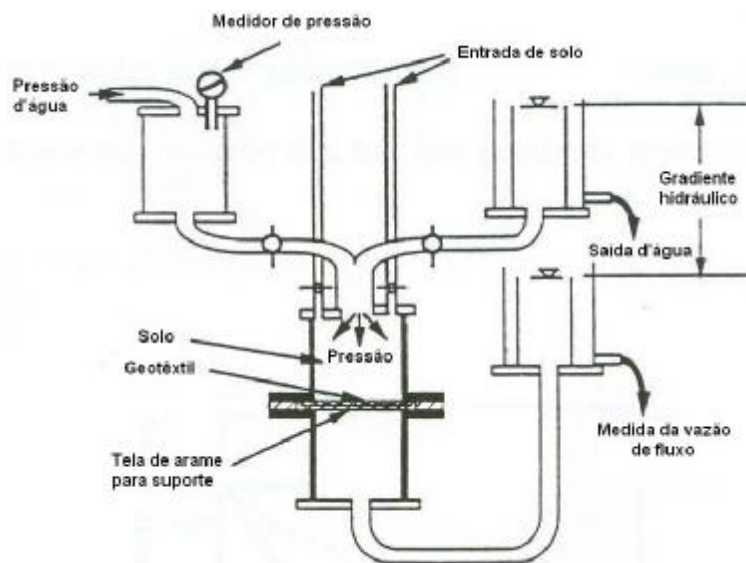


Figura 2.17 – Desenho esquemático do Ensaio de Filtração Dinâmica (modificado – Shi, 1993).

2.6.4 - ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DA FRAÇÃO FINA (F³)

O ensaio de Filtração da Fração Fina (F³) originou-se de um trabalho realizado por Hoover (1982). Seu estudo visou a avaliação de diferentes frações de solos de montante sob condições mínimas de instalações. Esse trabalho foi mais tarde estendido por Legge (1990), que formalizou os procedimentos do ensaio usando o geotêxtil na posição vertical, enquanto que o fluxo acomodava-se na horizontal (Shi, 1993).

Na execução do ensaio é estabelecido um fluxo d'água contínuo no sistema, e em seguida o solo vai sendo adicionado na coluna de forma pluviada (Figura 2.18). A quantidade de solo varia de 5 a 50 g para cada litro de água, preparados e adicionados ao sistema de fluxo contínuo. As adições são feitas quando se constata a passagem das partículas de solo através do geotêxtil e quando os piezômetros atingem o equilíbrio. Geralmente, dependendo do tipo de solo e geotêxtil, o intervalo entre cada adição de solo-água varia entre 1 e 20 min.

Na interpretação dos resultados, é possível identificar 3 tipos de comportamento, baseados na variação da permissividade:

- Quando as partículas de solo passam continuamente pelo geotêxtil, o que significa que pode ocorrer “piping” no solo a montante do geotêxtil, com uma possível colmatção do dreno à jusante;
- Quando as partículas de solo formam uma camada sobre o geotêxtil ou em seu interior o sistema terá um decréscimo na vazão de fluxo, além dos limites compatíveis com o sistema, significando uma excessiva colmatção do geotêxtil;
- Quando as partículas de solo formam uma camada estável sobre o geotêxtil, conduzindo a uma condição de equilíbrio e fluxo constante através do sistema, significa que o sistema é funcional.

As vantagens do ensaio é que ele fornece resultados rápidos, os finos são analisados diretamente e a amostra de solo é facilmente avaliada. Tem como desvantagens a não representatividade da totalidade do solo, as condições hidráulicas são severas e ainda não se dispõe de muitos dados para comparação, visto ser um ensaio relativamente novo.

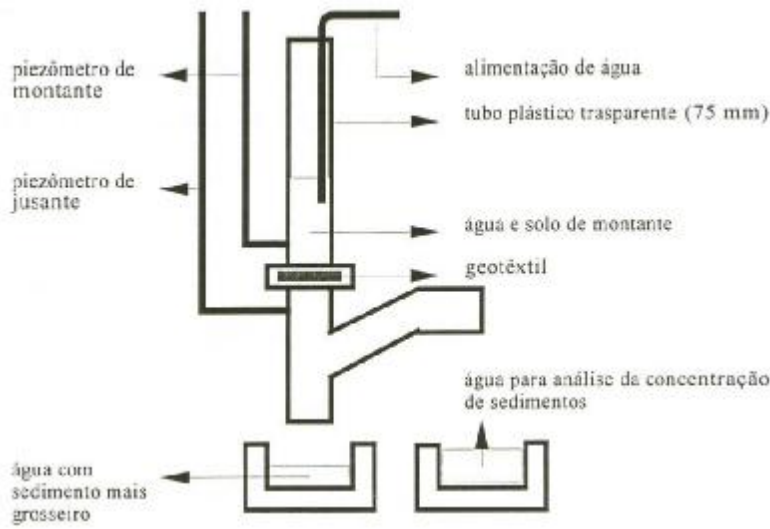


Figura 2.18 – Desenho esquemático do Aparelho de Ensaio F³ (modificado – Matheus, 1997).

2.6.5 - ENSAIOS DE RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)

Os ensaios de filtração do tipo Razão entre Gradientes “GR tests” têm sido realizados para avaliar o potencial de colmatção e a capacidade de retenção de geotêxteis em contato com solo (Shi, 1993; Fannin et al., 1994a, 1994b e 1996; Shi et al., 1994; Gardoni, 1995; Palmeira et al., 1996; Matheus, 1997; Palmeira & Fannin, 1998; Gardoni, 2000).

A proposta do ensaio é que o nível de colmatção do geotêxtil pode ser inferido da medida de gradientes hidráulicos em diferentes locais ao longo do sistema solo-geotêxtil no ensaio de filtração, utilizando-se um permeâmetro, conforme esquematizado na Figura 2.19. Segundo a ASTM (1992), a Razão entre Gradientes (GR) é definida como (Figura 2.19):

$$GR_{ASTM} = \frac{i_{5/7}}{i_{3/5}} \quad (2.17)$$

onde: $i_{5/7}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 5 e 7, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo imediatamente acima com 25 mm de espessura, e $i_{3/5}$ é o gradiente hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil, entre os piezômetros 3 e 5 (Figura 2.19).

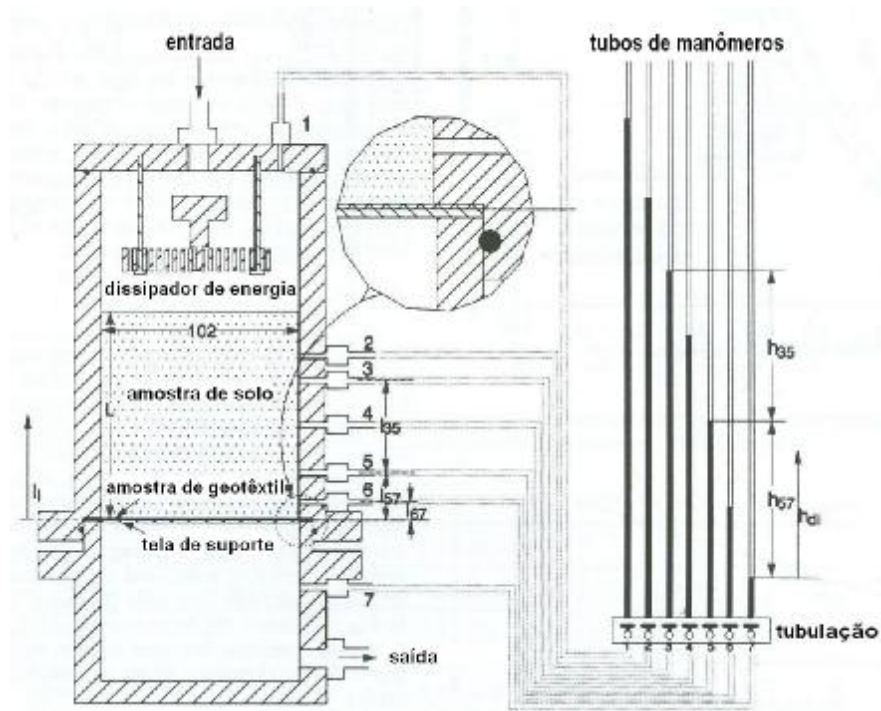


Figura 2.19 – Permeâmetro da UBC para Ensaio de “GR” (modificado – Fannin et al., 1994b).

O gradiente hidráulico do sistema é definido por:

$$i_{1/7} = \frac{h_{1/7}}{L + t_{GT}} \quad (2.18)$$

onde: $h_{1/7}$ é a perda de carga total no sistema, L é a altura da amostra de solo e t_{GT} é a espessura do geotêxtil.

Fannin et al. (1994a) introduziram a definição de Razão entre Gradientes Modificada, definida numa região mais próxima da amostra de geotêxtil (8 mm) e, portanto, obtendo uma medida do mecanismo de colmatação mais dependente do comportamento do geotêxtil. A Razão entre Gradientes Modificada (GR_{Mod}) é definida por:

$$GR_{Mod} = \frac{i_{6/7}}{i_{3/5}} \quad (2.19)$$

onde: $i_{6/7}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 6 e 7 (Figura 2.19).

Gardoni (2000) propôs uma nova definição para a Razão entre Gradientes, aplicando níveis de tensão vertical no topo da amostra de solo, onde o gradiente na interface solo-geotêxtil é

definido em uma região mais próxima ainda do geotêxtil (3 mm), na tentativa de uma melhor aferição do mecanismo de colmatação do geotêxtil. Segundo Gardoni (2000), os valores obtidos de GR_{3mm} podem ser bem maiores do que os propostos pela ASTM (1992) e por Fannin et al. (1994a).

Valores elevados de GR podem indicar colmatação do sistema. Já valores muito baixos podem indicar a ocorrência de mecanismo de “piping”. Um valor de GR unitário indica que a presença do geotêxtil não afetou o regime de fluxo do sistema.

Segundo Gardoni (2000), o critério de colmatação existente, em função do valor da Razão entre Gradientes (GR), é o proposto pelo FHWA (Federal Highway Administration). Segundo o critério, o geotêxtil não deveria ser utilizado caso GR seja maior que 3. Porém, para os solos residuais da região de Brasília, valores de GR acima de 3 podem ocorrer sem que com isso o filtro se apresente colmatado, pois o critério de permeabilidade foi atendido, mostrando que somente o valor de GR não é suficiente para a decisão da escolha ou não de um filtro sintético.

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 - GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis utilizados nos ensaios de filtração foram ao todo quatro (Figura 3.1), sendo três não-tecidos agulhados de filamentos contínuos 100% poliéster dos tipos Bidim OP-15, OP-30 e OP-60, com gramatura variando de 150 a 600 g/m², denominados GT1, GT2 e GT3, respectivamente, e um geotêxtil tecido de polipropileno do tipo Propex 2044 com gramatura de 445 g/m², denominado GT4. A Tabela 3.1 apresenta as principais características dos geotêxteis ensaiados.

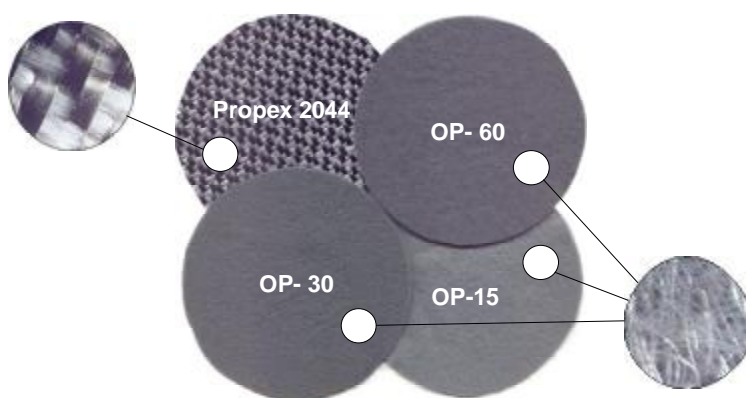


Figura 3.1 – Amostras dos geotêxteis utilizados.

Tabela 3.1 – Características dos geotêxteis ensaiados

Geotêxtil	Código	t _{GT} ⁽¹⁾ (mm)	M _A ⁽²⁾ (g/m ²)	FOS ⁽³⁾ (mm)	K _n ⁽⁴⁾ (cm/s)	Y ⁽⁵⁾ (s ⁻¹)	Tipo de Tecido ⁽⁶⁾
OP-15	GT1	1,5	150	150	0,4	2,5	NT, A, FC
OP-30	GT2	2,6	300	110	0,4	1,5	NT, A, FC
OP-60	GT3	4,5	600	60	0,4	0,9	NT, A, FC
Propex 2044	GT4	1,5	445	300	0,093	0,6	Tecido

Notas: (1) Espessura nominal (ABNT NBR 12569), (2) Gramatura (ABNT NBR 12568), (3) Abertura de filtração por ensaios de peneiramento hidrodinâmico (AFNOR G 38017), (4) Permeabilidade normal (AFNOR G 38016), (5) Permissividade (AFNOR G 38016), (6) NT = Não-Tecido, A = Agulhado, FC = Filamentos Contínuos.

3.1.2 - MATERIAIS GRANULARES

Quatro tipos de materiais granulares foram empregados nos ensaios (Figura 3.2): dois solos arenosos, sendo uma areia grossa uniforme, denominada AGU e uma areia bem graduada, denominada ABG; um rejeito de minério de ferro, denominado RMF; e microesferas de vidro, denominada MEV. As características dos materiais utilizados são apresentadas na Tabela 3.2 e suas respectivas curvas granulométricas, obtidas por granulômetro a laser, na Figura 3.3.

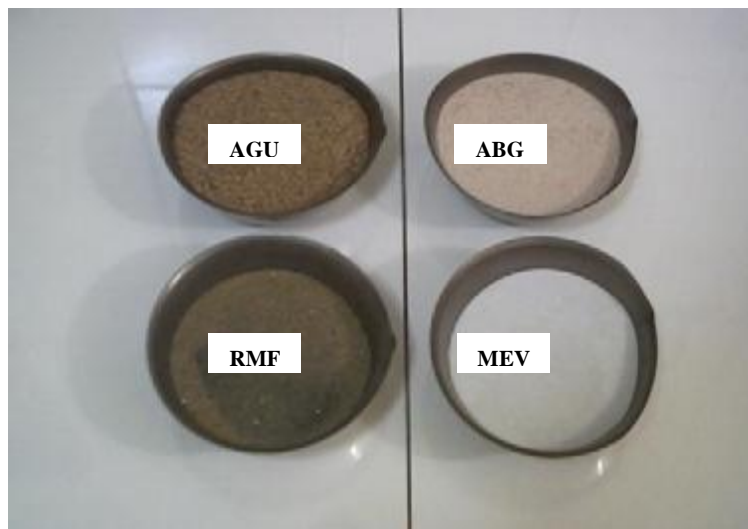


Figura 3.2 – Amostras dos materiais granulares utilizados.

3.1.2.1 - Areias

A areia grossa uniforme empregada nos ensaios de filtração é proveniente da CAESB (Companhia de Águas e Esgoto de Brasília), geralmente utilizada em filtros por esta Companhia. A areia bem graduada é proveniente de jazida e geralmente utilizada pela NOVACAP-DF (Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil) para preenchimento de tanques de areia nos parques de Brasília.

3.1.2.2 - Rejeito de Minério

O rejeito de minério utilizado consiste basicamente de um solo tipicamente arenoso, com granulometria na faixa de areia fina a média, proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro da Mina de Morro Agudo, pertencente à SAMITRI (S.A. Mineração da Trindade), localizada a 140 km de Belo Horizonte, no município de Rio Piracicaba, MG.

Embora contendo minerais pesados da ordem de 23% de ferro hematítico de alto teor e itabiritos, este rejeito é quimicamente inerte, pois, devido ao alto teor de ferro das jazidas de Morro Agudo, não é necessária a adição de produtos químicos na sua exploração. Neste caso, somente a água pura atua no processo de beneficiamento e posterior lançamento da mistura diretamente na barragem, construída com o próprio rejeito lançado hidraulicamente através de canhões “spigots” localizados na crista da barragem na direção de montante (Ribeiro, 2000).

3.1.2.3 - Microesferas de Vidro

As microesferas de vidro utilizadas, com diâmetros variando entre 45 e 90 μm , similares a de um solo de graduação uniforme, são provenientes da empresa Potters Industrial Ltda. Esse material é utilizado intensivamente em operações de manutenção de equipamentos, bem como nas de limpeza, acabamento e melhoria das propriedades mecânicas de outros produtos.

Tabela 3.2 – Características dos materiais granulares

Tipo de Solo	Código	D ₁₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₈₅ (mm)	C _u ⁽¹⁾	e ⁽²⁾	G _s ⁽³⁾
Areia Grossa Uniforme	AGU	747	1070	1718	1,7	0,65	2,63
Areia Bem Graduada	ABG	13	150	363	32,1	0,55	2,70
Rejeito de Minério de Ferro	RMF	82	195	408	4,0	0,62	3,25
Microesferas de Vidro	MEV	51	65	83	1,5	0,60	2,51

Notas: (1) Coeficiente de não-uniformidade (D_{60}/D_{10}), (2) Índice de vazios, (3) Densidade específica dos grãos.

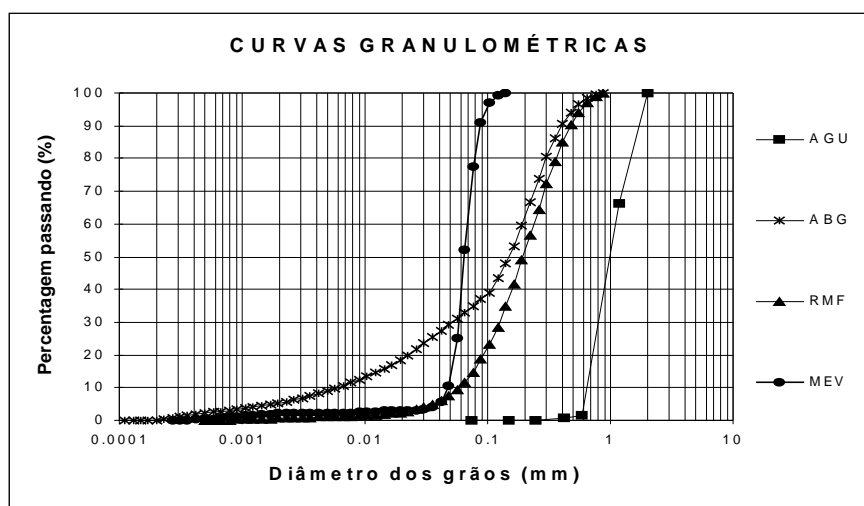


Figura 3.3 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais empregados.

3.2 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 - EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB TENSÕES TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)

O equipamento utilizado para os ensaios de filtração de sistemas solo-geotêxtil sob tensão foi projetado e construído na Universidade de Brasília (Gardoni, 2000) e compõe-se de um permeâmetro, conforme esquematizado na Figura 3.4, um sistema hidráulico para aplicações de cargas de compressão, um sistema de abastecimento de água destilada e um quadro de piezômetros. O equipamento foi construído utilizando materiais inertes como aço inoxidável, latão, tubos de polietileno e acrílico e conexões de aço inoxidável, preterindo-se o ferro ou cobre para evitar possíveis influências nos resultados em ensaios com materiais ou fluidos agressivos. O permeâmetro adotado na pesquisa baseou-se no projeto desenvolvido na University of British Columbia (Shi, 1993, Fannin et al. 1994a, 1994b e 1996), tendo como referência a proposta de padronização da metodologia de ensaio de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil intitulada Razão entre Gradientes (GR). O mesmo equipamento também foi utilizado para a obtenção da abertura de filtração dos geotêxteis, conforme recomendações de Palmeira & Fannin (1998).

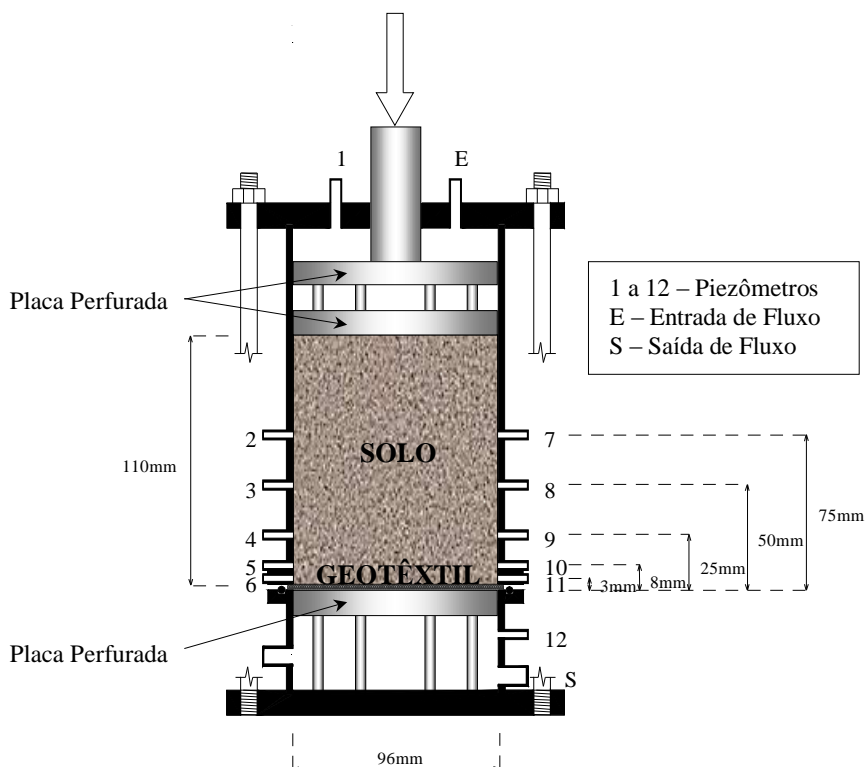


Figura 3.4 – Desenho esquemático do permeâmetro usado para os ensaios de filtração.

O permeâmetro é formado por duas partes. A parte inferior apoia-se sobre uma placa circular de 200 mm de diâmetro e 12,5 mm de espessura. O cilindro inferior possui um conector para a saída de água do permeâmetro e o fundo em forma de calha para possibilitar a retirada das partículas de solo que atravessam o geotêxtil durante o ensaio. A parte cilíndrica superior do corpo do permeâmetro possui 5 piezômetros localizados a 3, 8, 25, 50 e 75 mm da superfície do geotêxtil dos dois lados do cilindro (Figura 3.4), que possibilitam a obtenção da carga hidráulica a diferentes alturas do corpo de prova de solo, bem como a permeabilidade total em diferentes regiões do sistema.

Uma placa perfurada de aço, com 12,5 mm de espessura para apoio da amostra de geotêxtil é colocada entre os dois corpos do permeâmetro sendo apoiada em pinos de aço de 5 mm de diâmetro soldados na placa da base do permeâmetro. O pistão para aplicação da carga vertical é em aço inoxidável com 25,4 mm de diâmetro rosqueado a uma placa perfurada de aço, com 16 furos de 5 mm de abertura para passagem de água, que é separada de outra placa semelhante por pinos de apoio. A segunda placa possui 25 furos de igual abertura para passagem da água que percolará pelo solo. Este conjunto de placas transmite a carga para o sistema solo-geotêxtil ao mesmo tempo em que permite o fluxo de água pelo sistema. A Figura 3.5 mostra o permeâmetro e seus componentes.



Figura 3.5 – Componentes do equipamento para ensaios de filtração sob tensão.

O sistema de aplicação de cargas é composto por 2 cilindros de nitrogênio (Figura 3.6), munidos com válvulas para baixas pressões (0 a 800 kPa) e altas pressões (800 a 2000 kPa), conectadas a uma interface óleo-gás que transmite a pressão para o óleo do cilindro hidráulico

de 500 kN, modelo RCY-506, da Yellow Power, fixado na estrutura de reação acima do permeâmetro (Figura 3.7). O pistão do cilindro está conectado a uma célula de carga modelo KLS, de 20 kN, da Kratos Extensômetros Ltda, que transfere a carga para o pistão do permeâmetro.



Figura 3.6 – Cilindros de nitrogênio para aplicação de cargas.

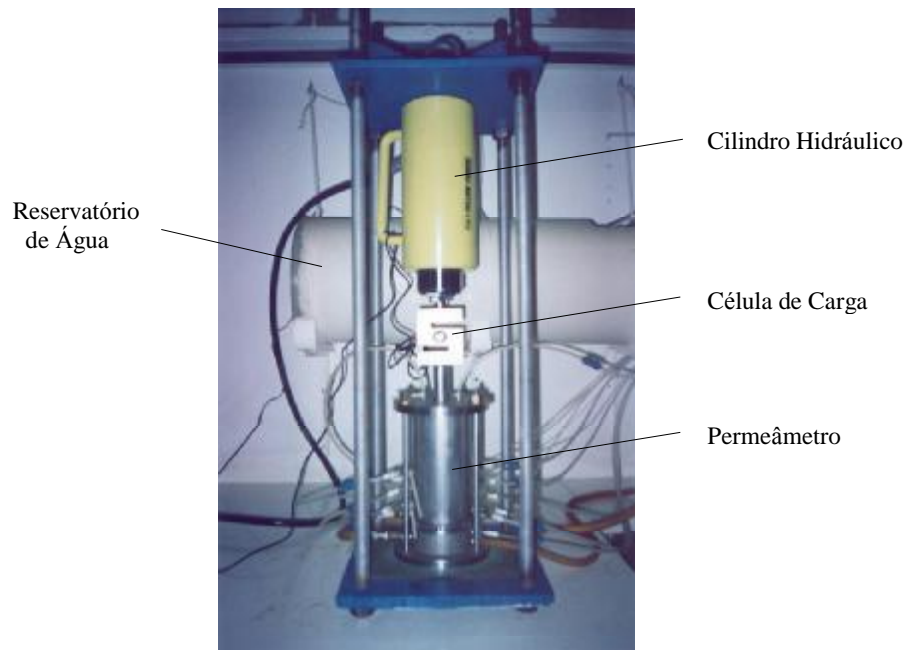


Figura 3.7 – Equipamento para ensaios de filtração sob tensão.

O sistema de abastecimento de água é composto por 3 reservatórios interligados e com capacidades para 2, 30 e 50 l.

Um quadro com 12 piezômetros em acrílico cristal de 6 mm de diâmetro completa o sistema de medição. Tubos de polietileno de 6,4 mm de diâmetro formam as ligações entre o permeâmetro e os tubos em acrílico. Estes tubos de acrílico foram fixados sobre um quadro, com escala milimetrada, para a leitura das alturas piezométricas durante o ensaio (Figura 3.8).

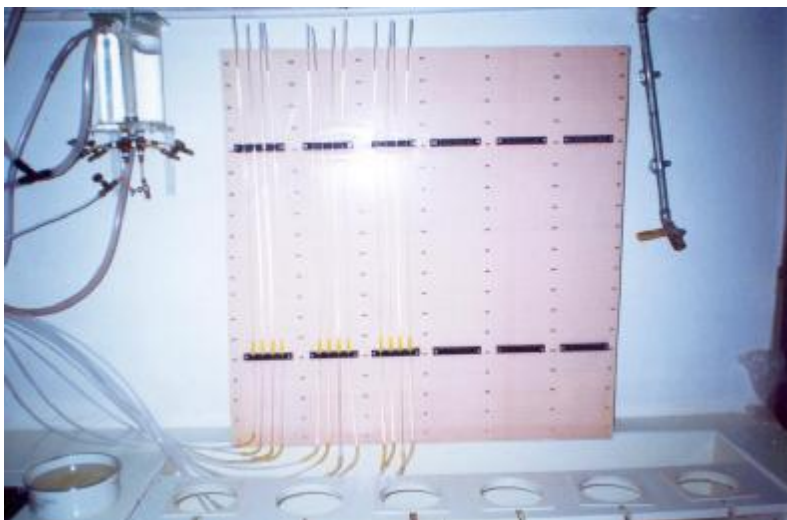


Figura 3.8 – Quadro com escala milimetrada para leituras piezométricas.

3.2.2 - GRANULÔMETRO A LASER

O granulômetro a laser utilizado nesta pesquisa para análise do material passante pelo geotêxtil após o ensaio de filtração pertence ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Trata-se de um modelo Mastersizer S Standard Bench, conforme ilustrado na Figura 3.9, produzido pela MALVERN INSTRUMENTS LTD, com sede em Worcestershire, na Inglaterra. Este aparelho apresenta vantagens quanto à rapidez e precisão, além de permitir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados para solos finos. O aparelho é composto por 3 unidades fundamentais: a unidade de preparação de amostras, a unidade óptica e um computador.

A unidade de preparação de amostras consiste de um tanque com capacidade máxima de 1000 cm^3 , onde após a preparação e agitação da amostra, a mesma é bombeada à unidade

óptica para que possa ser medida. O equipamento permite controlar a velocidade e o tempo de agitação, além da velocidade de bombeamento da amostra.



Figura 3.9 – Unidade óptica e de preparação de amostra do granulômetro a laser.

Pode-se dizer que a unidade óptica é usada para coletar os dados obtidos durante o processo de medida dos tamanhos das partículas da amostra, sendo constituída basicamente por 3 partes:

- O transmissor;
- A unidade de área da amostra;
- O receptor.

O transmissor contém o dispositivo de geração do feixe de laser que é usado para efetuar as medições nas amostras. A unidade de área da amostra situa-se entre o transmissor e o receptor, onde estão alojados a célula da amostra, a lente de alinhamento com o canhão laser e o difusor de irradiação que é colocado em frente ao conjunto formado pela célula da amostra e a lente de alinhamento. O receptor é a parte final da unidade óptica responsável pela coleta e armazenamento das informações recebidas pelo espalhamento do feixe de laser que passa pela amostra, enviando-as imediatamente para o sistema do computador para serem submetidas ao analisador.

O modelo teórico que o granulômetro opera é baseado no espalhamento que um feixe de laser sofre ao passar pelas partículas de solo em suspensão dentro da unidade óptica. De acordo

com o manual do equipamento (Malvern Instruments, 1997), o granulômetro utiliza as teorias de Fraunhofer e Mie. O modelo de Fraunhofer pode prever o padrão de espalhamento, mas não o descreve perfeitamente. Já o modelo de Mie prevê a trajetória da luz que passa ou é absorvida pela partícula.

Finalmente, a última unidade é o computador que opera com o programa Malvern comandando as operações do sistema de medição. Maiores detalhes do equipamento podem ser encontrados em Manso (1999).

METODOLOGIAS UTILIZADAS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de filtração de sistemas solo-geotêxtil do tipo Razão entre Gradientes (GR) sob pressão, tomando-se como referência os procedimentos de ensaios adotados por Gardoni (2000). Outros ensaios foram realizados posteriormente para se avaliar a abertura de filtração dos geotêxteis após os ensaios de filtração, através da análise granulométrica do material passante e retido pelo geotêxtil, utilizando-se o granulômetro a laser.

Neste capítulo são apresentados e discutidos alguns aspectos relacionados aos critérios e metodologias adotadas na realização dos ensaios referidos acima.

4.2 - PROCEDIMENTOS PARA A PREPARAÇÃO E OPERAÇÃO DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR) SOB TENSÃO

4.2.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTEIS

As mantas de geotêxteis não-tecidos possuem como característica principal a aleatoriedade na deposição das fibras quando do processo de tecelagem, fazendo com que apresentem valores de gramatura (massa de fibras por unidade de área) diferentes, dependendo da região considerada.

A seleção das amostras foi feita através da retirada aleatória de espécimes circulares das mantas, com diâmetro um pouco maior que o diâmetro do permeâmetro para que se pudesse garantir o tamanho e um perfeito encaixe do geotêxtil na base do permeâmetro. Depois de conferidas as dimensões, as amostras de geotêxtil eram pesadas. Em seguida, foi feita uma segunda seleção, escolhendo-se as amostras com gramaturas próximas às nominais de catálogo dos produtos a serem ensaiados.

A amostra de geotêxtil selecionada era colocada em um recipiente com água destilada e submetida ao processo de saturação. Nessa fase, o recipiente contendo a amostra era depositado dentro de um dissecador, o qual estava acoplado a uma bomba de vácuo. A amostra de geotêxtil era submetida ao vácuo por período mínimo de 2 h para que se pudesse garantir a completa saturação da mesma e verificar se havia ou não bolhas de ar oclusas (Figura 4.1). Após o processo de saturação a amostra era então colocada em seu local no permeâmetro, estando o mesmo dentro de uma caixa plástica cheia com água destilada, pois toda a fase de acondicionamento do geotêxtil e plugamento do permeâmetro era submersa.



Figura 4.1 – Saturação do geotêxtil através de vácuo.

4.2.2 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLOS

As amostras de solos uniformes, onde $C_u < 2$, foram preparadas pela técnica da pluviação, seguindo a metodologia apresentada em Shi (1993) e adotada por Gardoni (2000). Tal metodologia visa a obtenção de amostras homogêneas e saturadas com densidade controlada. A partir das propriedades do solo, tais como peso específico dos grãos (ρ_s) e índices de vazios máximo e mínimo ($e_{\text{máx}}$ e e_{min}) a densidade da amostra de solo pôde ser controlada.

Para que se pudesse garantir a completa saturação do solo previamente à preparação da amostra, uma massa conhecida do solo (cerca de 1600 a 1700 g) era colocada em um Erlenmeyer de vidro com capacidade para 2000 cm³ e fervida com água destilada por cerca de 2 h, conforme mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Saturação do solo através de fervura.

Primeiramente o corpo superior do permeâmetro era lubrificado com graxa e posteriormente eram instalados filmes de plástico para a minimização do atrito lateral entre o solo e as paredes da célula. Após desobstrução dos furos de conexão dos piezômetros com ar comprimido, as conexões eram vedadas e conectadas à parte inferior onde se encontrava a amostra de geotêxtil previamente saturada em água destilada e vácuo. O solo era então introduzido dentro do permeâmetro por pluviação. A técnica da pluviação utiliza um frasco de vidro (Erlenmeyer) com capacidade para 2000 cm³ equipado com uma rolha e um tubo de descarga de acrílico. O frasco contendo o solo é invertido e o tubo é introduzido dentro do permeâmetro com água (Figura 4.3). O solo desce do frasco e vai sendo depositado no fundo do permeâmetro (Shi, 1993). O processo simula a deposição de água e areia na natureza, sendo despendida cerca de 1 h para preparação da amostra.



Figura 4.3 – Fase de preparação da amostra através da técnica da pluviação.

Para os solos de graduação aberta, onde $C_u > 2$, a técnica de deposição de lama saturada era utilizada evitando-se, assim, a segregação das partículas. Nesta técnica, o solo era colocado em um recipiente aberto e misturado em água como uma lama. Neste estado as partículas de diferentes tamanhos eram misturadas homogeneamente. Com a água a poucos milímetros acima da amostra de geotêxtil, a lama do solo era colocada cuidadosamente dentro do permeâmetro com uma concha.

Depois de formada a amostra, por qualquer dos dois processos, o seu topo era nivelado usando-se um sifão e o solo recolhido era levado à estufa para ser secado de maneira que a massa total de solo seco pudesse ser determinada. O permeâmetro era retirado da água e iniciava-se o processo de densificação da amostra (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Fase de densificação da amostra.

A densificação da amostra era feita batendo-se levemente nas paredes do permeâmetro com um martelo de borracha. Neste processo de preparação é necessário determinar a altura do corpo de prova durante o processo de compactação para o controle da densidade. Para isso utilizou-se uma peça circular de acrílico perfurada, com uma haste central. A altura inicial era determinada com a peça no fundo do recipiente. Após cada etapa de compactação, a peça era introduzida e medida a sua altura até a borda superior do permeâmetro (Figura 4.5). Por diferença era calculada a altura da amostra para cada fase de compactação do solo.



Figura 4.5 – Controle de altura e densidade da amostra.

Para se conhecer o peso seco da amostra de solo e permitir o controle do índice de vazios e densidade, o frasco de vidro (Erlenmeyer) contendo o solo, após o processo de saturação, era completado com água destilada até a boca e pesado. Após o procedimento de pesagem, colocava-se um bico de descarga no frasco de vidro e dava-se início à preparação da amostra no permeâmetro submerso (Figura 4.3). Atingida a altura ideal, completava-se novamente o frasco (contendo o solo restante) com água destilada até a boca, e se obtinha o seu peso novamente.

Na obtenção do peso seco da amostra, utilizou-se a seguinte expressão:

$$W_{sd} = \frac{r_s}{(r_s - 1)} \times (W_{fws} - W_{fws\ rest}) \quad (4.1)$$

onde: W_{sd} = massa seca do solo;

r_s = massa específica dos grãos;

W_{fws} = peso do frasco + água + solo antes da preparação da amostra;

$W_{fws\ rest}$ = peso do frasco + água + solo depois da preparação da amostra.

No controle da altura e índice de vazios da amostra (Figura 4.6), utilizaram-se as seguintes expressões:

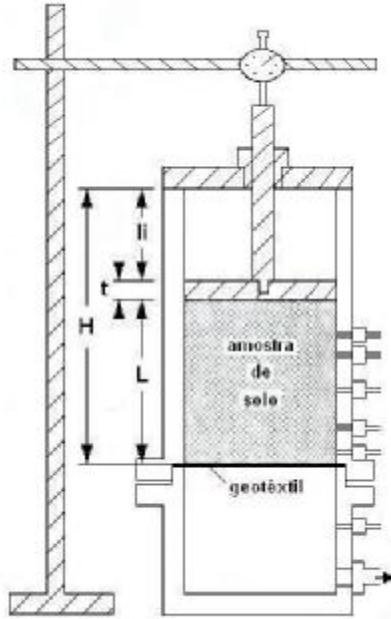


Figura 4.6 – Desenho esquemático do controle da altura e índice de vazios da amostra.

$$L = H - li - t \quad (4.2)$$

onde: L = altura da amostra;

H = altura do permeâmetro;

li = altura medida em cada intervalo de controle;

t = espessura da placa.

$$e = \frac{\rho_s \cdot A \cdot (H - li - t)}{W_{sd}} - 1 \quad (4.3)$$

onde: e = índice de vazios;

ρ_s = massa específica dos grãos;

A = área da seção do permeâmetro;

(H - li - t) = altura da amostra;

W_{sd} = massa seca do solo.

Conhecendo a massa e a altura da amostra de solo, a massa específica seca era calculada e, a partir dela, o índice de vazios para verificar se o valor pretendido havia sido atingido. A altura final da amostra de solo era de aproximadamente 110 mm.

4.2.3 - OPERAÇÃO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO TIPO GR SOB TENSÃO

Após atingir a altura e densidade desejada da amostra, o permeâmetro era fechado e posteriormente os piezômetros eram conectados (Figura 4.7). O solo que passava pelo geotêxtil durante a preparação do ensaio era recolhido para posterior análise granulométrica.



Figura 4.7 – Fechamento do permeâmetro e conexão dos piezômetros.

Os piezômetros eram completamente cheios com água deaerada. A válvula de entrada de água era aberta e, após a estabilização das cargas piezométricas, o tubo de saída era ajustado a um nível onde o gradiente hidráulico, $i_{1/12}$ (Figura 3.4), era igual a 1. Então, uma carga equivalente a uma pressão de 25 kPa era aplicada e a cada estabilização do volume de água no tubo de saída e das perdas de carga hidráulica, novos incrementos de pressão eram aplicados sucessivamente, até atingir a pressão normal de 2000 kPa. Após a estabilização de cada estágio de carga, eram efetuadas medidas do tempo acumulado em horas (período médio de 120 h), do volume de água (cm^3) no tubo de saída em relação ao tempo em segundos a fim de se obter a vazão e das variações das perdas de carga hidráulica no quadro de piezômetros.

Uma vista geral do equipamento de filtração sob tensão em operação é mostrada na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Vista geral do equipamento de filtração sob tensão em operação.

No final do ensaio, o permeâmetro era desmontado (Figura 4.9) e o solo que passou através da amostra de geotêxtil era coletado para posterior análise granulométrica. O solo da amostra era levado à estufa para secar, sendo também posteriormente analisado granulometricamente.

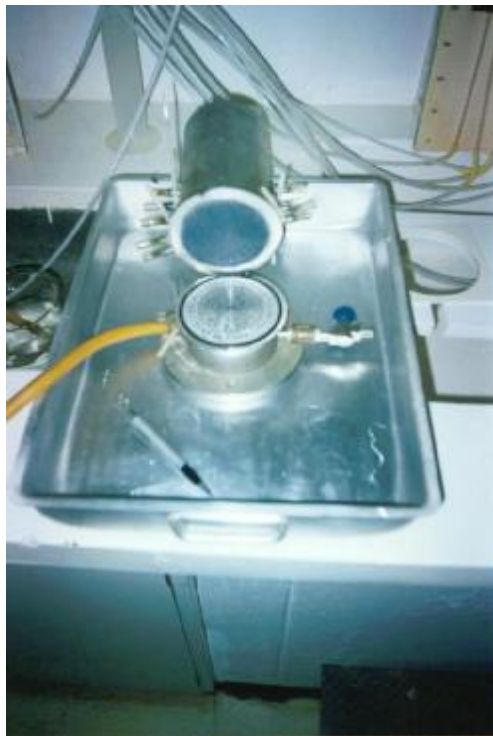


Figura 4.9 – Desmontagem do permeâmetro ao final do ensaio.

4.3 - PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

O granulômetro a laser constitui-se numa ferramenta de fácil operação e manuseio, transformando sobremaneira o ensaio de sedimentação pela rapidez no tocante a quantidade de ensaios possíveis de serem executados num curto espaço de tempo.

O aparelho adquirido pela UnB é composto pela unidade central (granulômetro), a unidade de dispersão da amostra, dotada do dispositivo de bombeamento e de agitação, bem como de um recurso especial que é o ultra-som. Esse dispositivo permite a desagregação de torrões de solo. O modo como o granulômetro opera a medida do tamanho das partículas é baseado no espalhamento e absorção de luz provocado pelas partículas de solo.

A quantidade correta de amostra deve ser colocada no aparelho de modo que se permita obter boas medições. Uma quantidade pequena da amostra poderá não ser suficiente para que o espalhamento da luz possa ser detectado, enquanto que uma grande quantidade poderá tomar como medida de uma partícula uma medição de um grupo de partículas, o que o sistema denomina de múltiplo espalhamento.

O MASTERSIZE determina a quantidade correta da concentração pela medição da quantidade de luz do laser que foi perdida ao passar pela amostra. Isso é conhecido como “obscuração” e é dada em porcentagem. A faixa de “obscuração” aceitável para o ensaio é aquela que vai de 10 a 30%. A amostra deve ser acrescentada ao sistema até que se tenha uma obscuração aceitável, dentro da faixa acima citada. Cuidados especiais devem ser tomados em relação à preparação da amostra e à quantidade de amostra a ser acrescentada ao sistema. A maioria dos problemas encontrados durante as medições é oriunda da preparação não adequada da amostra, fazendo com que a mesma não seja representativa.

Os ensaios no granulômetro a laser foram realizados após um estudo prévio da quantidade de amostra a ser utilizada em função da necessidade operacional do mesmo. O granulômetro é uma tecnologia aplicada somente em medições de partículas ou elementos de tamanho estritamente reduzidos e, por isso mesmo, o aparelho requer uma amostra com peso muito pequeno.

Pelo fato de se trabalhar com quantidades pequenas, e considerando que no caso da UnB o aparelho tem uma unidade de preparação da amostra (para ensaios via úmida) com capacidade máxima de 1000 cm³ incluindo solo e dispersante (Figura 4.10), foi preciso compatibilizar a quantidade de amostra a ser utilizada no ensaio com as exigências particulares de funcionamento do próprio aparelho.



Figura 4.10 – Unidade de dispersão da amostra do granulômetro a laser.

Nesse aspecto, obedecidas as etapas preliminares que o aparelho requer, foram feitas as análises granulométricas dos materiais coletados durante a preparação das amostras para os ensaios de filtração, dos materiais coletados após os ensaios de filtração, bem como dos materiais retidos e impregnados nas amostras de geotêxteis.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)

5.1 - INTRODUÇÃO

A compatibilidade entre sistemas solo-geotêxtil pode ser avaliada através de ensaios de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR), utilizando-se o permeâmetro esquematizado na Figura 3.4. A proposta do ensaio é que o nível de colmatação do geotêxtil pode ser inferido por meio da medida de gradientes hidráulicos em diferentes locais ao longo do sistema solo-geotêxtil no ensaio de filtração (Calhoun, 1972; Scott, 1980; Haliburton & Wood, 1982; Lawson, 1986; Fannin et al., 1994a, 1994b e 1996; Gardoni, 1995 e 2000, Palmeira et al., 1996).

Dando continuidade ao programa de pesquisa desenvolvido na Universidade de Brasília, para investigar o comportamento filtrante dos geossintéticos sob elevadas pressões normais, o presente trabalho propõe o estudo da Razão entre Gradientes (GR) em sistemas solo-geotêxtil sob tensão, comparando os resultados de gradiente na região do solo a uma distância de 3 mm da amostra do geotêxtil (GR_{3mm}), a 8mm (GR_{Mod}) e a 25 mm (GR_{ASTM}).

No presente capítulo, serão abordados os ensaios realizados utilizando essa metodologia, sob tensões variando de 25 a 2000 kPa (Bessa da Luz & Palmeira, 2003). Os resultados serão apresentados em seqüência e serão discutidos separadamente de acordo com o sistema solo-geotêxtil ensaiado.

5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Os ensaios foram desenvolvidos conforme o programa estabelecido na Tabela 5.1. Para cada ensaio foram analisados os valores da permeabilidade do solo entre os piezômetros 7 e 9 ($k_{7/9}$, Figura 3.4), das permeabilidades locais no sistema solo-geotêxtil segundo a proposta da ASTM ($k_{9/12}$), Modificada ($k_{10/12}$) e a 3mm ($k_{11/12}$), das permeabilidades no topo da amostra ($k_{1/7}$) e total do sistema ($k_{1/12}$), os valores de Razão entre Gradientes (GR), os valores de vazão e a variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra.

Tabela 5.1 – Programa de ensaios de filtração.

Material Granular	Geotêxtil	Gradiente Hidráulico Total	Técnica de Preparação
Areia Grossa Uniforme (AGU)	GT1	1,0	Pluviação
	GT2	1,0	Pluviação
	GT3	1,0	Pluviação
	GT4	1,0	Pluviação
Microesfera de Vidro (MEV)	GT1	1,0	Pluviação
	GT2	1,0	Pluviação
	GT3	1,0	Pluviação
	GT4	1,0	Pluviação
Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	GT1	1,0	Lama
	GT2	1,0	Lama
	GT3	1,0	Lama
	GT4	1,0	Lama
Areia Bem Graduada (ABG)	GT1	1,0	Lama
	GT2	1,0	Lama

Os ensaios foram realizados com amostras pré-saturadas e com densidade controlada. Os índices de vazios e as alturas iniciais e finais das amostras são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características das amostras dos ensaios de filtração.

Material Granular	Geotêxtil	Altura inicial da amostra (cm)	Altura final da amostra (cm)	Índice de vazios inicial	Índice de vazios final
Areia Grossa Uniforme (AGU)	GT1	13,15	11,71	0,86	0,66
	GT2	13,02	11,58	0,86	0,65
	GT3	13,04	11,47	0,90	0,67
	GT4	13,18	11,65	0,86	0,64
Microesfera de Vidro (MEV)	GT1	11,89	10,93	0,74	0,60
	GT2	11,84	10,75	0,77	0,61
	GT3	11,81	10,50	0,81	0,61
	GT4	12,05	10,67	0,80	0,60
Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	GT1	12,30	10,60	0,81	0,56
	GT2	12,65	10,70	0,90	0,61
	GT3	12,38	10,63	0,92	0,65
	GT4	12,45	10,62	0,94	0,65
Areia Bem Graduada (ABG)	GT1	12,71	10,45	0,85	0,52
	GT2	12,47	10,70	0,84	0,58

Os resultados de permeabilidade, Razão entre Gradientes (GR), vazão e variação de perda de carga dos sistemas ensaiados, para o gradiente hidráulico total de 1 (um), são apresentados a seguir. Os valores foram obtidos após estabilização da vazão a cada nível de tensão.

A Tabela 5.3 mostra os valores obtidos para os GR a cada nível de tensão para todos os ensaios de filtração efetuados. Os valores de GR_{3mm} obtidos pela forma proposta neste trabalho são maiores do que aqueles propostos pela ASTM e por Fannin et al. (1994a). Para as três definições de GR o comportamento é semelhante, com exceção dos sistemas formados por microesferas de vidro e os geotêxteis GT2 a GT4, onde no início do ensaio os valores de GR_{3mm} são menores, provavelmente devido à ocorrência de “piping” para as pressões inferiores a 1000 kPa.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de filtração.

Material Granular	Geotêxtil	Tensão (kPa)	GR_{ASTM}	GR_{Mod}	GR_{3mm}	Vazão (cm ³ /s)
Areia Grossa Uniforme (AGU)	GT1	0	3,00	6,25	8,34	1,339
		25	3,00	6,25	8,34	1,328
		50	8,00	18,75	33,34	1,283
		100	10,00	26,56	62,51	1,222
		500	9,60	27,50	66,68	1,122
		1000	15,50	43,75	108,35	0,894
		2000	18,50	54,69	133,36	0,617
	GT2	0	2,00	5,00	10,00	1,492
		25	2,09	5,68	11,37	1,492
		50	2,20	5,31	10,00	1,475
		100	2,67	7,29	16,67	1,433
		500	6,00	17,19	41,67	1,258
		1000	10,33	31,25	80,57	1,000
		2000	12,67	38,54	100,02	0,842
	GT3	0	1,63	3,94	4,32	1,425
		25	1,70	3,94	4,94	1,417
		50	1,73	4,79	6,11	1,367
		100	1,93	5,82	8,62	0,975
		500	3,75	11,13	23,44	0,856
		1000	6,21	18,10	36,79	0,775
		2000	10,72	31,5	69,35	0,663
	GT4	0	0,86	2,23	2,38	1,425
		25	0,89	2,31	2,47	1,425
		50	0,96	2,55	3,09	1,417
		100	1,57	4,35	7,97	1,308
		500	2,40	7,19	15,84	0,967
		1000	2,86	8,63	22,23	0,833
		2000	5,88	16,41	41,68	0,563
Microesfera de Vidro (MEV)	GT1	0	0,85	0,79	1,11	0,171
		25	0,83	0,77	1,09	0,172
		50	0,81	0,75	1,06	0,172
		100	0,81	0,75	1,06	0,164
		500	0,83	0,84	1,22	0,142
		1000	0,84	0,88	1,37	0,114
		2000	0,92	1,14	2,03	0,054

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de filtração – cont.

Material Granular	Geotêxtil	Tensão (kPa)	GR _{ASTM}	GR _{Mod}	GR _{3mm}	Vazão (cm ³ /s)
Microesfera de Vidro (MEV)	GT2	0	0,73	0,69	0,17	0,192
		25	0,72	0,66	0,17	0,192
		50	0,71	0,63	0,17	0,192
		100	0,68	0,56	0,17	0,186
		500	0,70	0,63	0,17	0,179
		1000	0,61	0,83	0,44	0,060
		2000	1,00	2,08	2,78	0,008
	GT3	0	0,72	0,66	0,63	0,188
		25	0,71	0,65	0,63	0,187
		50	0,71	0,65	0,63	0,187
		100	0,70	0,64	0,62	0,183
		500	0,70	0,64	0,57	0,155
		1000	0,78	0,86	0,98	0,113
		2000	0,82	0,88	1,07	0,056
	GT4	0	0,72	0,82	0,54	0,213
		25	0,70	0,79	0,55	0,201
		50	0,69	0,76	0,56	0,190
		100	0,71	0,82	0,60	0,181
		500	0,83	1,16	1,22	0,105
		1000	0,81	1,30	1,65	0,043
		2000	0,81	1,41	1,79	0,030
Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	GT1	0	0,99	1,39	2,14	0,225
		25	1,01	1,47	2,26	0,225
		50	1,01	1,47	2,35	0,222
		100	0,98	1,41	2,18	0,226
		500	1,01	1,42	2,22	0,196
		1000	1,07	1,71	2,84	0,150
		2000	1,11	1,74	2,96	0,092
	GT2	0	1,13	1,39	2,92	0,196
		25	1,15	1,40	2,94	0,196
		50	1,15	1,39	2,92	0,189
		100	1,19	1,51	3,06	0,186
		500	1,23	1,54	3,29	0,167
		1000	1,24	1,68	3,58	0,150
		2000	1,40	2,22	4,87	0,128
	GT3	0	0,55	0,56	0,59	0,254
		25	0,52	0,53	0,47	0,275
		50	0,53	0,46	0,32	0,261
		100	0,54	0,49	0,39	0,205
		500	0,55	0,66	1,35	0,108
		1000	0,66	0,98	1,95	0,057
		2000	1,02	2,18	3,10	0,025
	GT4	0	0,71	0,89	0,99	0,296
		25	0,67	0,85	0,90	0,292
		50	0,69	0,84	0,92	0,283
		100	0,69	0,79	0,84	0,267
		500	0,73	0,84	0,86	0,233
		1000	0,81	1,11	1,57	0,190
		2000	0,84	1,28	1,68	0,167

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de filtração – cont.

Material Granular	Geotêxtil	Tensão (kPa)	GR _{ASTM}	GR _{Mod}	GR _{3mm}	Vazão (cm ³ /s)
Areia Bem Graduada (ABG)	GT1	0	0,60	1,21	2,49	0,031
		25	0,72	1,63	3,52	0,026
		50	0,84	2,05	4,55	0,022
		100	0,87	2,24	4,70	0,015
		500	1,00	2,64	5,13	0,009
		1000	1,21	2,80	5,70	0,007
		2000	1,00	2,81	5,83	0,004
	GT2	0	0,32	0,60	0,73	0,079
		25	0,35	0,67	0,88	0,063
		50	0,37	0,73	1,03	0,047
		100	0,60	1,62	3,33	0,019
		500	1,30	3,12	6,67	0,009
		1000	1,33	3,47	7,41	0,005
		2000	1,44	3,82	7,41	0,005

Observou-se que a total estabilização dos valores de GR e da vazão ocorreram em torno de 5 dias para os sistemas formados pela areia grossa uniforme (AGU), 6 dias para os sistemas formados pela areia bem graduada (ABG), 6 dias para os sistemas formados pelo rejeito de minério de ferro (RMF) e 6 dias para os sistemas formados pelas microesferas de vidro (MEV). Os dados dos ensaios de filtração são apresentados no Apêndice A.

Uma vez que para todos os ensaios o comportamento da vazão foi similar, apresentando um decréscimo durante todos os ensaios e vindo a estabilizar ao final de cada nível de tensão, seus resultados não serão abordados em detalhes, sendo apresentados nos gráficos das figuras com os resultados dos ensaios de filtração para os diferentes sistemas.

5.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA GROSSA UNIFORME – AGU

5.3.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU-GT1

De acordo com os resultados de ensaio com o sistema AGU-GT1, pode-se observar, conforme Figuras 5.1 e 5.2, a redução de permeabilidades do sistema solo-geotêxtil com o tempo e tensão aplicada, particularmente para tensões normais maiores que 100 kPa. A permeabilidade do solo ($k_{7/9}$) apresentou pouca variação.

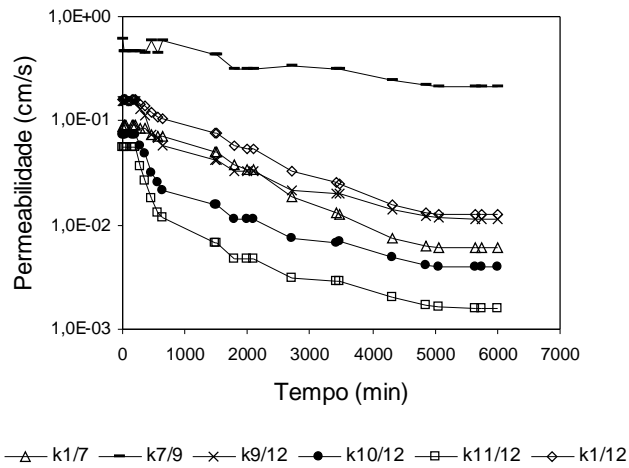


Figura 5.1 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT1.

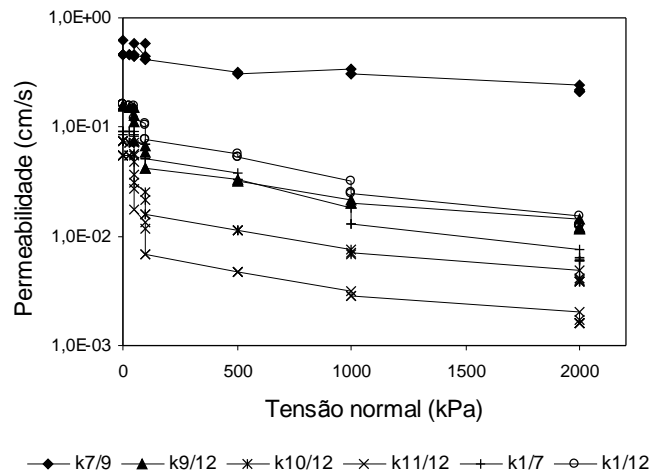


Figura 5.2 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT1.

Os valores de GR apresentaram um aumento considerável com o tempo para tensões acima de 100 kPa, principalmente os valores de GR_{3mm} (Figuras 5.3 e 5.4). Como o solo AGU tem permeabilidade elevada, uma redução na permeabilidade do geotêxtil se reflete de forma mais importante nos valores de GR. Embora o material granular seja uma areia grossa, há finos na sua matriz (Figura 3.3), podendo vir a ocorrer um acúmulo dessas partículas finas na região próxima ao geotêxtil, o que possivelmente contribui para o aumento do valor de GR. A vazão do sistema apresentou redução moderada durante o ensaio (Figura 5.5).

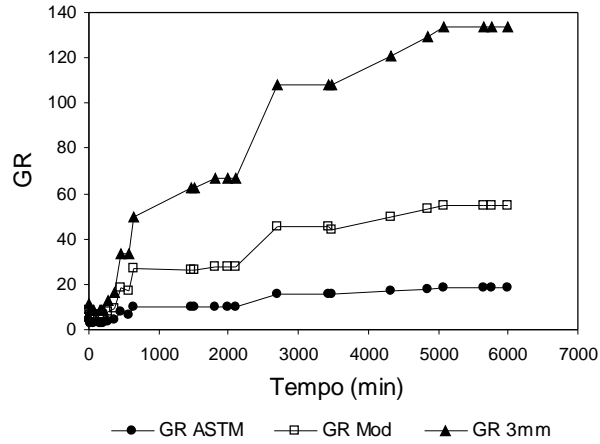


Figura 5.3 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT1.

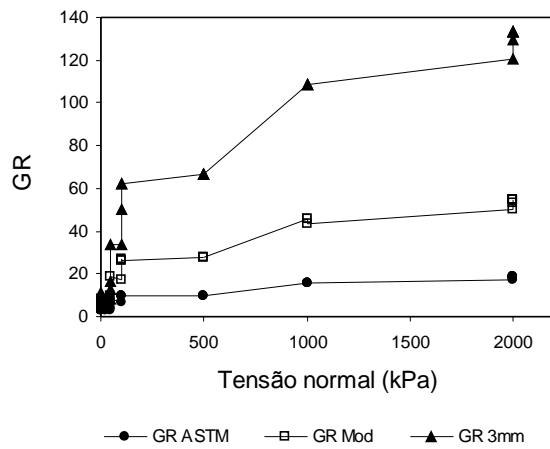


Figura 5.4 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT1.

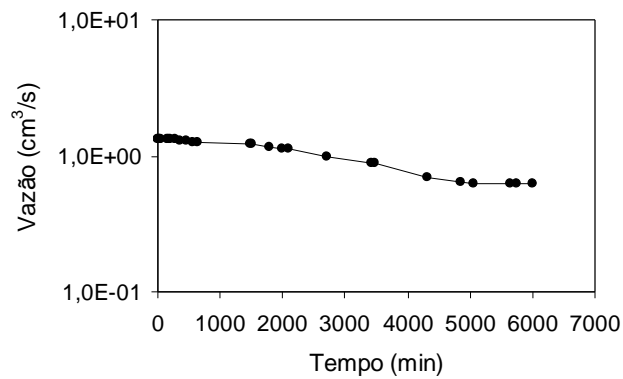


Figura 5.5 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT1.

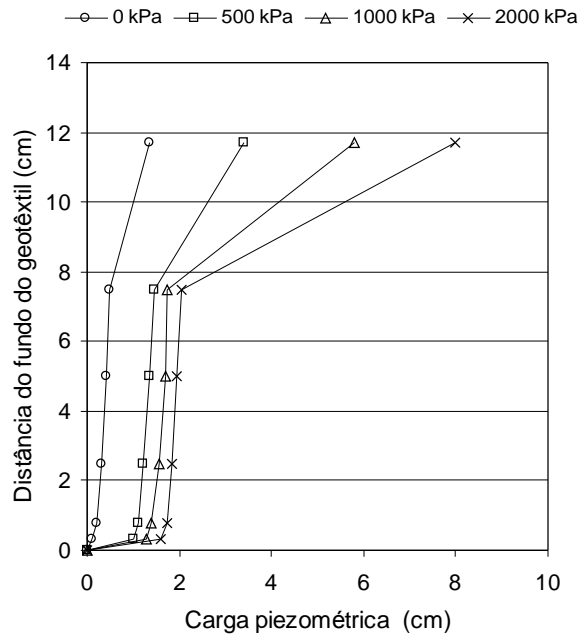


Figura 5.6 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT1.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema AGU-GT1 é apresentada na Figura 5.6. Observa-se o aumento da carga hidráulica no topo da amostra com o acréscimo de tensão. A distribuição de carga através do solo compreendido entre as alturas de 0,3 e 7,5 cm em relação ao geotêxtil (piezômetros 11 e 7) é praticamente linear.

5.3.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU-GT2

Os resultados de ensaio com o sistema AGU-GT2, apresentaram comportamento semelhante aos resultados do sistema AGU-GT1. Conforme pode-se observar nas Figuras 5.7 e 5.8, ocorre também uma redução de permeabilidades com o tempo e tensão aplicada. Para tensões normais maiores que 100 kPa, o decréscimo da permeabilidade do sistema solo-geotêxtil ($k_{11/12}$) ocorre de maneira mais acentuada em relação ao decréscimo da permeabilidade do solo ($k_{7/9}$).

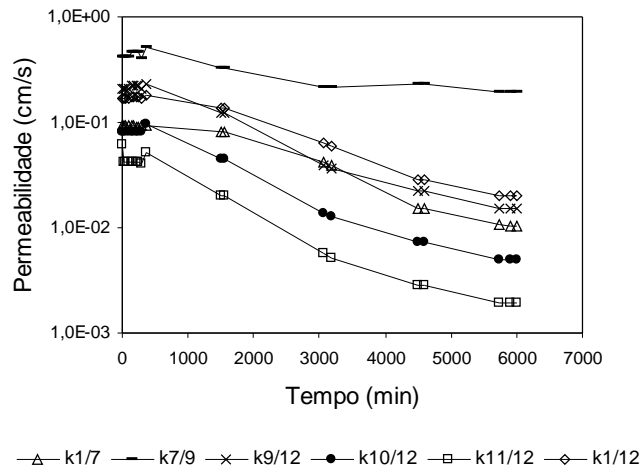


Figura 5.7 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT2.

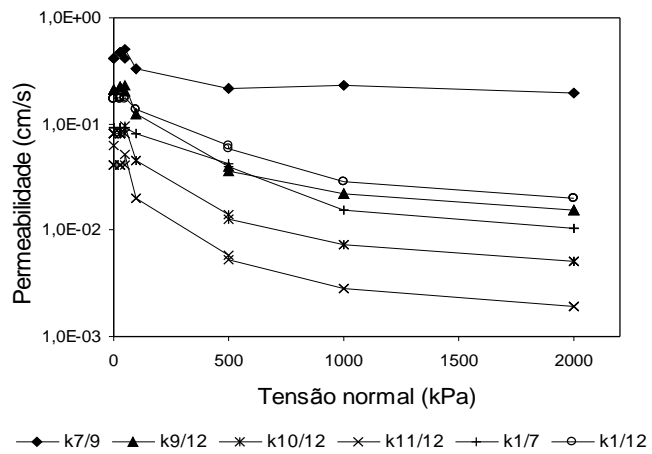


Figura 5.8 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT2.

Os valores de GR, de forma semelhante ao ensaio com o sistema AGU-GT1, também apresentaram aumento considerável com o tempo para tensões acima de 100 kPa, conforme pode-se notar nas Figuras 5.9 e 5.10.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema AGU-GT2 é apresentada na Figura 5.12.

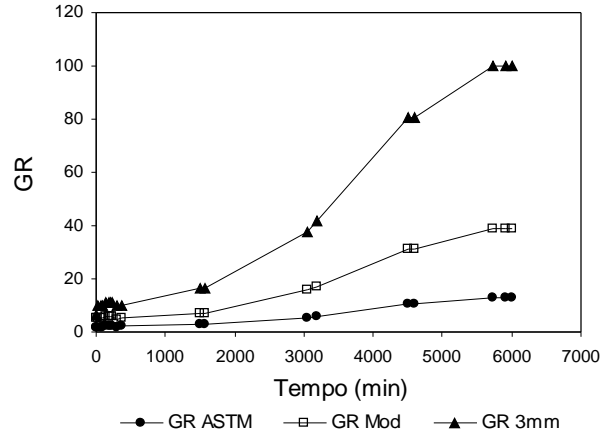


Figura 5.9 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT2.

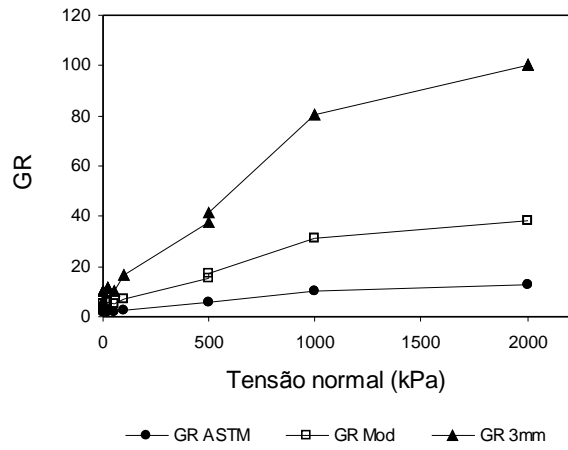


Figura 5.10 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT2.

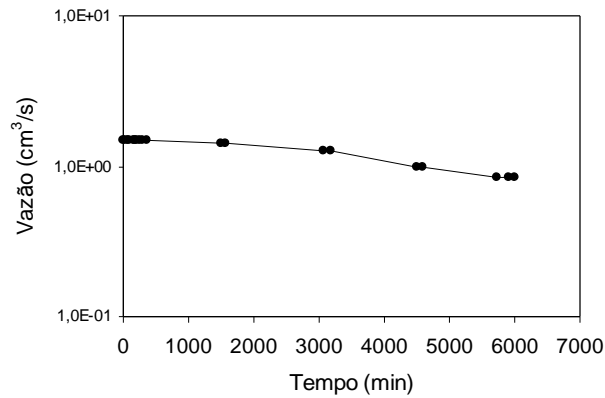


Figura 5.11 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT2.

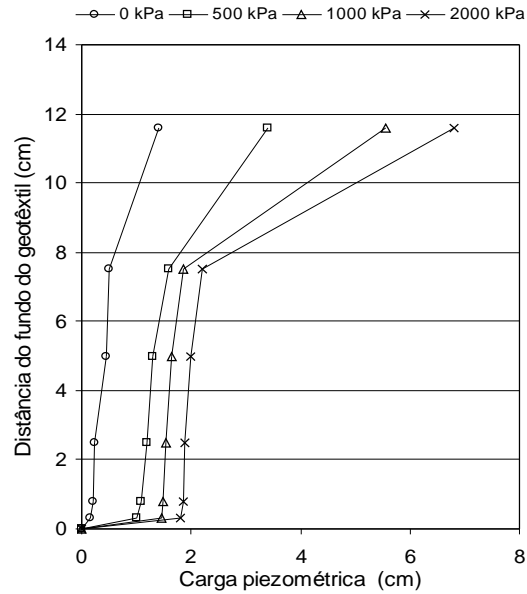


Figura 5.12 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT2.

5.3.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU-GT3

De modo semelhante aos sistemas AGU-GT1 e AGU-GT2, no comportamento do sistema AGU-GT3 ocorre também uma redução de permeabilidades com o tempo e tensão aplicada (Figuras 5.13 e 5.14), principalmente para tensões normais maiores que 100 kPa, onde os valores de GR apresentaram aumento considerável, conforme nota-se nas Figuras 5.15 e 5.16.

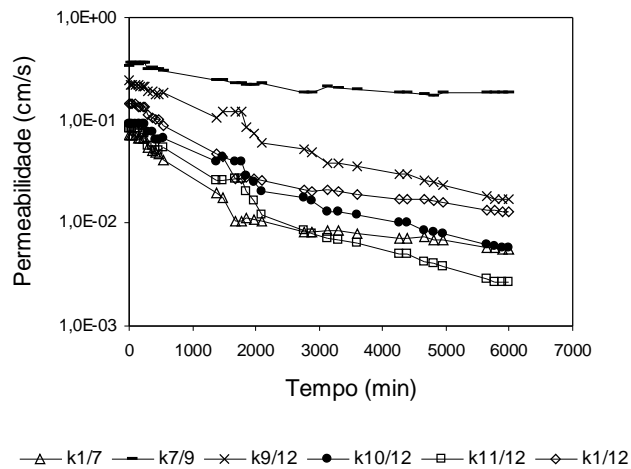


Figura 5.13 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT3.

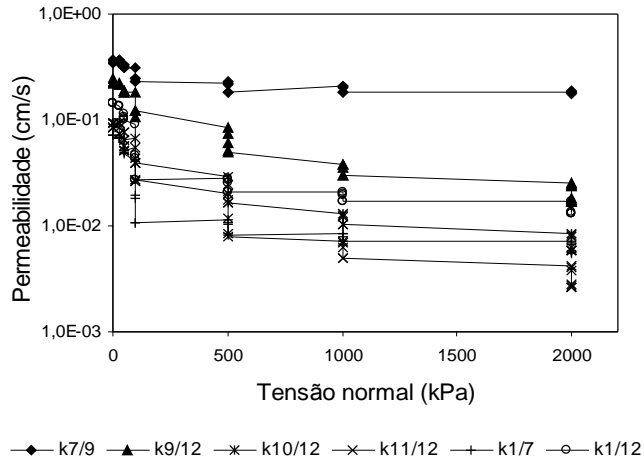


Figura 5.14 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT3.

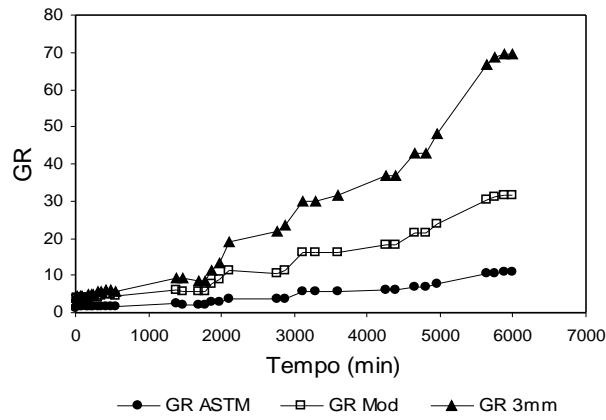


Figura 5.15 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT3.

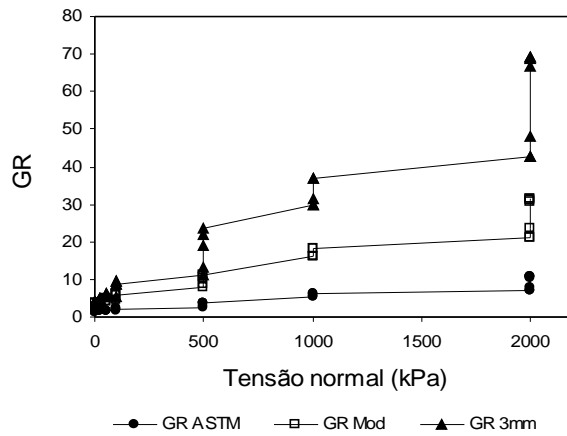


Figura 5.16 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT3.

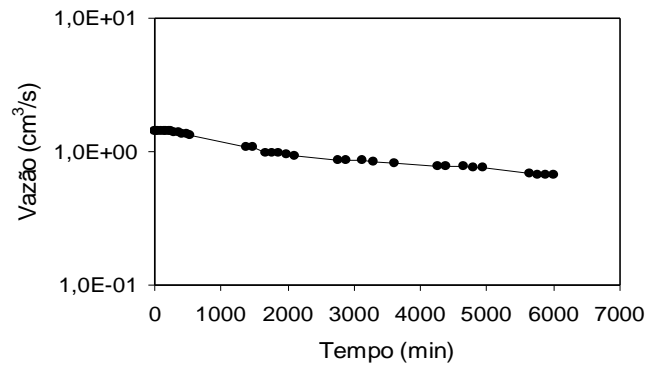


Figura 5.17 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT3.

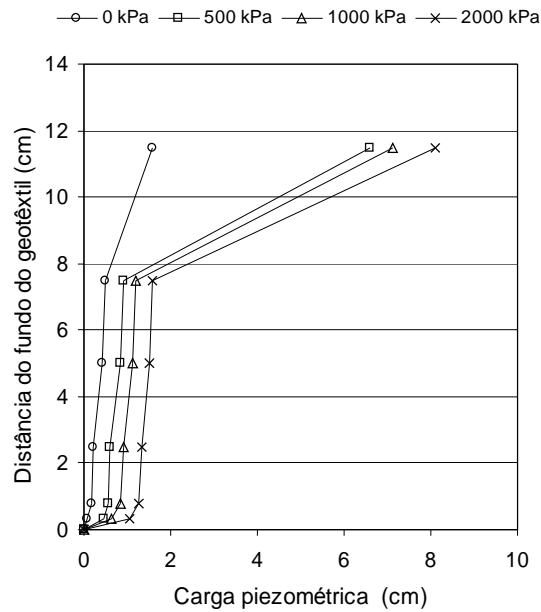


Figura 5.18 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT3.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema AGU-GT3 é apresentada na Figura 5.18. O acentuado aumento da perda de carga no topo da amostra pode ser consequência de processo de colmatção no contato placa perfurada-solo para elevadas tensões normais.

5.3.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA AGU-GT4

No sistema AGU-GT4, a redução de permeabilidades com o tempo e variação de tensão ocorre conforme já descrito anteriormente para tensões acima de 100 kPa, porém observa-se uma menor redução das permeabilidades no sistema solo-geotêxtil ($k_{9/12}$, $k_{10/12}$ e $k_{11/12}$) em relação aos sistemas anteriores. A permeabilidade do solo ($k_{7/9}$) mantém-se praticamente constante durante o ensaio, como se pode notar nas Figuras 5.19 e 5.20.

A variação dos valores de GR ocorrem conforme o comportamento apresentado nos ensaios anteriores (Figuras 5.21 e 5.22), porém para os sistemas compostos pela Areia Grossa Uniforme, este foi o ensaio que apresentou os menores valores de GR.

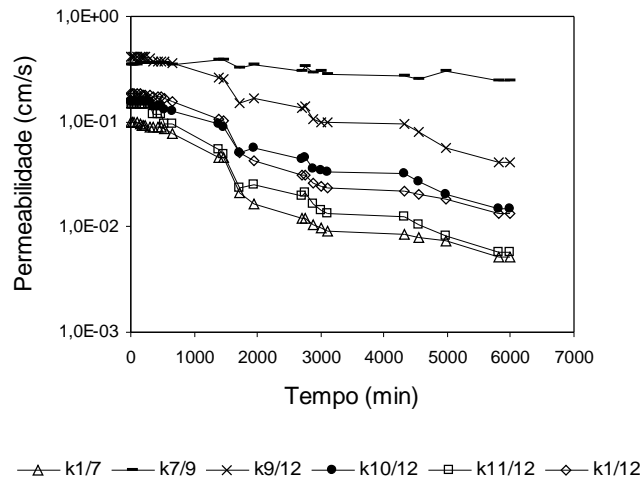


Figura 5.19 – Permeabilidade x Tempo para o sistema AGU-GT4.

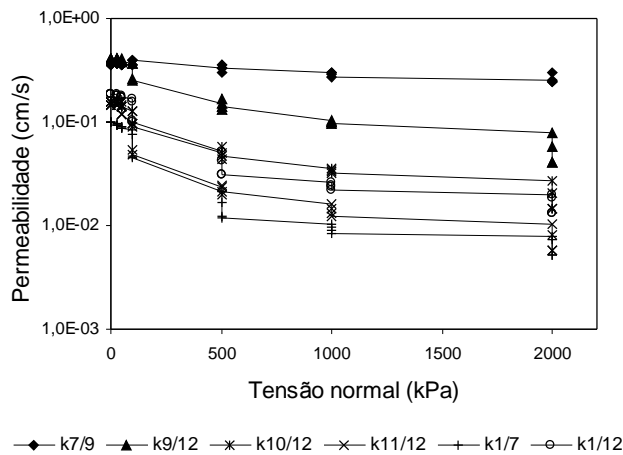


Figura 5.20 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema AGU-GT4.

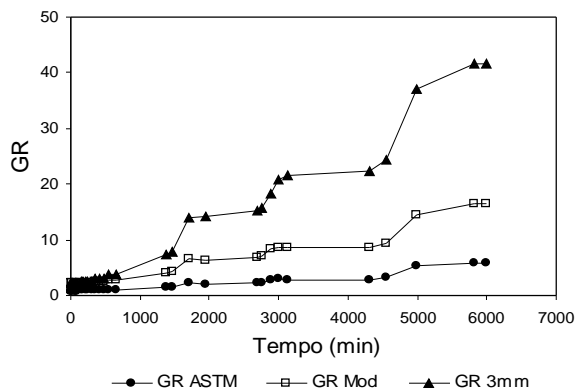


Figura 5.21 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema AGU-GT4.

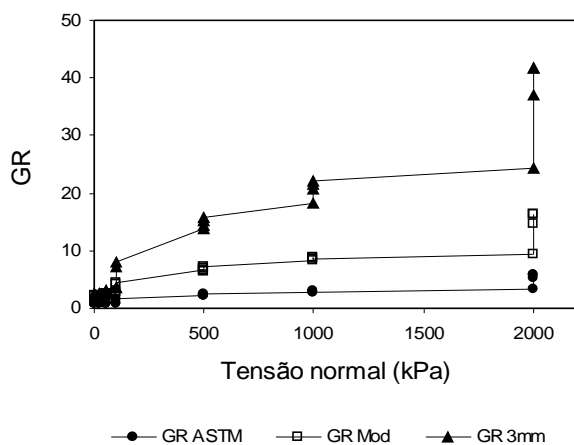


Figura 5.22 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema AGU-GT4.

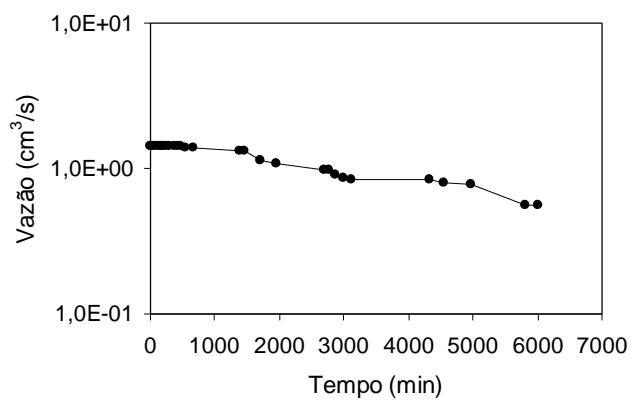


Figura 5.23 – Vazão x Tempo para o sistema AGU-GT4.

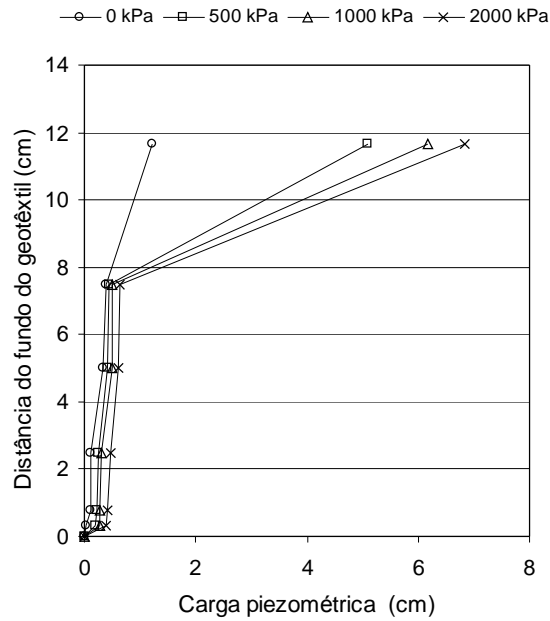


Figura 5.24 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema AGU-GT4.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema AGU-GT4 é apresentada na Figura 5.24, com comportamento semelhante aos obtidos anteriormente.

5.4 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM MICRO-ESFERAS DE VIDRO – MEV

5.4.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV–GT1

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam as variações da permeabilidade do sistema com o tempo e tensões de compressão. Pode-se observar que as reduções de permeabilidade até a tensão de 500 kPa são relativamente pequenas, a partir da qual uma brusca redução é notada, principalmente na permeabilidade $k_{1/7}$, possivelmente devido a filme de colmatção no topo da amostra. Este comportamento também pode estar associado às quebras de microesferas.

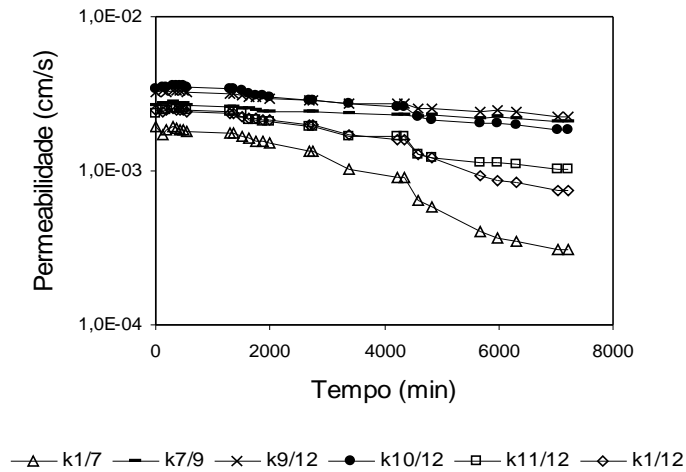


Figura 5.25 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT1.

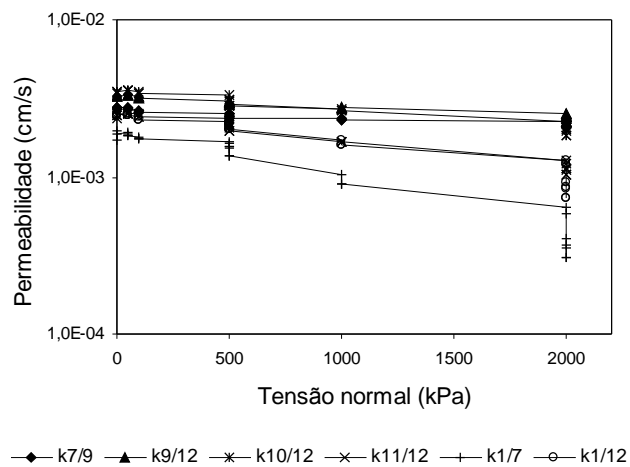


Figura 5.26 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT1.

De acordo com as Figuras 5.27 e 5.28, com o decorrer do tempo, os valores de GR_{ASTM} e GR_{Mod} são relativamente baixos até a tensão de 2000 kPa. Isso indica que algum nível de “piping” ocorreu nos estágios iniciais do ensaio, embora a amostra de microesferas tenha se mantido estável.

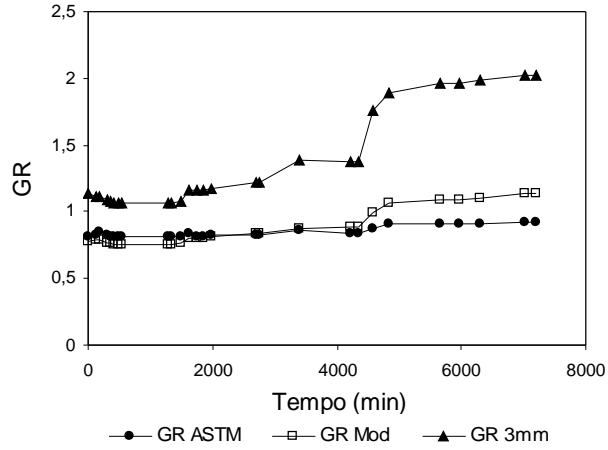


Figura 5.27 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT1.

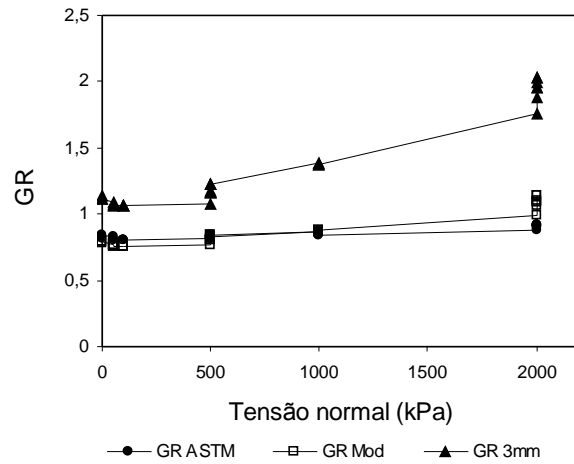


Figura 5.28 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT1.

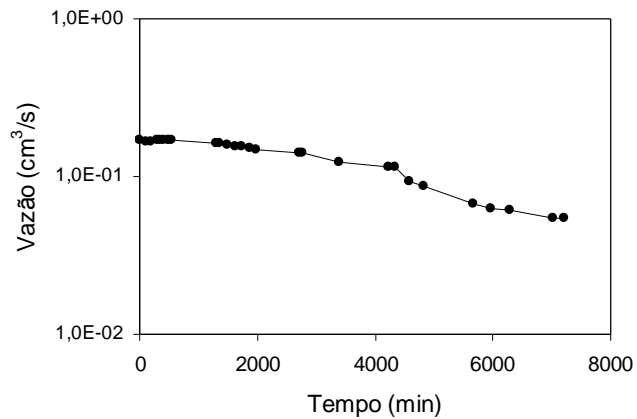


Figura 5.29 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT1.

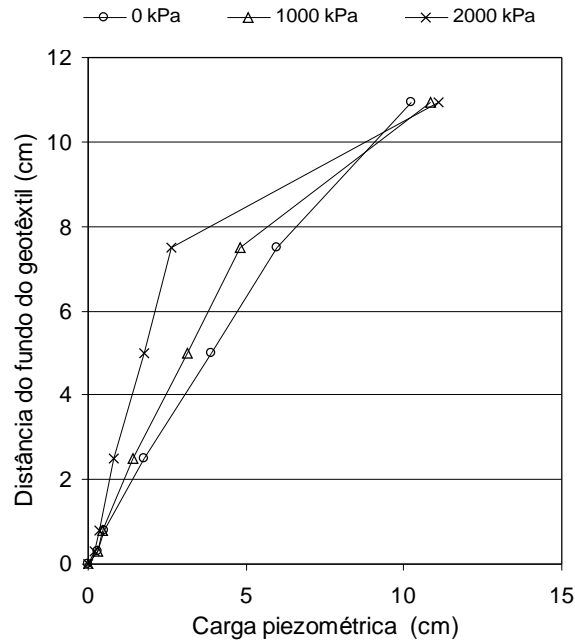


Figura 5.30 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT1.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema MEV-GT1 é apresentada na Figura 5.30. Observa-se uma perda de carga próxima ao topo da amostra com o tempo e o acréscimo de tensão, o que pode representar a formação de um filme no topo da amostra.

5.4.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV-GT2

Semelhante ao sistema MEV-GT1, as Figuras 5.31 e 5.32 apresentam as variações da permeabilidade do sistema com o tempo e tensões de compressão. Pode-se observar que as reduções de permeabilidade até a tensão de 1000 kPa são relativamente pequenas, a partir da qual uma brusca redução é notada, provavelmente associada às quebras de microesferas.

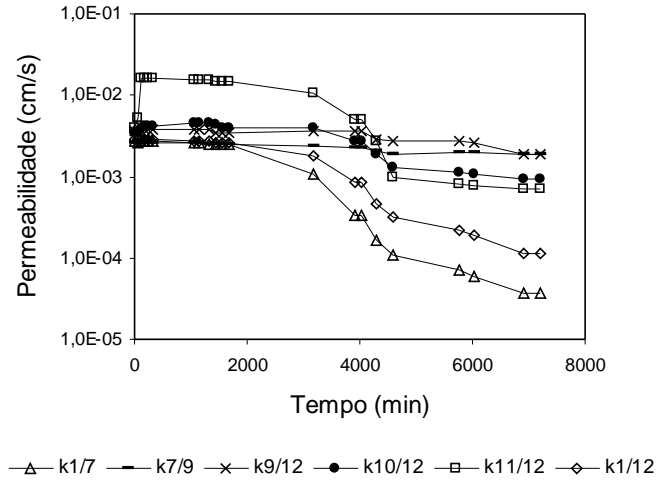


Figura 5.31 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT2.

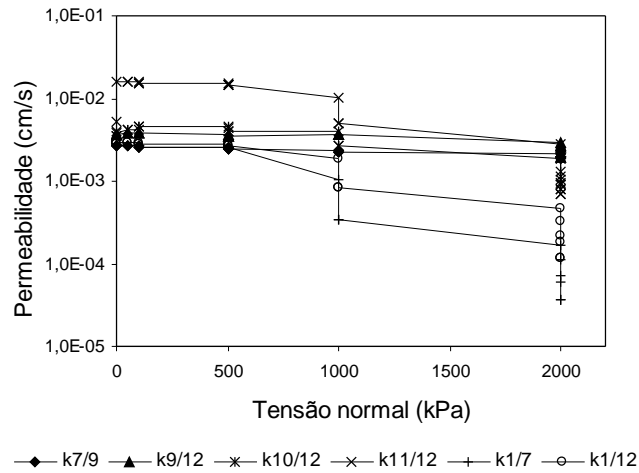


Figura 5.32 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT2.

Os valores de GR, de forma semelhante ao observado no ensaio com o sistema MEV-GT1, com o decorrer do tempo e variação de tensão, também são relativamente baixos até a tensão de 2000 kPa, conforme mostram as Figuras 5.33 e 5.34, principalmente os valores de GR_{3mm}. Isto indica que algum nível de “piping” ocorreu até a tensão normal de 1000 kPa, embora a amostra de microesferas tenha se mantido estável.

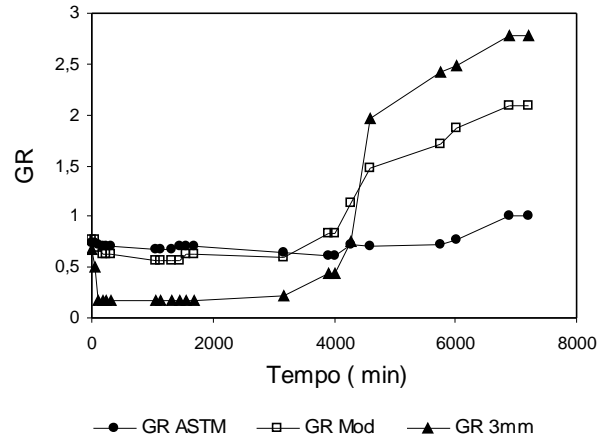


Figura 5.33 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT2.

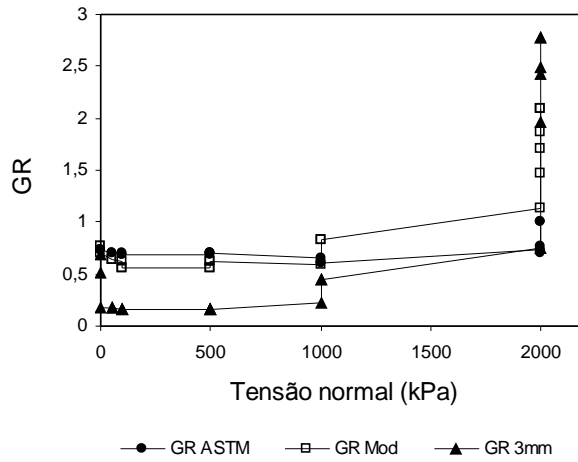


Figura 5.34 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT2.

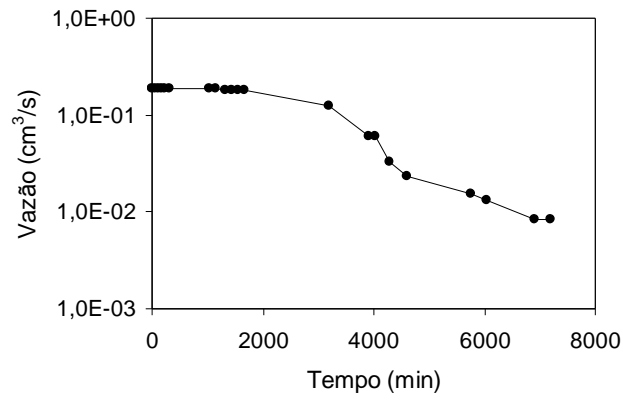


Figura 5.35 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT2.

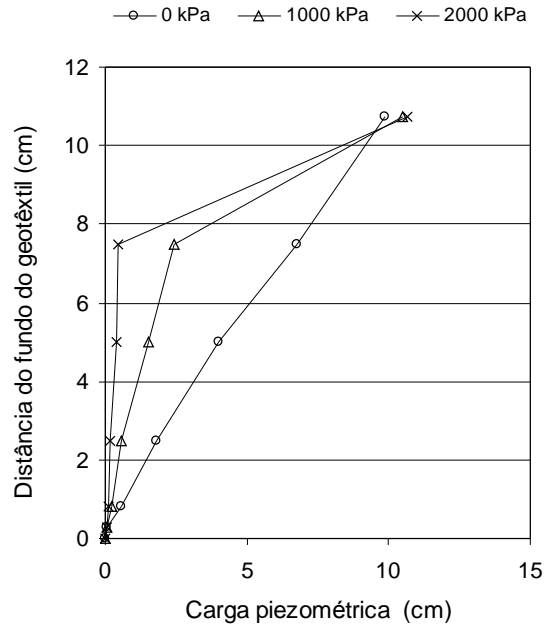


Figura 5.36 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT2.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema MEV-GT2 é apresentada na Figura 5.36.

5.4.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV-GT3

Para o sistema MEV-GT3, as Figuras 5.37 e 5.38 denotam uma pequena variação da permeabilidade do solo ($k_{7/9}$), porém há um aumento da permeabilidade nos sistemas solo-geotêxtil ($k_{9/12}$, $k_{10/12}$ e $k_{11/12}$) decorrente da ocorrência de “piping” durante a maior parte do ensaio. Observa-se ainda uma maior redução na permeabilidade do solo próximo ao topo da amostra ($k_{1/7}$), possivelmente devido à interação entre a placa rígida do topo e o solo.

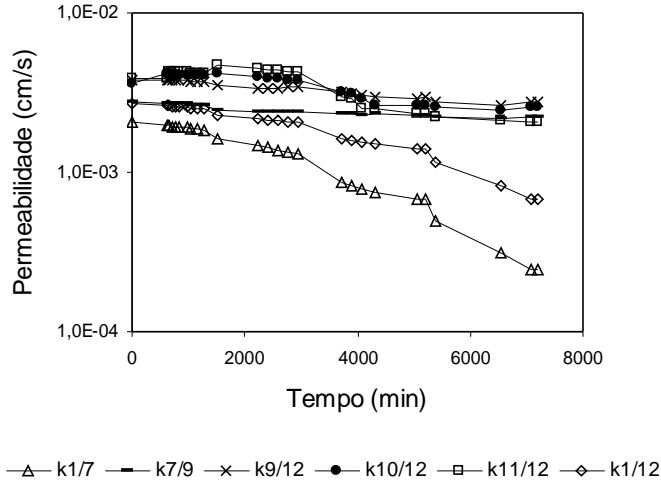


Figura 5.37 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT3.

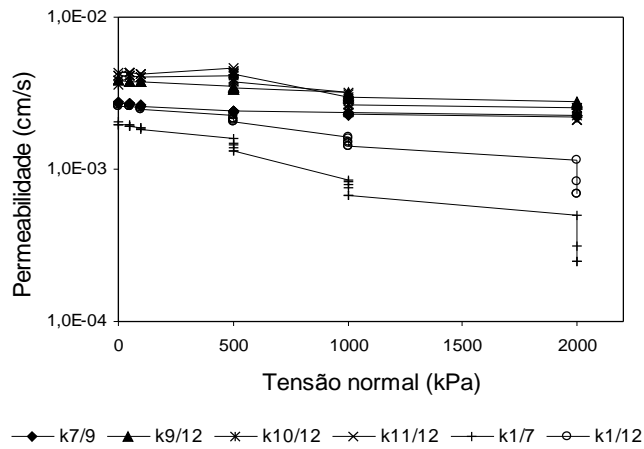


Figura 5.38 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT3.

A partir das Figuras 5.39 e 5.40, pode-se observar uma certa ocorrência de “piping”, principalmente para tensões inferiores a 1000 kPa, a partir da qual nota-se a estabilização da amostra, porém apresentando valores de GR_{ASTM} e GR_{Mod} inferiores a 1 (μm), até a tensão de 2000 kPa.

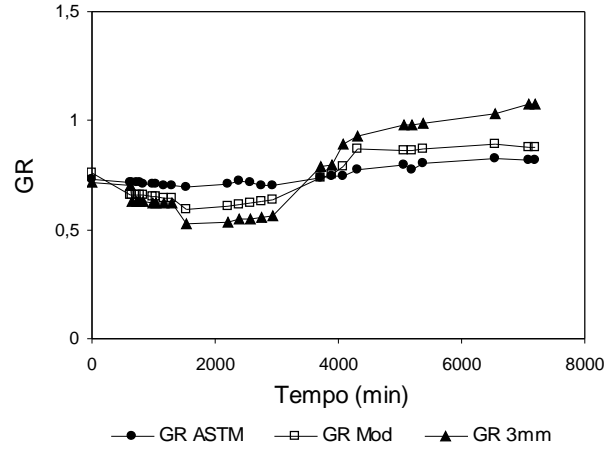


Figura 5.39 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT3.

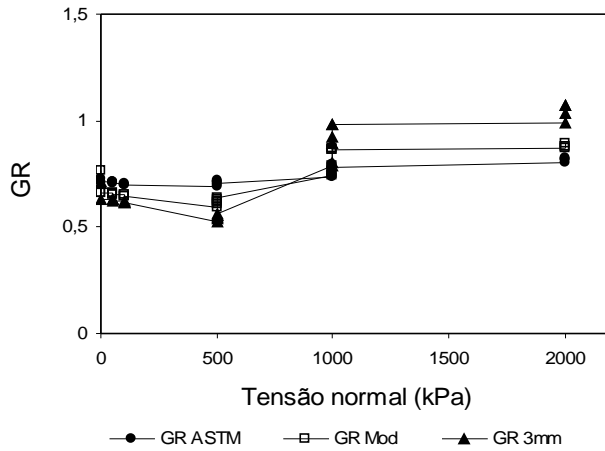


Figura 5.40 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT3.

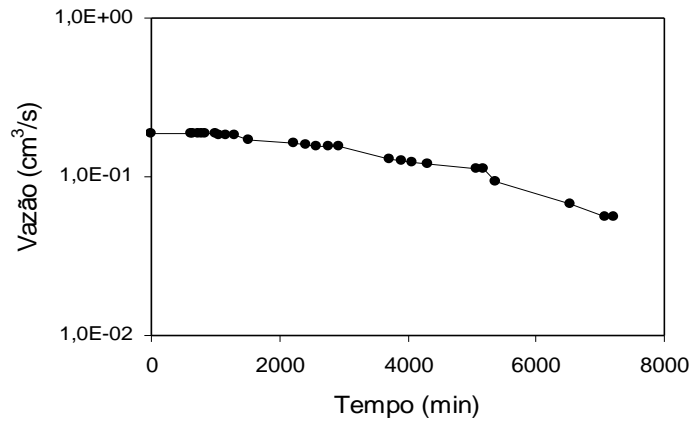


Figura 5.41 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT3.

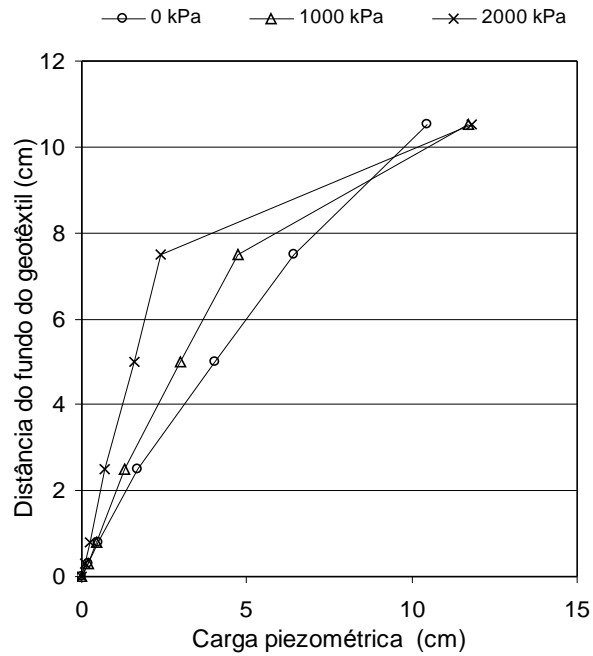


Figura 5.42 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT3.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema MEV-GT3 é apresentada na Figura 5.42.

5.4.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA MEV-GT4

Semelhantemente aos sistemas solo-geotêxtil anteriores compostos pelas microesferas de vidro, de acordo com as Figuras 5.43 e 5.44, observa-se uma pequena variação na permeabilidade do solo ($k_{7/9}$), acompanhando a mesma tendência das permeabilidades do sistema solo-geotêxtil que também apresentaram pouca variação. A permeabilidade próxima ao topo da amostra apresentou uma redução significativa, como observado em outros ensaios.

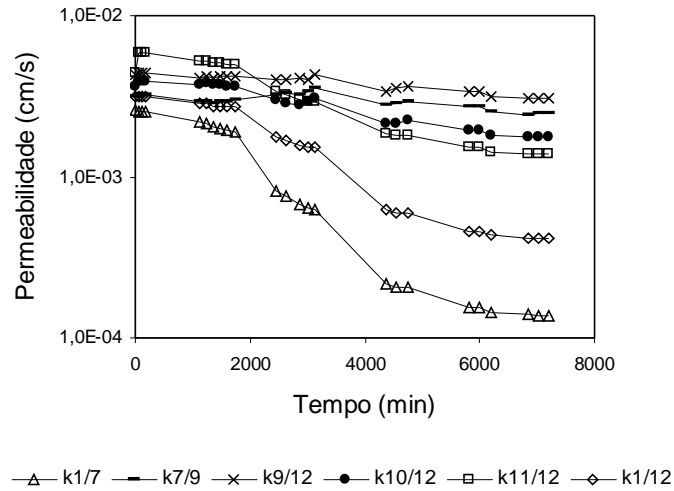


Figura 5.43 – Permeabilidade x Tempo para o sistema MEV-GT4.

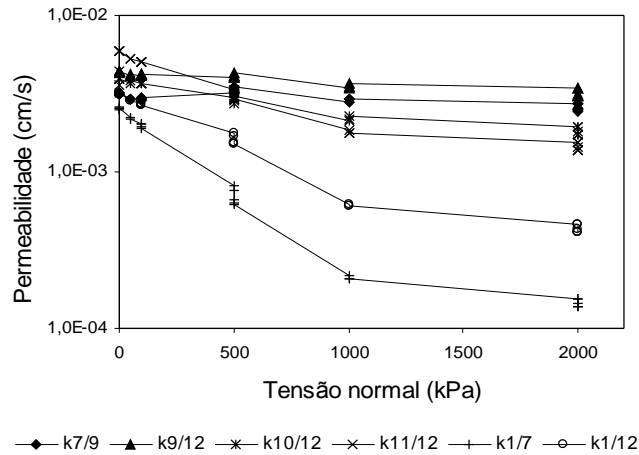


Figura 5.44 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema MEV-GT4.

Conforme mostrado nas Figuras 5.45 e 5.46, ocorreu um certo grau de “piping” no sistema até a tensão de 2000 kPa representado pelo GR_{ASTM} , o qual mantém-se inferior a 1 (um). Isto não foi observado para os valores de GR_{Mod} e GR_{3mm} , os quais tendem a valores de GR maiores que 1 (um) a partir de 500 kPa, denotando a estabilidade da amostra.

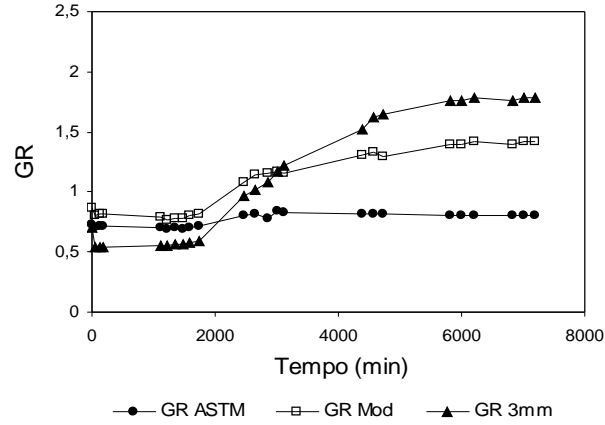


Figura 5.45 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema MEV-GT4.

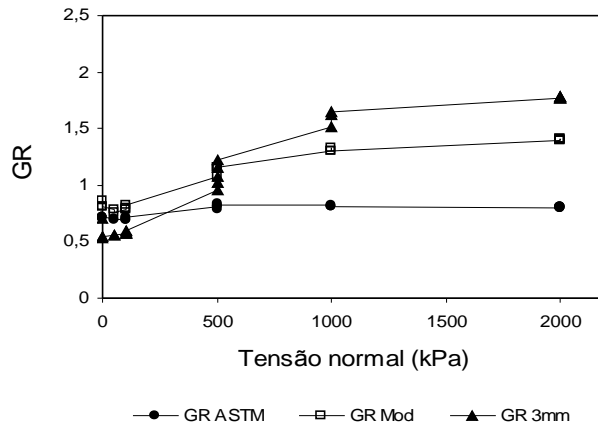


Figura 5.46 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema MEV-GT4.

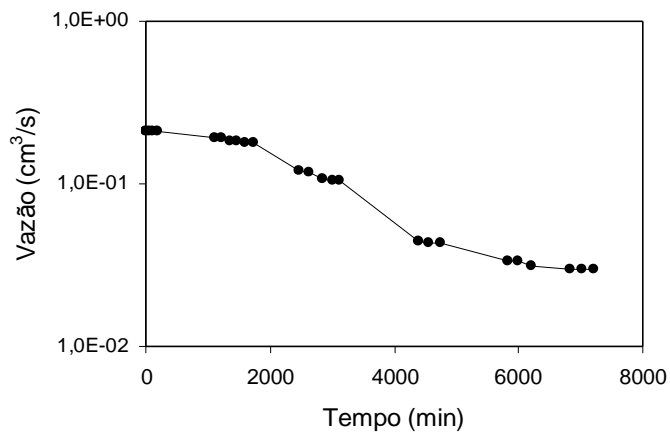


Figura 5.47 – Vazão x Tempo para o sistema MEV-GT4.

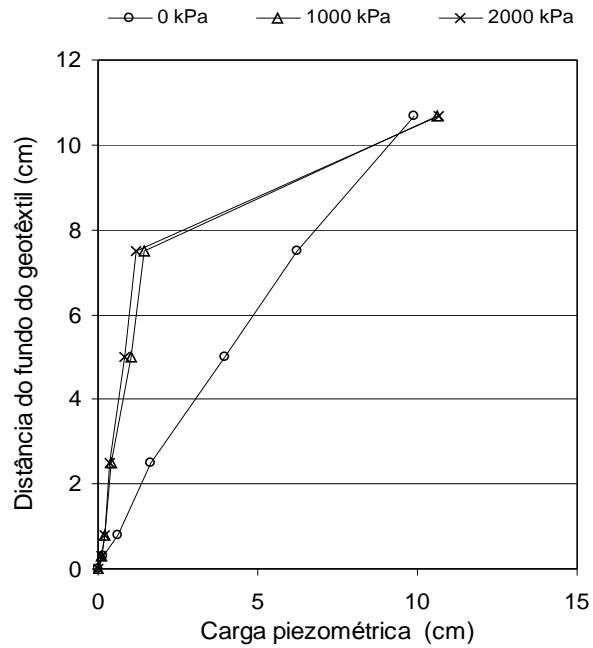


Figura 5.48 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema MEV-GT4.

A Figura 5.48, apresenta a variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema MEV-GT4.

5.5 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO – RMF

5.5.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF-GT1

O sistema RMF-GT1 apresentou pequena variação na permeabilidade do solo ($k_{7/9}$), tendendo a valores quase constantes, conforme mostram as Figuras 5.49 e 5.50. As permeabilidades dos sistemas solo-geotêxtil apresentaram comportamento semelhante com valores inferiores à do solo. Observa-se, porém, que a partir de tensões de 500 kPa a permeabilidade próxima ao topo da amostra começa a decrescer, indicando um possível cegamento no topo da amostra.

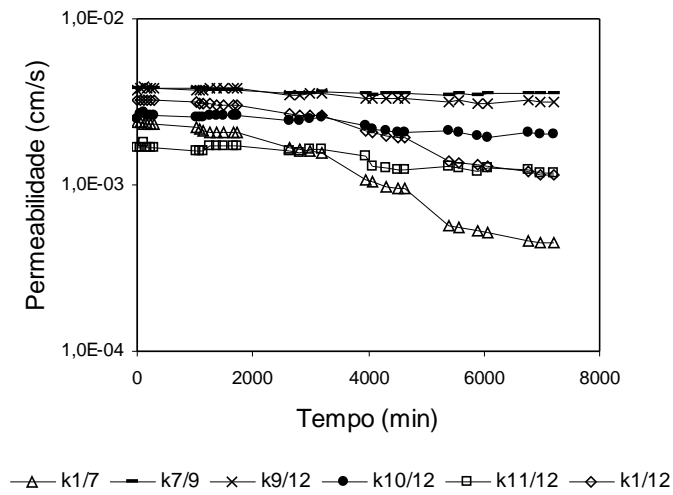


Figura 5.49 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT1.

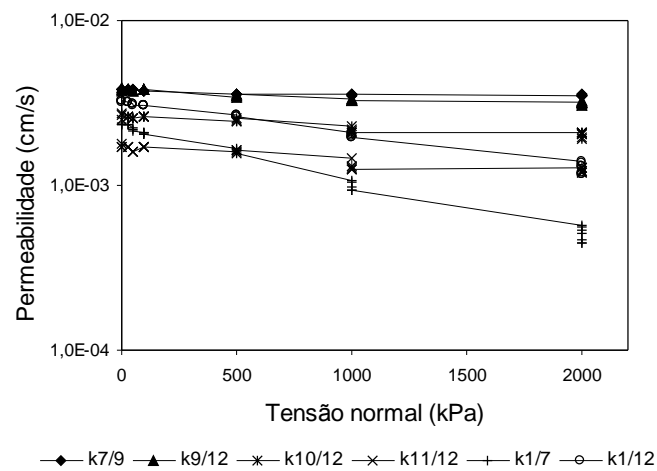


Figura 5.50 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT1.

De acordo com as Figuras 5.51 e 5.52, os valores de GR apresentaram pequenas variações ao longo do tempo e acréscimo de tensão, em função da pouca variação de permeabilidade no sistema, chegando ao final do ensaio a valores que denotam a estabilidade da amostra.

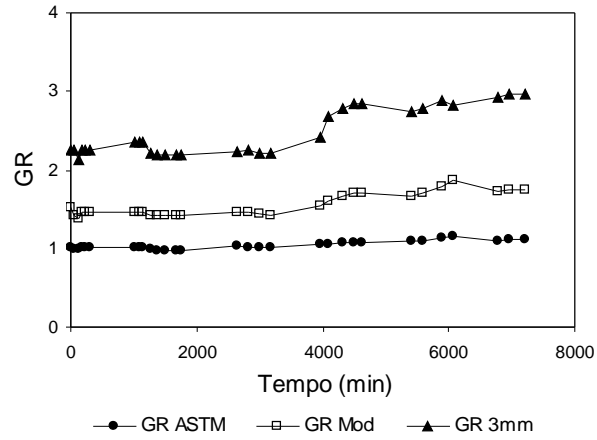


Figura 5.51 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT1.

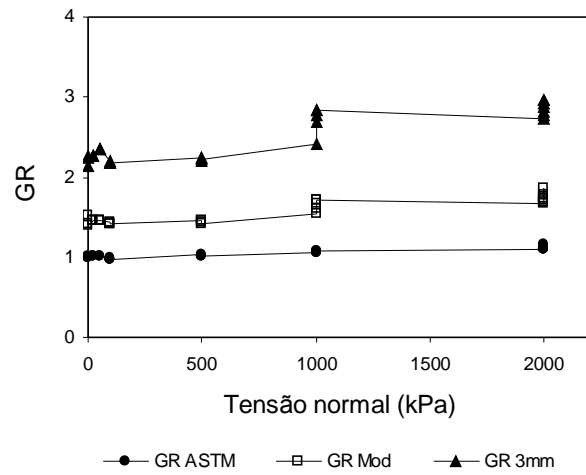


Figura 5.52 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT1.

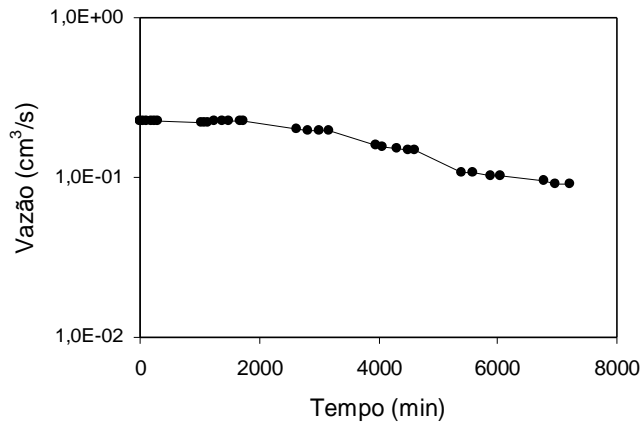


Figura 5.53 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT1.

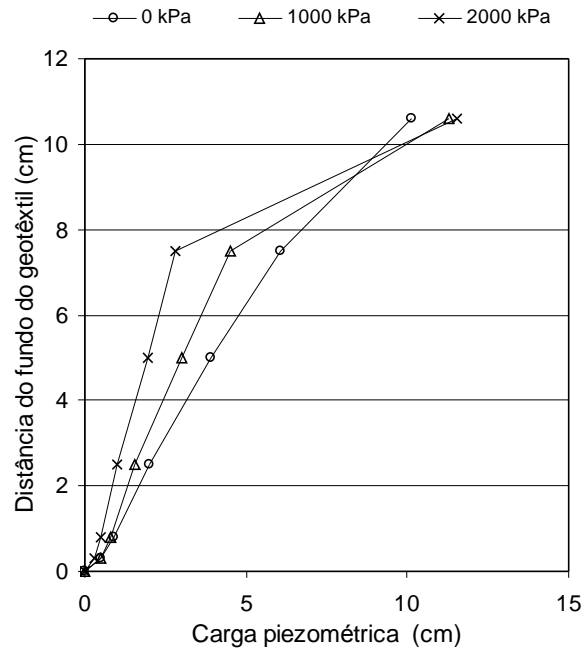


Figura 5.54 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT1.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema RMF-GT1 é apresentada na Figura 5.54. Observa-se também uma perda de carga próxima ao topo da amostra com o acréscimo de tensão.

5.5.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF-GT2

A partir das Figuras 5.55, 5.56, 5.57 e 5.58 pode-se observar que, nesse caso, as reduções de permeabilidades ao longo da altura da amostra e os aumentos no valor de GR foram menos sensíveis ao aumento do nível de tensões atuantes. Os valores de GR para o sistema RMF-GT2 apresentaram comportamento semelhante aos do sistema RMF-GT1.

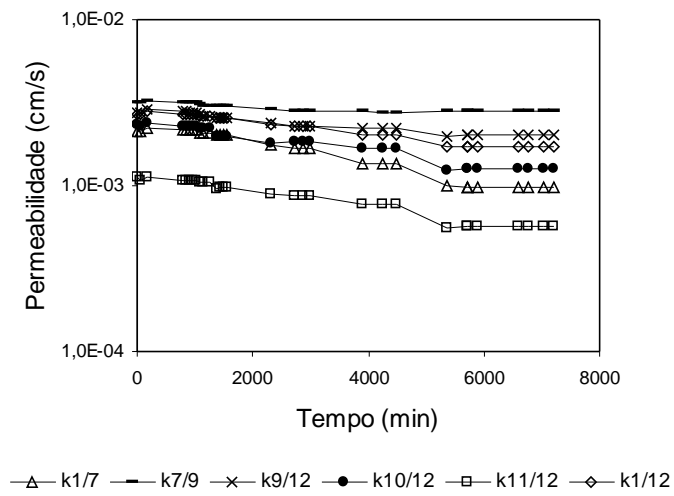


Figura 5.55 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT2.

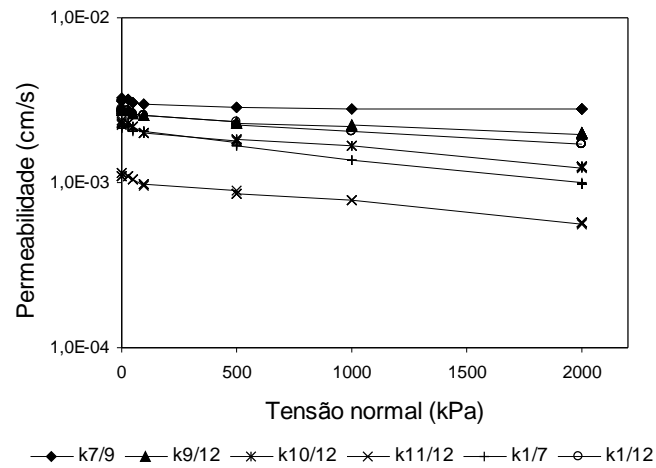


Figura 5.56 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT2.

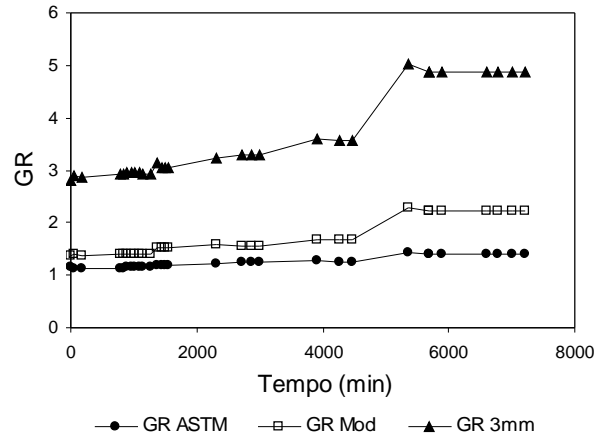


Figura 5.57 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT2.

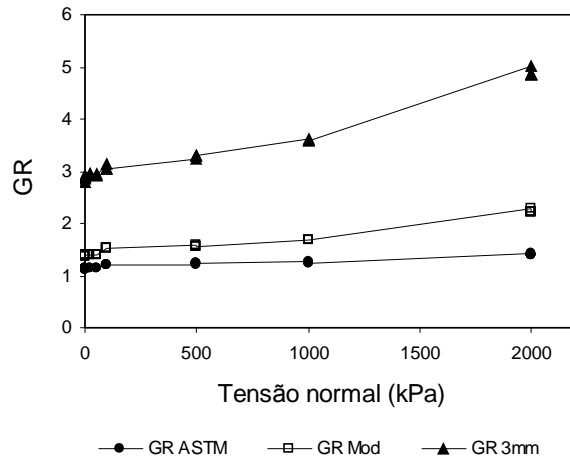


Figura 5.58 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT2.

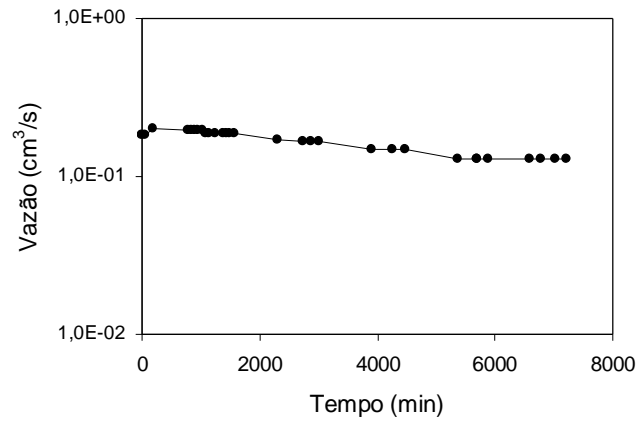


Figura 5.59 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT2.

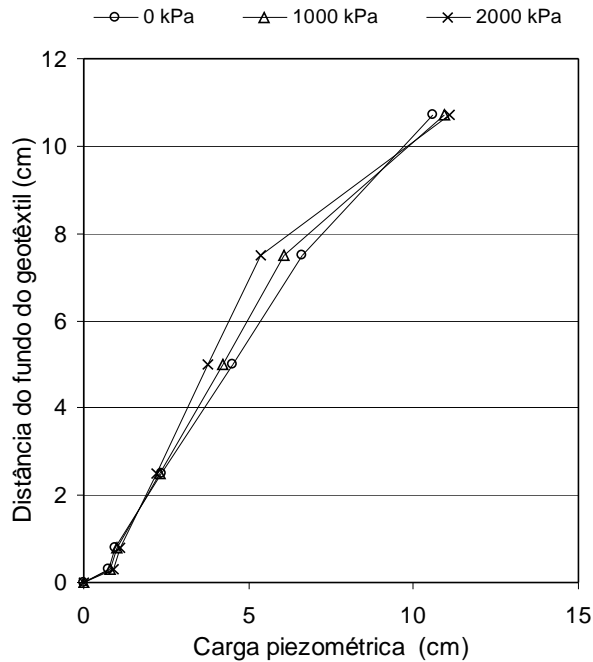


Figura 5.60 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT2.

A Figura 5.60, apresenta a variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema RMF-GT2.

5.5.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF-GT3

O comportamento do sistema RMF-GT3 com o tempo e variação de tensão, deu-se de maneira semelhante ao ensaio para o sistema RMF-GT1, apresentando a permeabilidade do solo tendendo a constante, conforme as Figuras 5.61 e 5.62. Houve um pequeno acréscimo na permeabilidade para o sistema solo-geotêxtil ($k_{10/12}$ e $k_{11/12}$), provocado possivelmente pelo carregamento de finos da matriz do solo próximo ao geotêxtil.

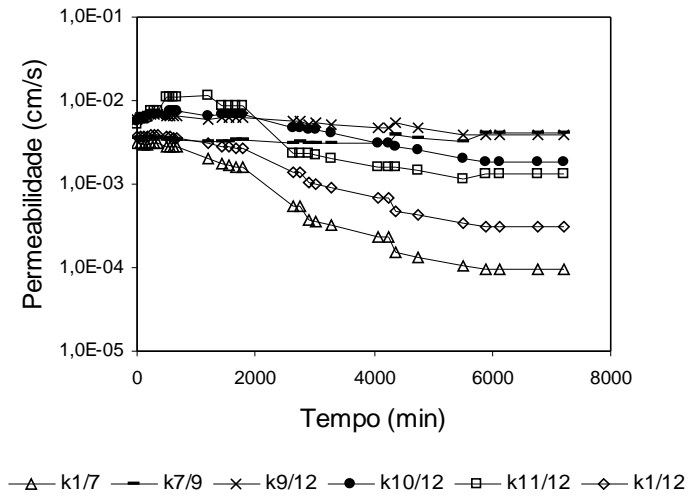


Figura 5.61 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT3.

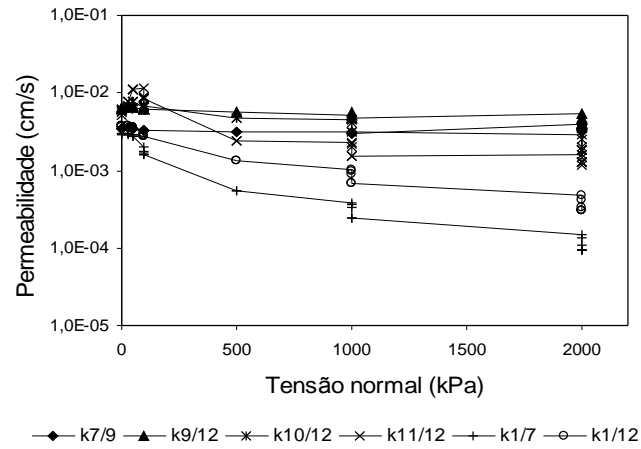


Figura 5.62 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT3.

Conforme apresentado nas Figuras 5.63 e 5.64, para tensões inferiores a 100 kPa, houve a ocorrência de um certo grau de “piping” caracterizado pelos valores de GR_{Mod} e GR_{3mm} , vindo a estabilizar com o tempo a partir de variações de tensões de 100 a 500 kPa.

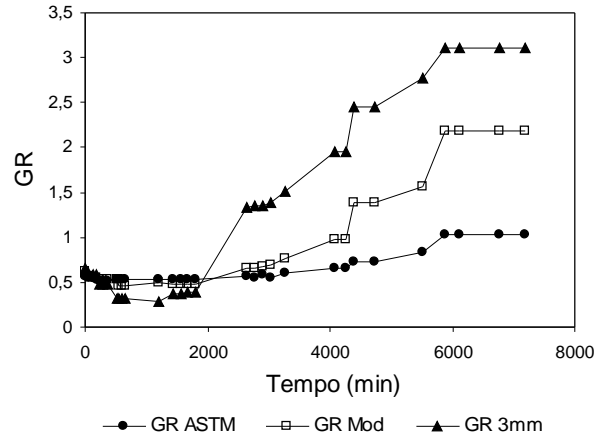


Figura 5.63 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT3.

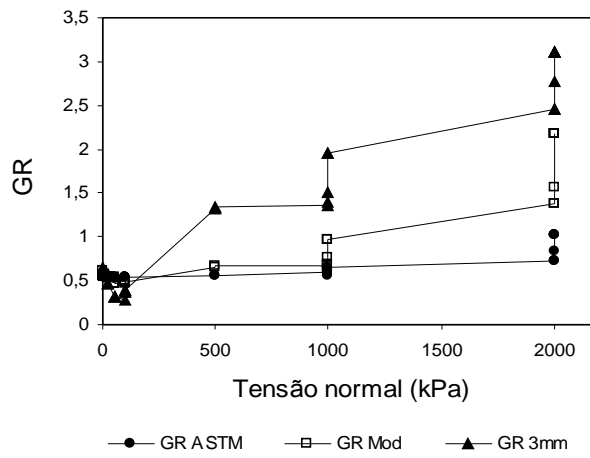


Figura 5.64 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT3.

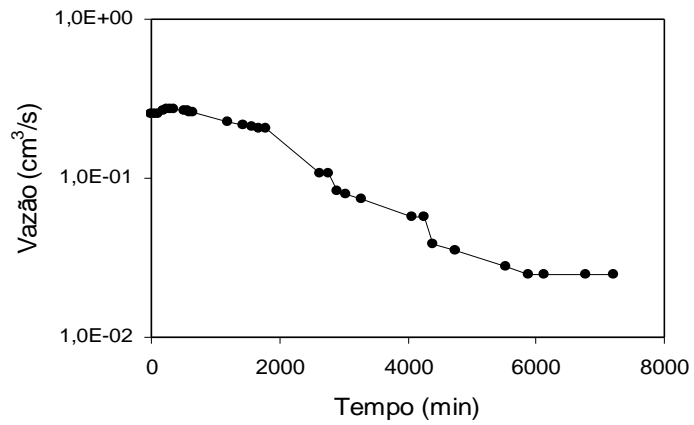


Figura 5.65 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT3.

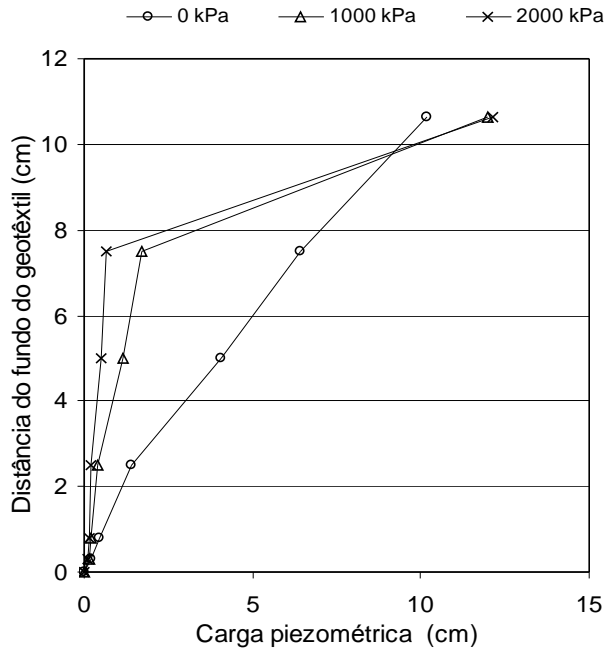


Figura 5.66 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT3.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema RMF-GT3 é apresentada na Figura 5.66.

5.5.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA RMF-GT4

Semelhantemente ao sistema RMF-GT2, a partir das Figuras 5.67, 5.68, 5.69 e 5.70 pode-se observar que para o sistema RMF-GT4, as reduções de permeabilidades ao longo da altura da amostra e os aumentos no valor de GR foram menos sensíveis ao aumento do nível de tensões atuantes.

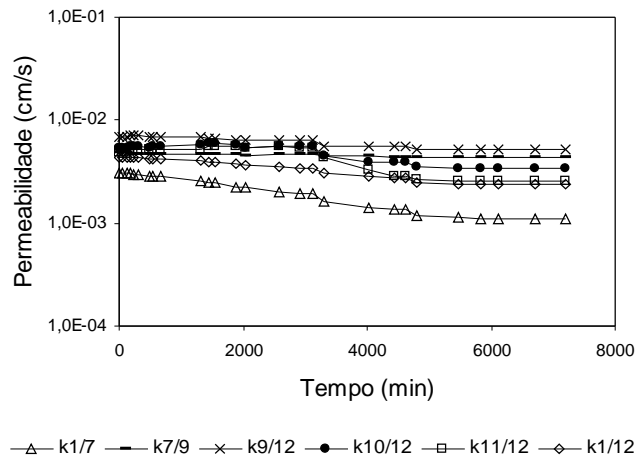


Figura 5.67 – Permeabilidade x Tempo para o sistema RMF-GT4.

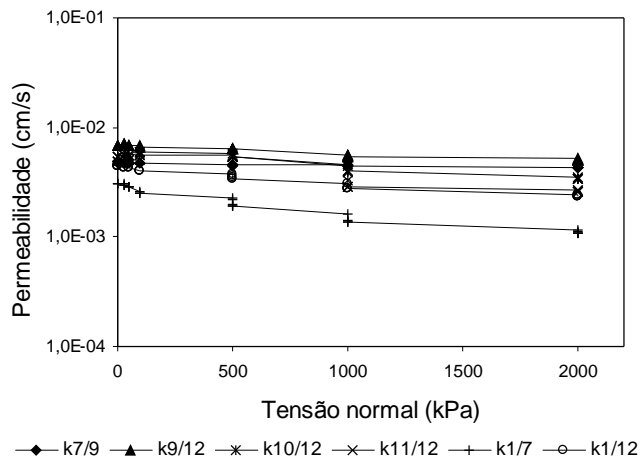


Figura 5.68 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema RMF-GT4.

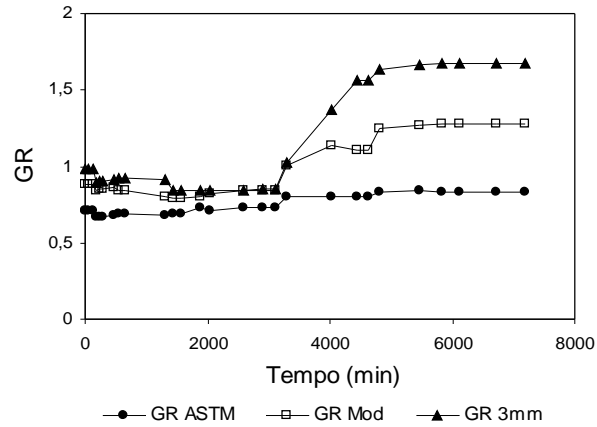


Figura 5.69 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema RMF-GT4.

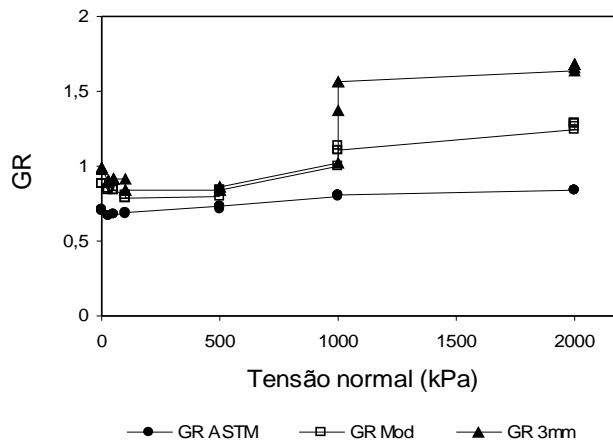


Figura 5.70 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema RMF-GT4.

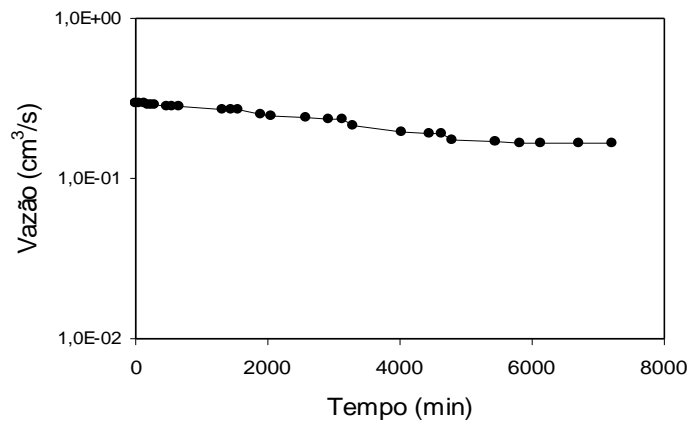


Figura 5.71 – Vazão x Tempo para o sistema RMF-GT4.

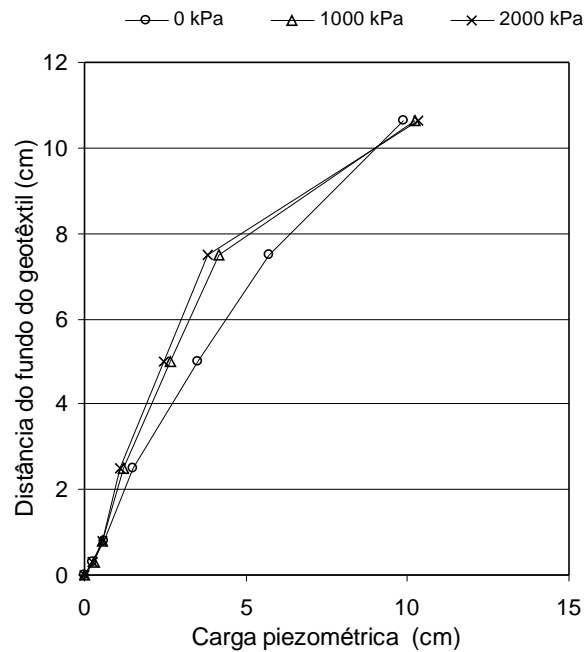


Figura 5.72 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema RMF-GT4.

A Figura 5.72, apresenta a variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema RMF-GT4.

5.6 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA BEM GRADUADA – ABG

5.6.1 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA ABG–GT1

As Figuras 5.73 e 5.74 apresentam os resultados de ensaios com o sistema ABG-GT1. Neste sistema as variações de valores de permeabilidade com a tensão normal foram menos acentuadas ao longo da amostra. Da mesma forma que nos ensaios com o sistema AGU, os valores de GR apresentaram um aumento considerável para tensões acima de 100 kPa, com o valor de GR_{3mm} consideravelmente maior que os demais. Observa-se ainda, a baixa permeabilidade próxima ao topo da amostra, como observado em outros ensaios.

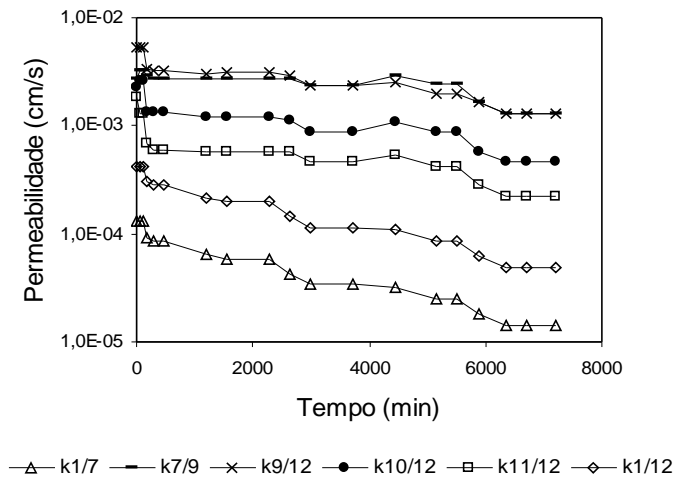


Figura 5.73 – Permeabilidade x Tempo para o sistema ABG-GT1.

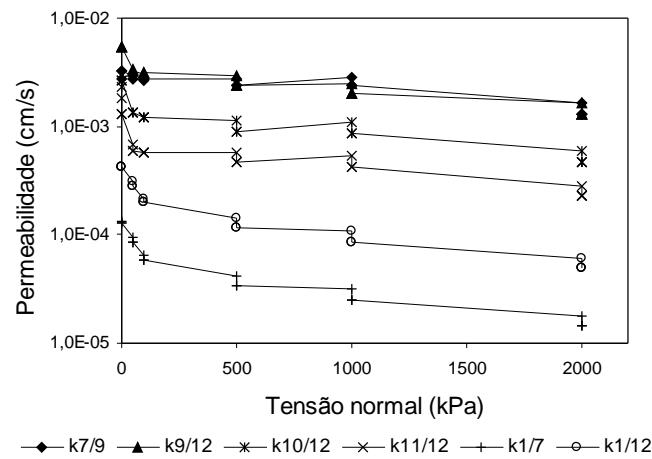


Figura 5.74 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema ABG-GT1.

As Figuras 5.75 e 5.76 apresentam a variação do GR com o tempo e acréscimo de tensão, denotando os aumentos dos valores de GR_{Mod} e GR_{3mm} .

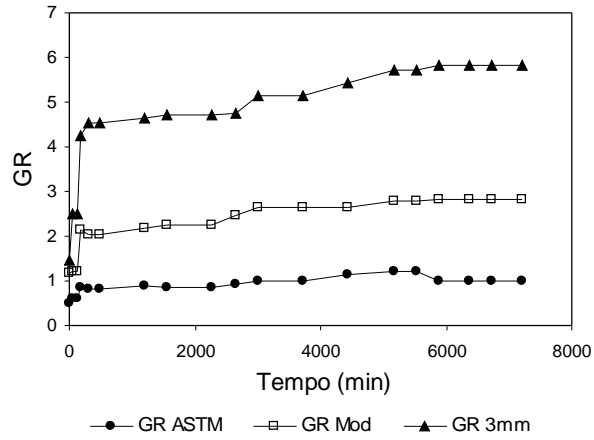


Figura 5.75 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema ABG-GT1.

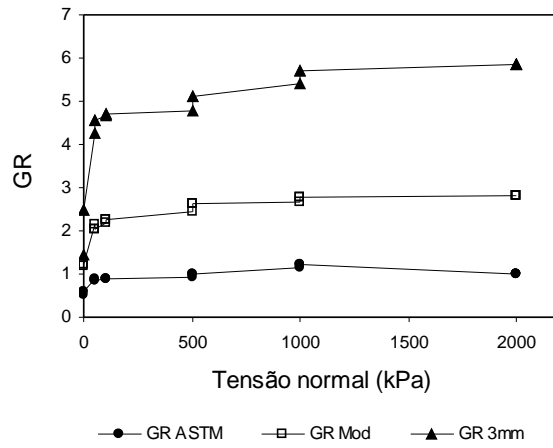


Figura 5.76 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema ABG-GT1.

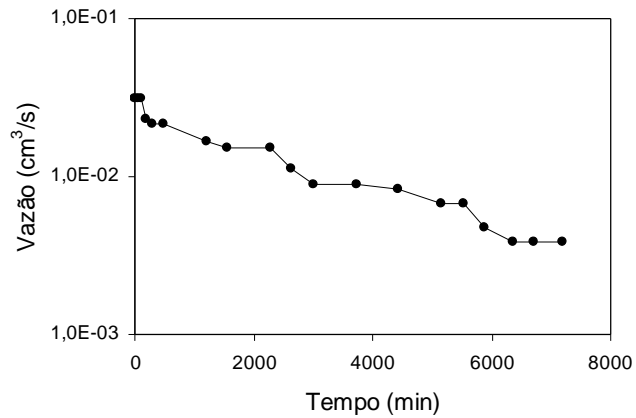


Figura 5.77 – Vazão x Tempo para o sistema ABG-GT1.

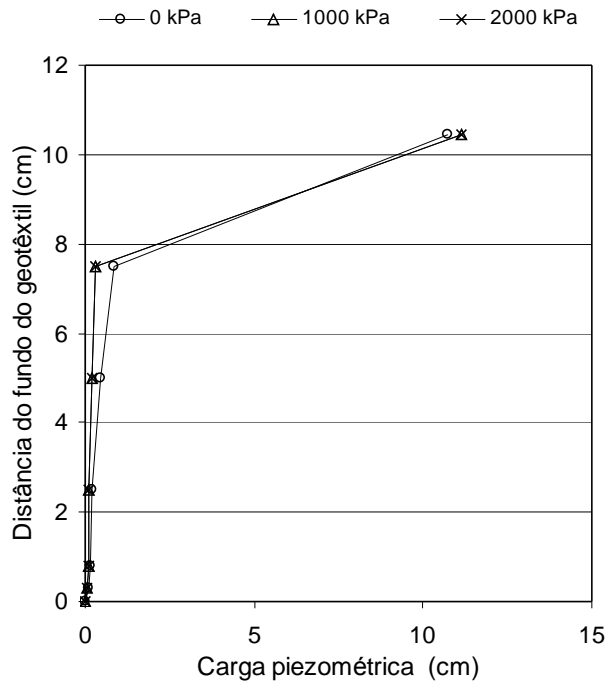


Figura 5.78 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema ABG-GT1.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema ABG-GT1 é apresentada na Figura 5.78.

5.6.2 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA ABG-GT2

O sistema ABG-GT2 apresentou o comportamento com o acréscimo de tensão semelhante ao sistema ABG-GT1, conforme apresentado nas Figuras 5.79, 5.80, 5.81 e 5.82. Da mesma forma, os valores de GR apresentaram um aumento considerável para tensões acima de 100 kPa, com o valor de GR_{3mm} também consideravelmente maior que os demais.

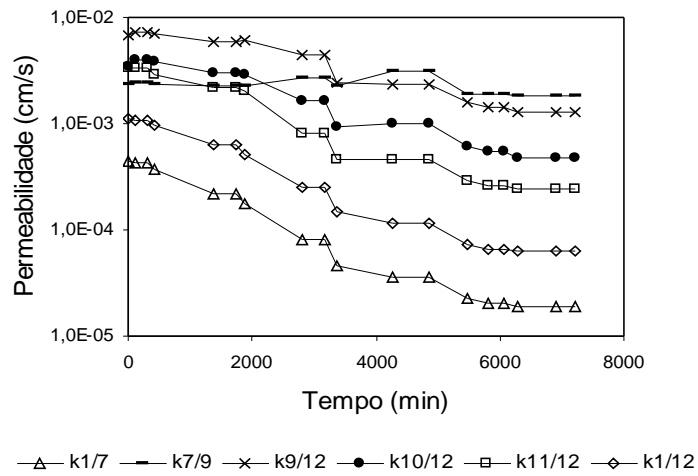


Figura 5.79 – Permeabilidade x Tempo para o sistema ABG-GT2.

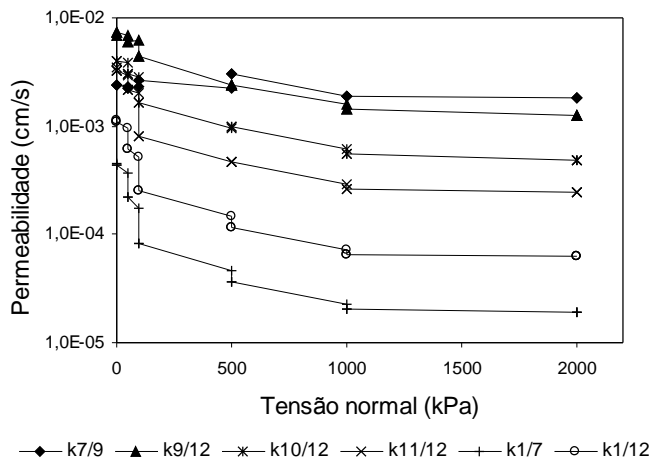


Figura 5.80 – Permeabilidade x Tensão Normal para o sistema ABG-GT2.

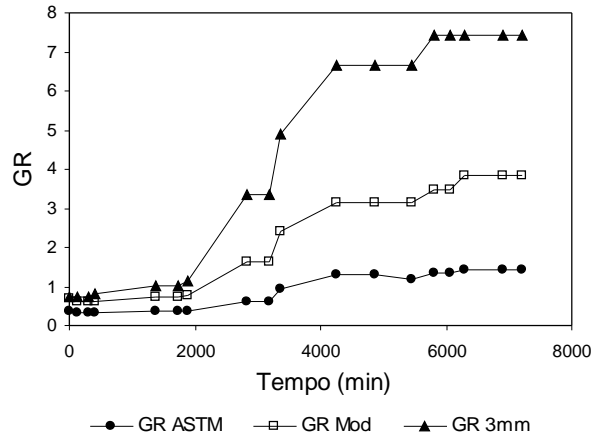


Figura 5.81 – Razão entre Gradientes x Tempo para o sistema ABG-GT2.

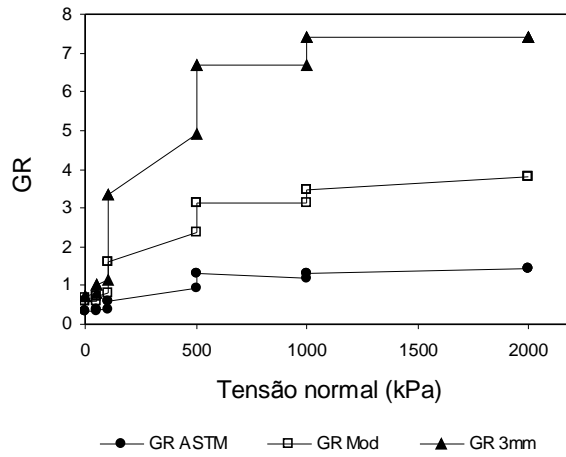


Figura 5.82 – Razão entre Gradientes x Tensão Normal para o sistema ABG-GT2.

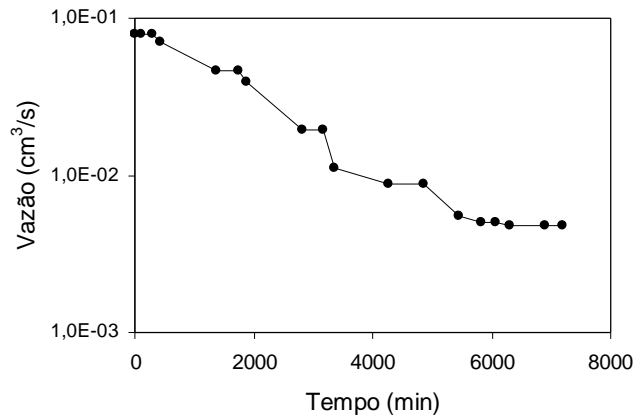


Figura 5.83 – Vazão x Tempo para o sistema ABG-GT2.

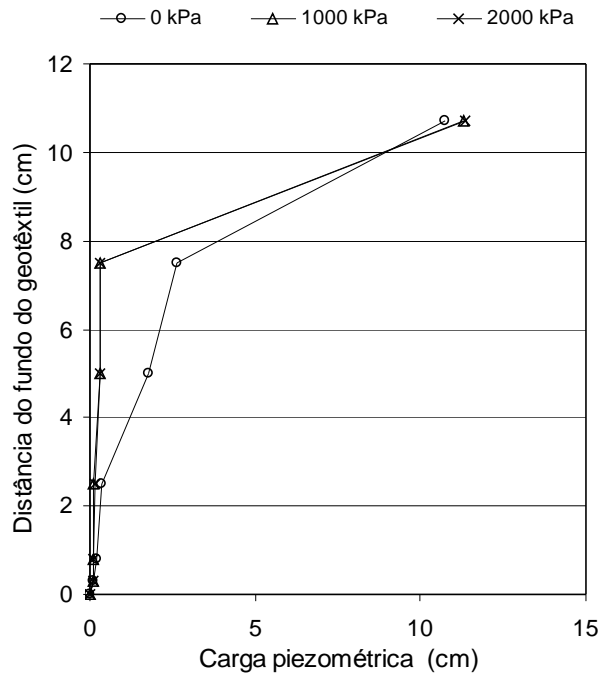


Figura 5.84 – Variação da carga hidráulica com a tensão para o sistema ABG-GT2.

A variação da carga hidráulica com a tensão ao longo da altura da amostra para o sistema ABG-GT2 é apresentada na Figura 5.84.

5.7 - COMENTÁRIOS FINAIS

Ensaio de Razão entre Gradientes são utilizados para a avaliação do desempenho de sistemas solo-geotêxtil ao longo do tempo, tendo como principal objetivo avaliar o potencial de colmatção do geotêxtil.

O equipamento de ensaio, projetado e construído na UnB durante pesquisas realizadas por Gardoni (2000) teve como objetivo principal permitir a simulação em laboratório do mecanismo de filtração do geotêxtil sob confinamento, mostrando-se eficaz para a análise proposta. A instalação do piezômetro a 3 mm da superfície do geotêxtil é uma tentativa de obter respostas mais acuradas da medida de gradientes na zona de interação solo-geotêxtil.

Com o intuito de melhorar a operacionalidade do equipamento, algumas modificações se fazem necessárias:

- A substituição do sistema de controle de tensão, onde a válvula utilizada não permite uma precisão do nível de tensão a aplicar, exigindo a experiência do técnico, que as vezes não consegue impor exatamente o mesmo valor de tensão para todos os ensaios.
- Modificação no coletor de material na base do permeâmetro, o qual só permite que se faça a coleta do material que passou durante a preparação da amostra e do material passante pelo geotêxtil ao final do ensaio.
- Torna-se necessária ainda, a modificação do sistema de vedação das duas partes do permeâmetro, com a instalação de parafusos ajustáveis que facilitem o processo de vedação durante a preparação da amostra de solo.

Quanto à funcionalidade, é um equipamento de fácil manuseio, com um excelente sistema de piezômetros instalados nos dois lados do corpo do permeâmetro, sendo 12 no total, o que permite a checagem das leituras piezométricas a todo instante, minimizando erros de leituras por comprometimento dos piezômetros devido obstrução pela partículas de solo ou bolhas de ar.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

6.1 - INTRODUÇÃO

As análises granulométricas dos materiais passantes pela amostra de geotêxtil nos ensaios de filtração sob a ação de tensões verticais e retido nas fibras, através da utilização do granulômetro a laser, permite inferir a abertura de filtração dos geotêxteis.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de granulometria após a realização dos ensaios de filtração para pontos em diversos locais da amostra e para os materiais passantes pelos geotêxteis e retidos em seus interiores, de acordo com o sistema solo-geotêxtil ensaiado, fazendo-se, ao final, uma avaliação dos critérios de dimensionamento de filtros.

6.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Para a realização dos ensaios de granulometria após os ensaios de filtração, foram coletados materiais em pontos da amostra de solo a diferentes distâncias acima da camada de geotêxtil (na interface com o solo e de 5 a 75 mm acima do geotêxtil), bem como foram coletados os materiais que passaram pelo geotêxtil imediatamente após a preparação da amostra (“pré-ensaio”) e ao final dos ensaios de filtração (“pós-ensaio”), além do material retido no espécime de geotêxtil.

Por se tratar de uma tecnologia aplicada em medições de partículas ou elementos de tamanho estritamente reduzido, os ensaios de granulometria foram realizados após um estudo prévio da quantidade de amostra a ser utilizada em função da necessidade de operacionalização do granulômetro. Logo, para os sistemas solo-geotêxtil formados pela Areia Grossa Uniforme,

não foram possíveis as coletas dos materiais passantes pelos geotêxteis, tendo em vista a pequena proporção de finos contidos na matriz do solo, impossibilitando a análise granulométrica do material neste caso.

A seguir, na Tabela 6.1, são apresentadas as características granulométricas dos solos para os demais sistemas, após os ensaios de filtração.

Tabela 6.1 – Características dos solos após ensaios de filtração.

Material Granular	Geotêxtil	Solo	D ₁₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₈₅ (mm)	D ₉₅ (mm)	Cu	FOS (mm) ^(*)
MEV	GT1	pré	48	66	87	100	1,7	150
		pós	48	66	86	99	1,7	
		retido	48	68	90	106	1,8	
	GT2	pré	50	67	84	96	1,6	110
		pós	50	67	85	97	1,6	
		retido	48	67	89	103	1,8	
	GT3	pré	49	69	94	111	1,7	60
		pós	49	70	96	114	1,8	
		retido	49	69	92	109	1,8	
	GT4	pré	48	68	91	106	1,6	300
		pós	48	67	89	103	1,7	
		retido	48	68	90	105	1,8	
RMF	GT1	pré	13	52	100	134	7,6	150
		pós	21	57	119	171	5,2	
		retido	74	135	205	251	2,7	
	GT2	pré	18	67	133	180	8,3	110
		pós	25	63	119	160	4,3	
		retido	66	123	191	238	2,8	
	GT3	pré	9	17	34	63	2,6	60
		pós	24	54	100	139	3,6	
		retido	68	140	234	295	3,1	
	GT4	pré	98	209	328	392	3,3	300
		pós	71	180	325	419	4,2	
		retido	58	172	330	432	5,4	
ABG	GT1	pré	5	25	60	100	12,8	150
		pós	5	29	64	91	22,1	
		retido	14	117	226	289	24,6	
	GT2	pré	5	24	52	76	12,7	110
		pós	5	29	67	95	25,2	
		retido	9	101	213	275	38,4	

Notas: pré = solo que passou pelo geotêxtil na preparação da amostra; pós = solo que passou pelo geotêxtil ao final do ensaio de filtração; retido = solo retido no interior do geotêxtil após ensaio de filtração; ^(*) = dados de catálogos de fabricantes.

6.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO – MEV

Os ensaios de granulometria após os ensaios de filtração para os sistemas formados por microesferas de vidro apresentaram resultados semelhantes, tendo em vista o teor de finos do material utilizado (45 a 90 μm) comparada às aberturas de filtração dos geotêxteis.

Em virtude do geotêxtil utilizado no sistema MEV-GT3 apresentar abertura de filtração compatível com a curva granulométrica do material ensaiado, ou seja, 60 μm , adotou-se os resultados desse ensaio para representar os demais sistemas solo-geotêxtil utilizando as microesferas (Figura 6.1). Pode-se notar que as curvas granulométricas para pontos em diversos locais da amostra, bem como para o material passante pelo geotêxtil e retido no seu interior, foram muito próximas.

Na Tabela 6.1, onde são apresentadas as características dos materiais granulares após os ensaios de filtração, observa-se que apesar do sistema MEV-GT3 ser composto por um geotêxtil com abertura de filtração inferior ao maior diâmetro da amostra de microesferas, tanto o material passante pelo geotêxtil quanto o material retido em seu interior apresentaram diâmetros maiores que a abertura de filtração.

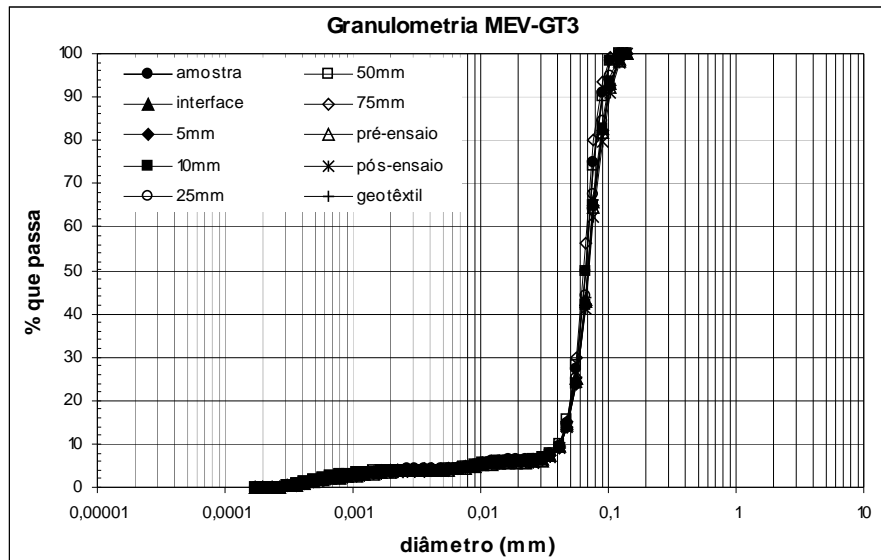


Figura 6.1 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema MEV-GT3.

A análise microscópica do geotêxtil (Figura 6.2), de forma qualitativa, aponta o acúmulo de partículas no interior da amostra, porém a quantidade de vazios continua elevada.

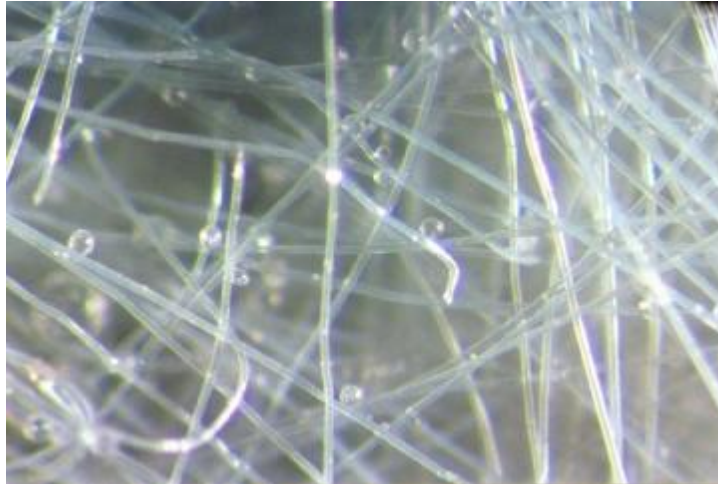


Figura 6.2 – Aspecto do geotêxtil do sistema MEV-GT3 após ensaio de filtração (36x).

6.4 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO – RMF

6.4.1 - SISTEMA RMF-GT1

Os resultados dos ensaios de granulometria do solo passante pelo geotêxtil durante a preparação da amostra e após o ensaio de filtração (Figura 6.3), mostram que as maiores partículas passantes tiveram diâmetros da ordem da abertura de filtração do geotêxtil. Já o solo retido no geotêxtil apresentou diâmetros maiores, conforme dados da Tabela 6.1

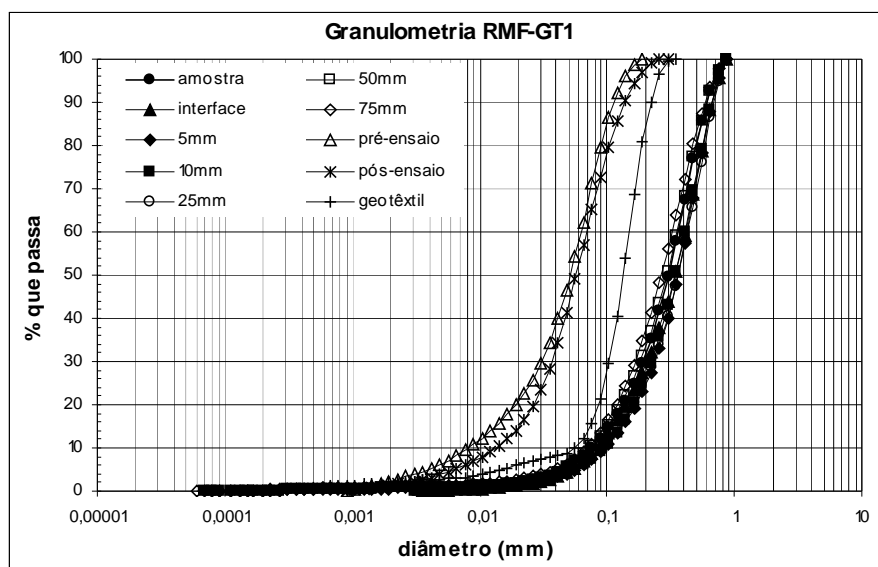


Figura 6.3 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT1.

6.4.2 - SISTEMA RMF-GT2

As análises granulométricas para o sistema RMF-GT2 (Figura 6.4) apresentaram resultados semelhantes aos do sistema RMF-GT1. As maiores partículas passantes pelo geotêxtil tiveram diâmetros da ordem da abertura de filtração. A Tabela 6.1 exibe as características do solo, neste caso.

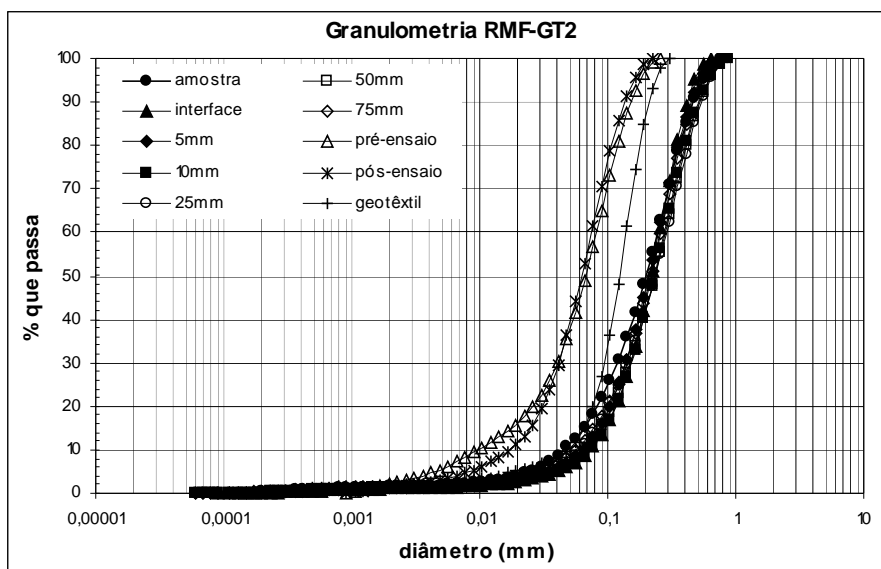


Figura 6.4 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT2.

6.4.3 - SISTEMA RMF-GT3

A Figura 6.5, mostra resultados da análise granulométrica após o ensaio de filtração com o sistema RMF-GT3. Por se tratar de um geotêxtil mais denso, observa-se que o mesmo reteve partículas da ordem de 3 vezes, em média, o valor de sua abertura de filtração, conforme pode-se observar na Tabela 6.1.

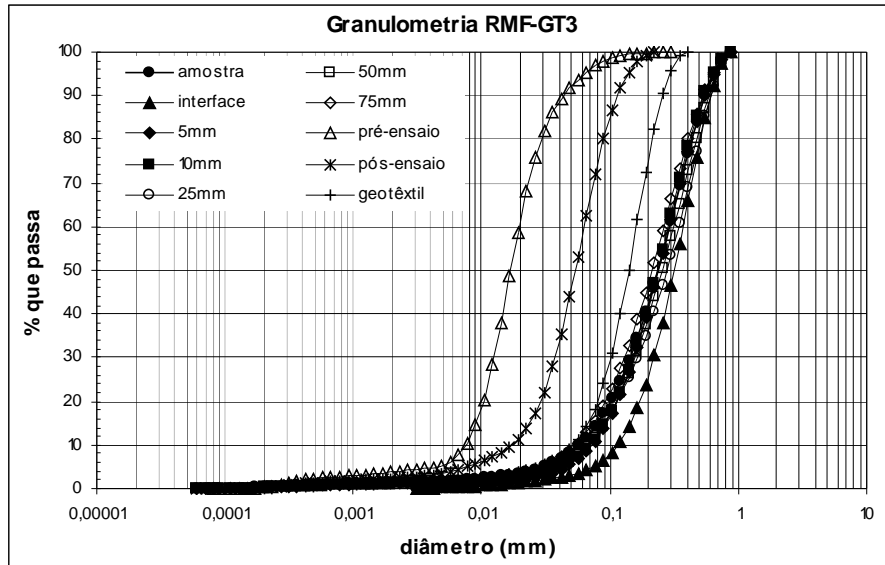


Figura 6.5 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT3.

6.4.4 - SISTEMA RMF-GT4

De acordo com a análise granulométrica do solo para o sistema RMF-GT4 (Figura 6.6) e os dados apresentados na Tabela 6.1, pode-se notar que as curvas granulométricas para pontos em diversos locais da amostra, bem como para o material passante pelo geotêxtil e retido no seu interior, apresentaram valores próximos, chegando a diâmetros maiores que a abertura de filtração do geotêxtil.

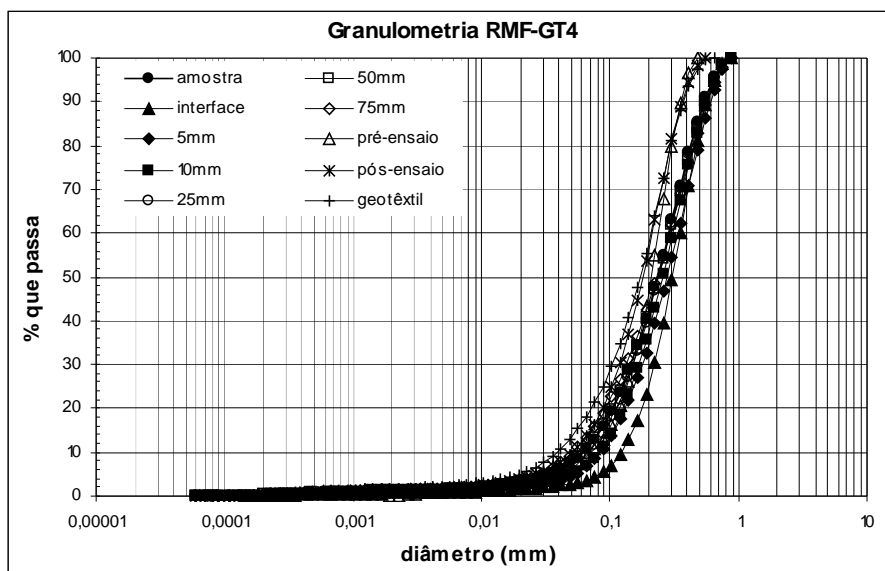


Figura 6.6 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema RMF-GT4.

6.5 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA APÓS OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO COM AREIA BEM GRADUADA – ABG

6.5.1 - SISTEMA ABG–GT1

Os resultados da análise granulométrica obtidos para o sistema ABG-GT1 (Figura 6.7) mostram que ocorre um gradual aumento da granulometria do solo próximo ao geotêxtil, em decorrência remoção de algumas partículas menores de solo. Os tamanhos máximos dos grãos que atravessaram o geotêxtil, caracterizados por D_{95} , após preparação da amostra e ao final do ensaio, foram ligeiramente menores que a abertura de filtração do geotêxtil. Já a dimensão máxima dos grãos retidos no geotêxtil foram da ordem da dimensão máxima do solo de base.

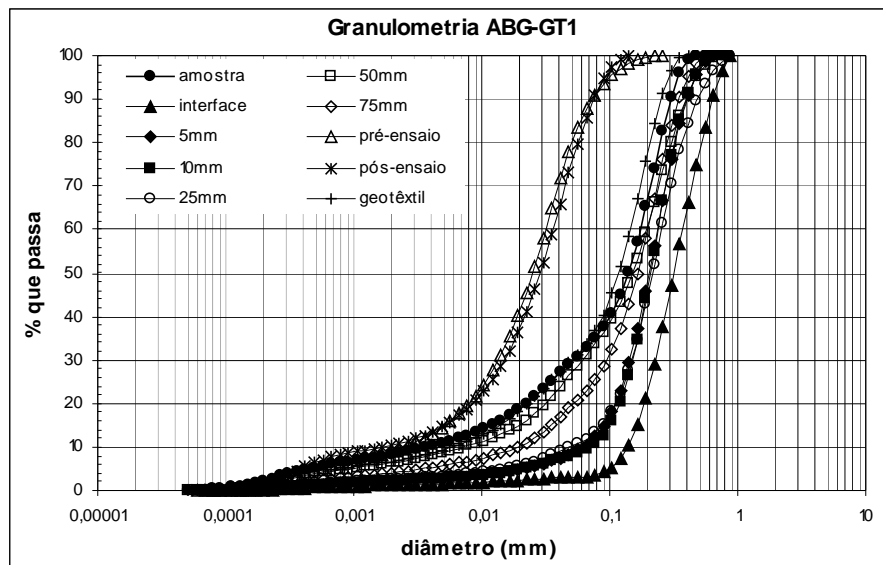


Figura 6.7 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema ABG-GT1.

6.5.2 - SISTEMA ABG–GT2

As análises granulométricas para o sistema ABG-GT2 (Figura 6.8) apresentaram resultados semelhantes ao sistema ABG-GT1. As características do solo são apresentadas na Tabela 6.1.

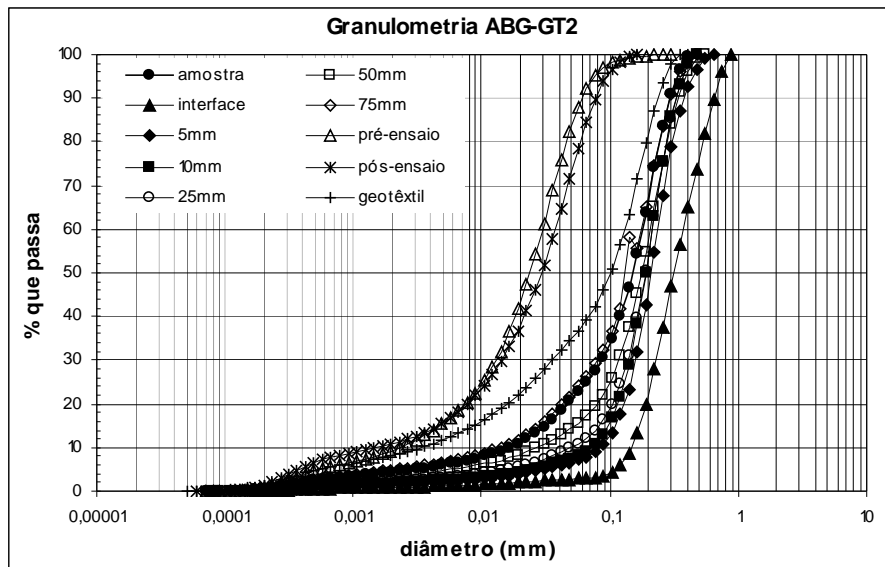


Figura 6.8 – Análise granulométrica do solo após ensaio de filtração com o sistema ABG-GT2.

6.6 - AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PARA OS SISTEMAS ENSAIADOS

A seleção do geotêxtil para exercer as funções de filtro e dreno passa por critérios de retenção e critérios de permeabilidade.

As características físicas e hidráulicas dos geotêxteis utilizados estão apresentadas na Tabela 3.1 e as características dos solos após os ensaios de filtração estão na Tabela 6.1. Os critérios de retenção avaliados são apresentados na Tabela 6.2.

Os sistemas solo-geotêxtil ensaiados atenderam à maioria dos critérios de retenção avaliados, com exceção do critério proposto pelo USACE (1977), o qual não foi atendido pela maioria dos sistemas. A maioria dos sistemas formados pelo geotêxtil GT1 não atendem aos critérios de retenção avaliados e o sistema MEV-GT4 não atende a nenhum dos critérios. Como todos os sistemas apresentaram desempenho satisfatório, isto mostra a natureza conservadora dos critérios e as influências da tensão e da impregnação do geotêxtil por partículas de solo no seu desempenho como filtro.

Tabela 6.2 – Avaliação dos critérios de retenção para os filtros usados.

Critérios	Solo	Geotêxtil			
		GT1	GT2	GT3	GT4
CGS Canadian Geotechnical Society (1992)	AGU	-	-	-	-
	MEV	N	P	P	N
	RMF	P	P	P	P
	ABG	P	P	NE	NE
USACE U. S. Army Corps of Engineers (1977)	AGU	-	-	-	-
	MEV	N	N	P	N
	RMF	P	N	N	P
	ABG	P	N	NE	NE
CFGG French Committee on Geotextiles and Geomembranes (1986)	AGU	-	-	-	-
	MEV	N	N	P	N
	RMF	P	P	P	P
	ABG	N	N	NE	NE
FHWA (Christopher & Holtz, 1985)	AGU	-	-	-	-
	MEV	P	P	P	N
	RMF	P	P	P	P
	ABG	N	P	NE	NE
GIROUD (1982)	AGU	-	-	-	-
	MEV	P	P	P	N
	RMF	N	P	P	P
	ABG	N	N	NE	NE
IRIGM/EPM Grenoble/École Polytechnique	AGU	-	-	-	-
	MEV	N	P	P	N
	RMF	P	P	P	P
	ABG	P	P	NE	NE
UBC (Fannin et al., 1994)	AGU	-	-	-	-
	MEV	N	P	P	N
	RMF	N	P	P	P
	ABG	N	N	NE	NE

Notas: P = passa; N = não passa; NE = não ensaiado.

6.7 - COMENTÁRIOS FINAIS

As características de retenção dos geotêxteis foram avaliadas por meio das análises granulométricas do solo que passou pelo geotêxtil após o ensaio e o que ficou retido dentro da amostra.

Os geotêxteis mais densos retêm partículas maiores do que o tamanho de sua abertura de filtração. Alguns autores (Gerry & Raymond, 1983 e Palmeira, 1996, por exemplo) atribuem

este fato à influência das agulhas no tamanho das aberturas quando do processo de fabricação dos geotêxteis não-tecidos.

Os resultados obtidos mostram que os geotêxteis não-tecidos podem experimentar uma redução no tamanho de poros quando comprimidos ou um alargamento da abertura de filtração se partículas de solo são forçadas dentro da matriz das fibras.

Os resultados dos ensaios atendem à maioria dos critérios de retenção avaliados, apesar da maioria não atender ao critério de colmatação proposto pelo FHWA ($GR < 3$). Gardoni (2000) obteve resultados de ensaios de filtração para amostras de solo saturadas e com densidade controlada que conduziram à conclusão semelhante, ou seja, a decisão pela utilização de um geotêxtil para filtro não deve ser tomada somente em função do valor de GR.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

7.1 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foram utilizados ensaios de Razão entre Gradientes para a avaliação da compatibilidade de sistemas solo-geotêxtil, tendo como principal objetivo a avaliação de “piping” através do geotêxtil ou a sua colmatação. Foram avaliados os comportamentos de sistemas compostos por diferentes materiais granulares e geotêxteis, tecidos e não-tecidos, com gramaturas variando de 150 g/m² a 600 g/m².

O equipamento utilizado se mostrou eficaz para o estudo proposto, como forma de se avaliar o efeito das tensões normais sobre as propriedades físicas e hidráulicas da manta têxtil, bem como sobre as suas características de filtração. Assim, as principais conclusões obtidas nesse trabalho foram:

- Os resultados obtidos mostraram que os geotêxteis utilizados apresentaram desempenhos satisfatórios em termos de potencial de colmatação, capacidade de retenção de solos e permeabilidade.
- A utilização da abordagem tradicional para aceitação ou não do filtro geotêxtil, que consiste na avaliação da magnitude do GR, pode não ser suficiente para se verificar a compatibilidade de sistemas solo-geotêxtil. Alguns ensaios apresentaram valores elevados de GR sob maiores níveis de tensão normal. Entretanto, a decisão sobre a rejeição ou aceitação do geotêxtil como filtro nesses casos deve também levar em conta fatores como as características da obra, vazão requerida de projeto e vazão disponível através do geotêxtil, potencial de geração de poropressões e suas conseqüências, por exemplo.
- Em alguns casos, valores elevados de GR podem ter sido causados em função da heterogeneidade dos materiais granulares, resultante do movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo (sufusão).

- Os valores do GR_{3mm} mostraram-se mais sensíveis à influência do carregamento do que o GR_{ASTM} e o GR_{Mod} , mostrando-se promissor como indicador das condições do sistema mais próximo à interface com o geotêxtil.
- As análises granulométricas dos solos que passaram durante os ensaios e dos que ficaram retidos nas amostras de geotêxteis mostram que partículas de solo consideravelmente maiores que a abertura de filtração do geotêxtil podem ficar retidas nas fibras. Isto é decorrente do processo de colocação e vibração da amostra de solo durante a sua preparação e também pode ocorrer no campo. Outras partículas podem ser forçadas a entrar no geotêxtil durante a aplicação das tensões normais. A redução do tamanho de poros do geotêxtil sob pressão e devido à presença de partículas retidas, implica em uma maior capacidade de retenção do solo vizinho.

Cada vez mais observa-se o interesse em se utilizar geossintéticos em sistemas drenofiltrantes de obras de maior porte. Para isso, são necessários o conhecimento e o controle das propriedades destes materiais sob elevados níveis de tensão, entre outros requisitos. Logo, torna-se necessário o entendimento do comportamento desses produtos em condições críticas de tensão e impregnação, sendo, assim, necessárias mais pesquisas sobre o assunto.

7.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema, a partir dos resultados obtidos:

- Realização de ensaios semelhantes em maior escala com outros fluidos e com controle de pH e Turbidez do líquido percolante, permitindo uma maior acurácia nos resultados.
- Utilização de diferentes tipos de sistemas solo-geotêxtil, considerando uma variedade maior de materiais.
- Realização de ensaios de razão entre gradientes com variação do gradiente hidráulico.
- Conhecimento do comportamento filtrante de amostras exumadas de geossintéticos em obras geotécnicas e de proteção ao meio ambiente.
- Desenvolvimento de sistema de aplicação de cargas e equipamento que permitam a realização de testes em amostras com escalas maiores, de modo a possibilitar uma melhor simulação das condições de campo em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1992). Geotêxteis – Determinação da Gramatura. NBR 12568. ABNT, São Paulo, 2p.

ABNT (1992). Geotêxteis – Determinação da Espessura. NBR 12569. ABNT, São Paulo, 2p.

AKAGI, T. (1994). Hydraulic applications of geosynthetics to filtration and drainage problems with special reference to prefabricated band-shaped drains. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 99-119.

ASTM (1991). Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes, ASTM D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216-218.

ASTM (1992). Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio, ASTM D5101-90. In 1992 Annual Book of ASTM Standards, sect. 4, vol. 04.08. ASTM, Philadelphia, USA, pp. 1190-1196.

BENTEL, D., ROBERTZE, J. & SMITH, M. (1982). The use and behavior of geotextiles in underdrainage systems of gold mine tailings dam in South Africa. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 83-188.

BESSA DA LUZ, D. W. & PALMEIRA, E. M. (2003). Comportamento filtrante de geotêxteis sob tensão. In: IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Geossintéticos'2003, Porto Alegre. Anais do Geossintéticos'2003. São Paulo: ABMS-IGS Brasil, 2003. v.1. p.1-10.

BHATIA, S. K., SMITH, J. L. & CHRISTOPHER, B. R. (1994). Interrelationship between pore openings of geotextiles and methods of evaluation. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, pp. 705-710.

BHATIA, S. K. & SMITH, J. L. (1995). Application of the bubble point method to the characterization of the pore-size distribution of geotextiles. Geotechnical Testing Journal, 18(1): 94-105.

CALHOUN, C. C. (1972). Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths. U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station. Vicksburg, Technical Report, pp. 72-77.

CAMPBELL, R. P. & WU, J. T. H. (1994). In-plane flow of four geosynthetics for landfill drainage. Geotechnical Testing Journal, 17(1): 3-16.

CHRISTOPHER, B. R. & FISCHER, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. Geotextiles and Geomembranes, 11: 337-353.

CHRISTOPHER, B. R. & VALERO, S. N. (1999). Thirty-year performance evaluation of a geotextile filter. Proceedings of Geosynthetics'99, Boston, USA, pp. 977-990.

DIB, P. S. & AGUIAR, P. R. (1986). Tucuruí-dam: nonwoven geotextile as one of the anti-piping barriers. Third International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, pp. 279-284.

FANNIN, R. J., VAID, Y. P & SHI, Y. C. (1994a). A critical evaluation of the gradient ratio test. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 17(1): 35-42.

FANNIN, R. J., VAID, Y. P & SHI, Y. C. (1994b). Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 555-563.

FANNIN, R. J., VAID, Y. P., PALMEIRA, E. M. & SHI, Y. C. (1996). A modified gradient ratio test device. *ASTM Symposium on Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage – STP 1281*, Denver, Colorado, USA, pp. 100-112.

FANNIN, R. J, CHOY, H. W. & ATWATER, J. W. (1998). Interpretation of transmissivity test data for geonets. *Geosynthetics International*, 5(3): 265-285.

FAURE, Y. H., GOURC, J. P. & GENDRIN, P. (1990). Structural Study of Porometry and Filtration Opening Size of Geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I. D. Peggs Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 102-119.

FAURE, Y. H., FARKOUH, B., DELMAS, P. & NANCEY, A. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextile and Geomembrane*, 17: 353-370.

FAYOUX, D. (1977). Filtration hydrodynamique des sols par des textiles. First International Conference on Geotextiles, Paris, pp: 329-332.

FAYOUX, D. & EVON, E. (1982). Influence of the fibre size on the filtration characteristics of needled-punched geotextiles. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 49-53.

FISCHER, G. R. (1994). The Influence of Fabric Pore Structure on the Behavior of Geotextile Filters. PhD Thesis, University of Washington, USA, 502 p.

GARDONI, M. G. A. (1995). Avaliação da Aplicabilidade de Ensaios de Laboratório e Critérios de Filtros para a Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-024A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 177p.

GARDONI, M. G. A. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D-003A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313p.

GARDONI, M. G. A. & PALMEIRA, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.

GARDONI, M. G. A. & PALMEIRA, E. M. (1999). Transmissivity of geosynthetics under high normal stresses. *Geosynthetics'99*, Boston, Massachusetts, USA, 2: 769-782.

GARDONI, M. G. A., PALMEIRA, E. M. & MLYNAREK, J. (2000). Influence of vertical stresses on the hydraulic behaviour of nonwoven geotextiles. Proceedings of the Third International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering – GeoFilters'2000, Warsaw, Poland, 1:127-133.

GARDONI, M. G. A. & PALMEIRA, E. M. (2003). Influência da colmatação parcial no desempenho de filtros de geotêxtil sob confinamento. In Anais do Geossintéticos'2003, IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Geossintéticos'2003, Porto Alegre, 1:10, São Paulo: ABMS-IGS Brasil.

GERRY, B. S. & RAYMOND, G. P. (1983). Equivalent opening size of geotextiles. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 6(2): 53-63.

GIROUD, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 3-27.

GIROUD, J. P. (1996). Granular filters and geotextile filters. Geofilters'96. Jean Lafleur and Andre L. Rollin (eds.), Montreal, Quebec, Canada, Vol. 1, pp. 565-680.

GIROUD, J. P., DELMAS, P. & ARTIÈRES, O. (1998). Theoretical basis for the development of a two-layer geotextile filter. Sixth International Conference on Geosynthetics, pp. 1037-1044.

GIROUD, J. P., ZHAO, A. & RICHARDSON, G. N. (2000). Effect of thickness reduction on geosynthetic hydraulic transmissivity. Special Issue on Liquid Collection Systems, Geosynthetics International, Vol. 7, Nos. 4-6, pp. 433-452.

GOURC, J. P. (1982). Quelques Aspects du Comportement des Géotextiles en Mécanique des Sols. Thesis Dr Sciences, IRIGM, University Joseph Fourier, Grenoble, France, 250 pp.

GOURC, J. P., FAURE, Y. H., ROLLIN, A. L. & LAFLEUR, J. (1982). Structural permeability law of geotextiles. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 149-154.

GOURC, J. P. & FAURE, Y. H. (1990). The soil, the water and the fiber: a fruitful interaction now controlled. Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 3: 949-972.

HALIBURTON, T. A & WOOD, P. D. (1982). Evaluation of U. S. Army Corps of Engineers gradiente ratio teste for geotextile performance. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Industrial Fabrics Association International, 1: 97-101.

HOOVER, T. P. (1982). Laboratory testing of geotextile fabric filters. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Vol. III, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, MN, pp. 839-843.

IONESCU, A. & KELLNER, L. (1982). About longitudinal permeability and draining capacity of nonwoven geotextiles. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, pp. 127-131.

KENNEY, T. C., CHAHAL, R., CHIU, E., OFOEGBU, G. I., OMANGE, G. N. & UME, C. A. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43.

KOERNER, R. M. & SANDEY, J. E. (1982). Transmissivity of geotextiles and geotextile/soil systems. *Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, pp. 173-176.

KOERNER, R. M. (1994). *Designing with Geosynthetics*, Third Edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 783 p.

KORNER, G. R., KOERNER, R. M. & FAHNY, R. F. W. (1996). Field performance of geosynthetic highway drainage systems. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Geocomposites*, ASTM STP 1281, Shobha Bhatia et al. (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 165-181.

LAFLEUR, J., EICHENAUER, T. & WERNER, G. (1996). Geotextile filter retention criteria for well graded cohesionless soils. *Geofilters'96 Conference*, J. Lafleur and A. L. Rollin (eds.) Montréal, Canadá, pp.429-438.

LAWSON, C. R. (1982) Filter criteria for geotextiles: relevance and use. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 109: 1300-1317.

LAWSON, C. R. (1986). Geotextiles filter criteria for tropical residual soils. *Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, Vol. 2, pp.557-562.

LEGGE, K. R. (1990). A new approach to geotextile selection. *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles*, The Hague, The Netherlands, Vol. 1, pp. 269-272.

LOMBARD, G. (1985). *Analyse et Comportement Hydraulique des Geotextiles Thermolies et Thermosoudes*. Ph. D. Thesis, École Polytechnique, Université de Montréal, Québec, Canadá, 271p.

LUETTICH, S. M. & WILLIAMS, N. D. (1989). Design of vertical drains using the hydraulic conductivity ratio analysis. *Proceedings of Geosynthetics'89*, San Diego, USA.

MALVERN INSTRUMENTS (1997). *Sample suspension unit manual*. Worcestershire, U.K.

MANSO, E. A. (1999). *Análise Granulométrica dos Solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-061A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 113 p.

MATHEUS, E. (1997). *Comportamento de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração Sob Condições Severas*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-048A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 121p.

MLYNAREK, J., LAFLEUR, J., ROLLIN, A. L. & LOMBARD, G. (1993). Geotextile filter design based on filtration opening size obtained by hydrodynamic sieving. *Filter in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Edited by Brauns, Heibaum & Shuler, Balkema, Rotterdam (Proc. GeoFilters'92 Conference, Karlsruhe, Germany), pp. 27-33.

MONTEZ, F.T. (1987). Utilização de geotêxtil em barragens de rejeitos. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro, RJ, pp. 333-348.

NAREJO, D. B. & KOERNER, R. M. (1992). A dynamic filtration test for geotextile filters. *Geotextiles and Geomembranes*, 11: 395-400.

PALMEIRA, E. M. (1995). Evolução dos geossintéticos no Brasil. 2º Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos, GEOSINTÉTICOS 95, São Paulo, SP, Palestras Especiais, pp. 5-15.

PALMEIRA, E. M. (1996). Propriedades físicas e hidráulicas de geotêxteis não-tecidos sob pressão. *Solos e Rochas, ABMS*, 20(2): 69-78.

PALMEIRA, E. M., FANNIN, R. J., & VAID, Y. P. (1996). A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 899-912.

PALMEIRA, E. M. & FANNIN, R. J. (1998). A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. *Geosynthetics International*, 5(3): 347-357.

PALMEIRA, E. M. & GARDONI, M. G. A. (2000a). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection Systems, Vol. 7, No. 3*, pp. 403-431.

PALMEIRA, E. M. & GARDONI, M. G. A. (2000b). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. In: Mallek, A. (Ed.), *International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85-110.

PALMEIRA, E. M. & GARDONI, M. G. A. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 97-115.

PRAPAHARAN, S., HOLTZ, R. D. & LUNA, J. D. (1989). Pore size distribution of nonwoven geotextiles. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 12(4): 261-268.

RAUMANN, G. (1982). In-plane permeability of compressed geotextiles. *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA*, pp. 55-60.

RIBEIRO, L. F. M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-005A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.

RIGO, J. M., LHOPE, F., ROLLIN, A. L., MLYNAREK, J. & LOMBARD, G. (1990). Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM. STP 1076, I. D. Peggs Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 90-101.

ROLLIN, A. L., MASOUNAVE, J. & DALLAIRE, G. (1977). Study of the hydraulic properties of nonwoven fabrics. Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics Geotechnics, Paris, pp. 201-206.

ROLLIN, A. L., MASOUNAVE, J. & LAFLEUR, J. (1982). Pressures drop through nonwoven geotextiles. A new analytical model. Second International Conference on Geotextile, Las Vegas, USA, pp. 161-166.

SCOTT, J. D. (1980). The filtration-permeability test. Proceedings of the First Canadian Symposium on Geotextiles, Canadian Geotechnical Society, Rexdale, Ontario, pp. 176-186.

SHI, Y. C. (1993). Filtration Behaviour of Nonwoven Geotextiles in the Gradient Ratio Test, M.Sc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 127p.

SHI, Y. C., FANNIN, R. J. & VAID, Y. P. (1994). Interpretation of gradient ratio test results. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, pp. 673-676.

SILVEIRA, A. (1965). An analysis of the problem of washing through in protective filters. Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canadá, pp. 551-555.

SPADA, J. L. G. (1992). Princípios da filtração com geotêxtil. Seminário Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia, GEOSSINTÉTICOS'92, UnB, Brasília, DF, pp. 93-120.

VERMEERSCH, O. G. & MLYNAREK, J. (1996). Determination of the pore size distribution of nonwoven geotextiles by a modified capillary flow porometry technique. Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites, ASTM STP 1281, Shobia K. Bathia & David Suits (eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 19-34.

VERTEMATTI, J. C. (2001). Curso Básico de Geotêxteis. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG–ABINT, pp. 1-91.

VIDAL, D. M. (1990). Geotêxtil: Propriedades e Ensaio. Manual técnico geotêxtil Bidim, pp. 1-31.

VIDAL, D. M. & RIGHETTI, C. C. (1990). Propriedades hidráulicas dos geotêxteis. VI CBGE, IX COBRAMSEF, Salvador, pp. 589-596.

WITTMANN, L. (1982). Soil filtration phenomena of geotextiles. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Nevada, USA, 1: 79-83.

ZHAO, A. & MONTANELLI, F. (1999). Effects of soil presence on flow capacity of drainage geocomposites under high normal loads. Geosynthetics'99, Boston, Massachusetts, USA, (2): 799-812.

**DADOS DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE
GRADIENTES (GR) SOB TENSÃO**

Tabela A.7 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT3.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 7 SOLO: MEV L AMOSTRA: 10,50 cm GEOTÊXTIL: GT3 $t_{GT} : 0,413$ cm GRADIENTE: 1

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	22	0	0	95,75	91,97	89,62	87,30	86,17	85,80	85,60
0	2	8	30	630	96,00	92,05	89,60	87,30	86,10	85,80	85,60
0	2	9	0	660	96,05	92,05	89,62	87,30	86,10	85,78	85,60
50	2	10	0	720	96,05	92,05	89,62	87,30	86,10	85,78	85,60
50	2	11	0	780	96,10	92,05	89,62	87,30	86,10	85,78	85,60
50	2	12	0	840	96,10	92,07	89,65	87,30	86,10	85,78	85,60
50	2	14	30	990	96,15	92,10	89,65	87,30	86,10	85,78	85,60
100	2	15	30	1050	96,20	92,10	89,65	87,30	86,10	85,78	85,60
100	2	17	30	1170	96,25	92,15	89,65	87,30	86,10	85,78	85,60
100	2	19	30	1290	96,30	92,15	89,65	87,30	86,10	85,78	85,60
500	2	23	30	1530	96,45	92,07	89,65	87,30	86,10	85,80	85,65
500	3	11	0	2220	96,50	91,95	89,57	87,30	86,10	85,80	85,65
500	3	14	0	2400	96,50	91,87	89,52	87,30	86,10	85,80	85,65
500	3	17	0	2580	96,55	91,80	89,47	87,27	86,10	85,80	85,65
500	3	20	0	2760	96,55	91,70	89,45	87,22	86,10	85,80	85,65
500	3	23	0	2940	96,55	91,62	89,37	87,20	86,10	85,80	85,65
1000	4	12	0	3720	97,10	90,77	88,85	86,97	86,02	85,75	85,57
1000	4	15	0	3900	97,10	90,70	88,82	86,95	86,00	85,73	85,55
1000	4	18	0	4080	97,15	90,65	88,77	86,92	86,00	85,73	85,53
1000	4	22	0	4320	97,20	90,50	88,70	86,90	86,00	85,70	85,50
1000	5	10	30	5070	97,20	90,25	88,50	86,85	85,97	85,70	85,50
1000	5	12	30	5190	97,20	90,22	88,50	86,82	85,97	85,70	85,50
2000	5	15	30	5370	97,20	89,52	88,12	86,65	85,90	85,67	85,50
2000	6	11	0	6540	97,25	88,45	87,45	86,35	85,78	85,61	85,48
2000	6	20	0	7080	97,25	87,87	87,05	86,16	85,70	85,57	85,46
2000	6	22	0	7200	97,25	87,87	87,05	86,16	85,70	85,57	85,46

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	22	0	0	10,15	6,37	4,02	1,70	0,57	0,20	0
0	2	8	30	630	10,40	6,45	4,00	1,70	0,50	0,20	0
0	2	9	0	660	10,45	6,45	4,02	1,70	0,50	0,18	0
50	2	10	0	720	10,45	6,45	4,02	1,70	0,50	0,18	0
50	2	11	0	780	10,50	6,45	4,02	1,70	0,50	0,18	0
50	2	12	0	840	10,50	6,47	4,05	1,70	0,50	0,18	0
50	2	14	30	990	10,55	6,50	4,05	1,70	0,50	0,18	0
100	2	15	30	1050	10,60	6,50	4,05	1,70	0,50	0,18	0
100	2	17	30	1170	10,65	6,55	4,05	1,70	0,50	0,18	0
100	2	19	30	1290	10,70	6,55	4,05	1,70	0,50	0,18	0
500	2	23	30	1530	10,80	6,42	4,00	1,65	0,45	0,15	0
500	3	11	0	2220	10,85	6,30	3,92	1,65	0,45	0,15	0
500	3	14	0	2400	10,85	6,22	3,87	1,65	0,45	0,15	0
500	3	17	0	2580	10,90	6,15	3,82	1,62	0,45	0,15	0
500	3	20	0	2760	10,90	6,05	3,80	1,57	0,45	0,15	0
500	3	23	0	2940	10,90	5,97	3,72	1,55	0,45	0,15	0
1000	4	12	0	3720	11,53	5,20	3,28	1,40	0,45	0,18	0
1000	4	15	0	3900	11,55	5,15	3,27	1,40	0,45	0,18	0
1000	4	18	0	4080	11,62	5,12	3,24	1,39	0,47	0,20	0
1000	4	22	0	4320	11,70	5,00	3,20	1,40	0,50	0,20	0
1000	5	10	30	5070	11,70	4,75	3,00	1,35	0,47	0,20	0
1000	5	12	30	5190	11,70	4,72	3,00	1,32	0,47	0,20	0
2000	5	15	30	5370	11,70	4,02	2,62	1,15	0,40	0,17	0
2000	6	11	0	6540	11,77	2,97	1,97	0,87	0,30	0,13	0
2000	6	20	0	7080	11,79	2,41	1,59	0,70	0,24	0,11	0
2000	6	22	0	7200	11,79	2,41	1,59	0,70	0,24	0,11	0

s_v (kPa)	DELT(min)	Q(cm^3/s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,188	2,07E-03	2,77E-03	3,81E-03	3,64E-03	3,89E-03	2,68E-03	0,73	0,76	0,71
0	630	0,188	1,98E-03	2,73E-03	3,81E-03	4,14E-03	3,89E-03	2,62E-03	0,72	0,66	0,70
0	660	0,188	1,96E-03	2,73E-03	3,81E-03	4,14E-03	4,32E-03	2,61E-03	0,72	0,66	0,63
50	720	0,187	1,95E-03	2,71E-03	3,79E-03	4,13E-03	4,30E-03	2,60E-03	0,72	0,66	0,63
50	780	0,187	1,92E-03	2,71E-03	3,79E-03	4,13E-03	4,30E-03	2,58E-03	0,72	0,66	0,63
50	840	0,187	1,93E-03	2,70E-03	3,79E-03	4,13E-03	4,30E-03	2,58E-03	0,71	0,66	0,63
50	990	0,187	1,92E-03	2,69E-03	3,79E-03	4,13E-03	4,30E-03	2,57E-03	0,71	0,65	0,63
100	1050	0,183	1,87E-03	2,64E-03	3,72E-03	4,05E-03	4,22E-03	2,51E-03	0,71	0,65	0,63
100	1170	0,183	1,87E-03	2,61E-03	3,72E-03	4,05E-03	4,22E-03	2,50E-03	0,70	0,64	0,62
100	1290	0,183	1,84E-03	2,61E-03	3,72E-03	4,05E-03	4,22E-03	2,49E-03	0,70	0,64	0,62
500	1530	0,169	1,61E-03	2,45E-03	3,54E-03	4,15E-03	4,67E-03	2,28E-03	0,69	0,59	0,52
500	2220	0,162	1,48E-03	2,41E-03	3,39E-03	3,98E-03	4,47E-03	2,17E-03	0,71	0,60	0,54
500	2400	0,160	1,44E-03	2,41E-03	3,34E-03	3,92E-03	4,41E-03	2,14E-03	0,72	0,62	0,55
500	2580	0,157	1,38E-03	2,40E-03	3,35E-03	3,86E-03	4,34E-03	2,10E-03	0,72	0,62	0,55
500	2760	0,155	1,33E-03	2,39E-03	3,40E-03	3,80E-03	4,28E-03	2,06E-03	0,70	0,63	0,56
500	2940	0,155	1,31E-03	2,42E-03	3,45E-03	3,80E-03	4,28E-03	2,06E-03	0,70	0,64	0,57
1000	3720	0,130	8,54E-04	2,36E-03	3,20E-03	3,18E-03	2,98E-03	1,63E-03	0,74	0,74	0,79
1000	3900	0,126	8,21E-04	2,32E-03	3,11E-03	3,09E-03	2,90E-03	1,58E-03	0,75	0,75	0,80
1000	4080	0,122	7,85E-04	2,26E-03	3,04E-03	2,87E-03	2,85E-03	1,53E-03	0,75	0,79	0,89
1000	4320	0,120	7,50E-04	2,31E-03	2,97E-03	2,66E-03	2,49E-03	1,50E-03	0,78	0,87	0,93
1000	5070	0,113	6,78E-04	2,30E-03	2,89E-03	2,66E-03	2,34E-03	1,40E-03	0,79	0,86	0,98
1000	5190	0,113	6,75E-04	2,30E-03	2,96E-03	2,66E-03	2,34E-03	1,40E-03	0,78	0,86	0,98
2000	5370	0,092	5,01E-04	2,22E-03	2,77E-03	2,55E-03	2,25E-03	1,15E-03	0,80	0,87	0,99
2000	6540	0,067	3,16E-04	2,19E-03	2,65E-03	2,46E-03	2,13E-03	8,23E-04	0,83	0,89	1,03
2000	7080	0,056	2,47E-04	2,24E-03	2,74E-03	2,56E-03	2,09E-03	6,85E-04	0,82	0,88	1,07
2000	7200	0,056	2,47E-04	2,24E-03	2,74E-03	2,56E-03	2,09E-03	6,85E-04	0,82	0,88	1,07

Tabela A.8 – Dados do ensaio de filtração com o sistema MEV-GT4.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 8 SOLO: MEV L AMOSTRA: 10,67 cm GEOTÊXTIL: GT4 t_{GT} : 0,146 cm GRADIENTE: 1

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	15	0	0	97,15	93,55	91,15	88,85	87,80	87,35	87,15
0	1	16	0	60	97,10	93,45	91,10	88,80	87,75	87,30	87,15
0	1	17	0	120	97,10	93,40	91,10	88,80	87,75	87,30	87,15
0	1	18	0	180	97,05	93,40	91,10	88,80	87,75	87,30	87,15
50	2	9	30	1110	97,05	93,27	91,00	88,75	87,72	87,30	87,15
50	2	11	30	1230	97,05	93,20	91,00	88,70	87,70	87,30	87,15
50	2	12	30	1290	97,05	93,20	91,00	88,70	87,70	87,30	87,15
100	2	13	30	1350	97,05	93,10	90,95	88,70	87,70	87,30	87,15
100	2	15	30	1470	97,05	93,05	90,92	88,67	87,70	87,30	87,15
100	2	17	30	1590	97,05	92,95	90,87	88,65	87,70	87,30	87,15
100	2	20	0	1740	97,05	92,85	90,85	88,65	87,70	87,30	87,15
500	3	8	0	2460	97,20	90,70	89,50	88,10	87,50	87,20	87,05
500	3	11	0	2640	97,20	90,45	89,35	88,00	87,45	87,15	87,00
500	3	14	30	2850	97,20	90,20	89,17	87,88	87,40	87,12	86,97
500	3	17	0	3000	97,20	90,00	89,05	87,85	87,35	87,10	86,95
500	3	19	0	3120	97,20	89,85	89,00	87,80	87,33	87,10	86,95
1000	4	16	0	4380	97,30	88,30	87,85	87,20	86,97	86,85	86,75
1000	4	19	0	4560	97,30	88,20	87,80	87,17	86,97	86,85	86,75
1000	4	20	0	4620	97,35	88,17	87,77	87,16	86,96	86,85	86,75
1000	4	22	0	4740	97,35	88,17	87,77	87,16	86,96	86,85	86,75
2000	5	16	0	5820	97,35	87,90	87,50	87,05	86,90	86,80	86,71
2000	5	19	0	6000	97,35	87,90	87,50	87,05	86,90	86,80	86,71
2000	5	22	30	6210	97,35	87,89	87,50	87,05	86,90	86,80	86,71
2000	6	9	0	6840	97,35	87,90	87,50	87,05	86,90	86,80	86,71
2000	6	12	0	7020	97,37	87,88	87,50	87,04	86,89	86,79	86,70
2000	6	15	0	7200	97,37	87,88	87,50	87,04	86,89	86,79	86,70

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	15	0	0	10,00	6,40	4,00	1,70	0,65	0,20	0
0	1	16	0	60	9,95	6,30	3,95	1,65	0,60	0,15	0
0	1	17	0	120	9,95	6,25	3,95	1,65	0,60	0,15	0
0	1	18	0	180	9,90	6,25	3,95	1,65	0,60	0,15	0
50	2	9	30	1110	9,90	6,12	3,85	1,60	0,57	0,15	0
50	2	11	30	1230	9,90	6,05	3,85	1,55	0,55	0,15	0
50	2	12	30	1290	9,90	6,05	3,85	1,55	0,55	0,15	0
100	2	13	30	1350	9,90	5,95	3,80	1,55	0,55	0,15	0
100	2	15	30	1470	9,90	5,90	3,77	1,52	0,55	0,15	0
100	2	17	30	1590	9,90	5,80	3,72	1,50	0,55	0,15	0
100	2	20	0	1740	9,90	5,70	3,70	1,50	0,55	0,15	0
500	3	8	0	2460	10,15	3,65	2,45	1,05	0,45	0,15	0
500	3	11	0	2640	10,20	3,45	2,35	1,00	0,45	0,15	0
500	3	14	30	2850	10,23	3,23	2,20	0,91	0,43	0,15	0
500	3	17	0	3000	10,25	3,05	2,10	0,90	0,40	0,15	0
500	3	19	0	3120	10,25	2,90	2,05	0,85	0,38	0,15	0
1000	4	16	0	4380	10,55	1,55	1,10	0,45	0,23	0,10	0
1000	4	19	0	4560	10,55	1,45	1,05	0,42	0,22	0,10	0
1000	4	20	0	4620	10,60	1,42	1,02	0,41	0,21	0,10	0
1000	4	22	0	4740	10,60	1,42	1,02	0,41	0,21	0,10	0
2000	5	16	0	5820	10,64	1,19	0,79	0,34	0,19	0,09	0
2000	5	19	0	6000	10,64	1,19	0,79	0,34	0,19	0,09	0
2000	5	22	30	6210	10,64	1,18	0,79	0,34	0,19	0,09	0
2000	6	9	0	6840	10,64	1,19	0,79	0,34	0,19	0,09	0
2000	6	12	0	7020	10,67	1,18	0,80	0,34	0,19	0,09	0
2000	6	15	0	7200	10,67	1,18	0,80	0,34	0,19	0,09	0

s_v (kPa)	DELT(min)	Q(cm ³ /s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,213	2,59E-03	3,12E-03	4,32E-03	3,61E-03	4,40E-03	3,13E-03	0,72	0,86	0,71
0	60	0,213	2,55E-03	3,16E-03	4,45E-03	3,91E-03	5,87E-03	3,15E-03	0,71	0,81	0,54
0	120	0,213	2,52E-03	3,19E-03	4,45E-03	3,91E-03	5,87E-03	3,15E-03	0,72	0,82	0,54
0	180	0,213	2,55E-03	3,19E-03	4,45E-03	3,91E-03	5,87E-03	3,16E-03	0,72	0,82	0,54
50	1110	0,190	2,20E-03	2,90E-03	4,10E-03	3,68E-03	5,25E-03	2,83E-03	0,71	0,79	0,55
50	1230	0,190	2,16E-03	2,92E-03	4,23E-03	3,82E-03	5,25E-03	2,83E-03	0,69	0,76	0,56
50	1290	0,190	2,16E-03	2,92E-03	4,23E-03	3,82E-03	5,25E-03	2,83E-03	0,69	0,76	0,56
100	1350	0,183	2,03E-03	2,88E-03	4,09E-03	3,68E-03	5,07E-03	2,73E-03	0,70	0,78	0,57
100	1470	0,183	2,01E-03	2,89E-03	4,17E-03	3,68E-03	5,07E-03	2,73E-03	0,69	0,78	0,57
100	1590	0,181	1,93E-03	2,90E-03	4,16E-03	3,63E-03	4,99E-03	2,69E-03	0,70	0,80	0,58
100	1740	0,181	1,88E-03	2,97E-03	4,16E-03	3,63E-03	4,99E-03	2,69E-03	0,71	0,82	0,60
500	2460	0,121	8,18E-04	3,23E-03	3,99E-03	2,98E-03	3,36E-03	1,76E-03	0,81	1,08	0,96
500	2640	0,117	7,57E-04	3,29E-03	4,03E-03	2,87E-03	3,22E-03	1,69E-03	0,82	1,15	1,02
500	2850	0,107	6,70E-04	3,19E-03	4,07E-03	2,75E-03	2,96E-03	1,54E-03	0,78	1,16	1,08
500	3000	0,105	6,37E-04	3,37E-03	4,02E-03	2,89E-03	2,89E-03	1,51E-03	0,84	1,16	1,16
500	3120	0,105	6,24E-04	3,53E-03	4,26E-03	3,05E-03	2,89E-03	1,51E-03	0,83	1,16	1,22
1000	4380	0,044	2,16E-04	2,79E-03	3,41E-03	2,14E-03	1,84E-03	6,21E-04	0,82	1,31	1,52
1000	4560	0,043	2,07E-04	2,89E-03	3,54E-03	2,16E-03	1,78E-03	6,02E-04	0,82	1,33	1,62
1000	4620	0,043	2,05E-04	2,94E-03	3,63E-03	2,27E-03	1,78E-03	5,99E-04	0,81	1,30	1,65
1000	4740	0,043	2,05E-04	2,94E-03	3,63E-03	2,27E-03	1,78E-03	5,99E-04	0,81	1,30	1,65
2000	5820	0,033	1,54E-04	2,71E-03	3,39E-03	1,94E-03	1,54E-03	4,62E-04	0,80	1,40	1,77
2000	6000	0,033	1,54E-04	2,71E-03	3,39E-03	1,94E-03	1,54E-03	4,62E-04	0,80	1,40	1,77
2000	6210	0,031	1,44E-04	2,56E-03	3,16E-03	1,81E-03	1,43E-03	4,31E-04	0,81	1,41	1,79
2000	6840	0,030	1,39E-04	2,44E-03	3,05E-03	1,75E-03	1,38E-03	4,16E-04	0,80	1,40	1,77
2000	7020	0,030	1,38E-04	2,47E-03	3,05E-03	1,75E-03	1,38E-03	4,14E-04	0,81	1,41	1,79
2000	7200	0,030	1,38E-04	2,47E-03	3,05E-03	1,75E-03	1,38E-03	4,14E-04	0,81	1,41	1,79

Tabela A.9 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT1.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 9 SOLO: RMF L AMOSTRA: 10,60 cm GEOTÊXTIL: GT1 t_{GT}: 0,155 cm GRADIENTE: 1

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	16	0	0	96,15	92,10	90,00	88,02	86,95	86,50	85,95
0	1	17	0	60	96,10	92,02	89,90	87,97	86,87	86,50	85,95
0	1	18	0	120	96,10	92,00	89,85	87,95	86,85	86,47	85,95
25	1	19	0	180	96,10	92,00	89,85	87,95	86,85	86,45	85,90
25	1	20	0	240	96,10	92,00	89,82	87,95	86,85	86,45	85,90
25	1	21	0	300	96,10	92,00	89,82	87,95	86,85	86,45	85,90
50	2	9	0	1020	96,25	91,95	89,77	87,90	86,80	86,42	85,85
50	2	11	0	1140	96,40	91,95	89,77	87,90	86,80	86,42	85,85
100	2	13	0	1260	96,70	92,05	89,85	87,90	86,80	86,40	85,85
100	2	17	0	1500	96,75	92,10	89,85	87,90	86,80	86,40	85,85
100	2	21	0	1740	96,80	92,10	89,85	87,90	86,80	86,40	85,85
500	3	12	0	2640	96,80	91,72	89,70	87,85	86,75	86,37	85,85
500	3	15	0	2820	96,80	91,65	89,65	87,80	86,75	86,37	85,85
500	3	18	0	3000	96,85	91,55	89,60	87,77	86,72	86,35	85,85
500	3	21	0	3180	96,85	91,50	89,55	87,75	86,70	86,35	85,85
1000	4	10	0	3960	96,90	90,50	88,95	87,40	86,52	86,20	85,75
1000	4	12	0	4080	96,90	90,45	88,90	87,35	86,50	86,20	85,70
1000	4	16	0	4320	96,95	90,30	88,80	87,30	86,50	86,20	85,70
1000	4	19	0	4500	97,00	90,20	88,72	87,27	86,50	86,20	85,70
1000	4	21	0	4620	97,00	90,20	88,72	87,27	86,50	86,20	85,70
2000	5	13	0	5580	97,10	88,90	87,92	86,80	86,22	86,00	85,65
2000	5	18	0	5880	97,10	88,80	87,87	86,77	86,20	85,97	85,62
2000	5	21	0	6060	97,10	88,70	87,82	86,75	86,20	85,95	85,62
2000	6	9	0	6780	97,15	88,42	87,60	86,60	86,10	85,92	85,60
2000	6	12	0	6960	97,15	88,40	87,55	86,60	86,10	85,92	85,60
2000	6	16	0	7200	97,15	88,40	87,55	86,60	86,10	85,92	85,60

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	16	0	0	10,20	6,15	4,05	2,07	1,00	0,55	0
0	1	17	0	60	10,15	6,07	3,95	2,02	0,92	0,55	0
0	1	18	0	120	10,15	6,05	3,90	2,00	0,90	0,52	0
25	1	19	0	180	10,20	6,10	3,95	2,05	0,95	0,55	0
25	1	20	0	240	10,20	6,10	3,92	2,05	0,95	0,55	0
25	1	21	0	300	10,20	6,10	3,92	2,05	0,95	0,55	0
50	2	9	0	1020	10,40	6,10	3,92	2,05	0,95	0,57	0
50	2	11	0	1140	10,55	6,10	3,92	2,05	0,95	0,57	0
100	2	13	0	1260	10,85	6,20	4,00	2,05	0,95	0,55	0
100	2	17	0	1500	10,90	6,25	4,00	2,05	0,95	0,55	0
100	2	21	0	1740	10,95	6,25	4,00	2,05	0,95	0,55	0
500	3	12	0	2640	10,95	5,87	3,85	2,00	0,90	0,52	0
500	3	15	0	2820	10,95	5,80	3,80	1,95	0,90	0,52	0
500	3	18	0	3000	11,00	5,70	3,75	1,92	0,87	0,50	0
500	3	21	0	3180	11,00	5,65	3,70	1,90	0,85	0,50	0
1000	4	10	0	3960	11,15	4,75	3,20	1,65	0,77	0,45	0
1000	4	12	0	4080	11,20	4,75	3,20	1,65	0,80	0,50	0
1000	4	16	0	4320	11,25	4,60	3,10	1,60	0,80	0,50	0
1000	4	19	0	4500	11,30	4,50	3,02	1,57	0,80	0,50	0
1000	4	21	0	4620	11,30	4,50	3,02	1,57	0,80	0,50	0
2000	5	13	0	5580	11,45	3,25	2,27	1,15	0,57	0,35	0
2000	5	18	0	5880	11,48	3,18	2,25	1,15	0,58	0,35	0
2000	5	21	0	6060	11,48	3,08	2,20	1,13	0,58	0,33	0
2000	6	9	0	6780	11,55	2,82	2,00	1,00	0,50	0,32	0
2000	6	12	0	6960	11,55	2,80	1,95	1,00	0,50	0,32	0
2000	6	16	0	7200	11,55	2,80	1,95	1,00	0,50	0,32	0

s _v (kPa)	DELTA(min)	Q(cm ³ /s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K12/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,225	2,38E-03	3,81E-03	3,75E-03	2,49E-03	1,70E-03	3,23E-03	1,01	1,53	2,25
0	60	0,225	2,36E-03	3,84E-03	3,85E-03	2,70E-03	1,70E-03	3,25E-03	1,00	1,42	2,26
0	120	0,225	2,35E-03	3,84E-03	3,89E-03	2,76E-03	1,79E-03	3,25E-03	0,99	1,39	2,14
25	180	0,225	2,35E-03	3,84E-03	3,79E-03	2,62E-03	1,70E-03	3,23E-03	1,01	1,47	2,26
25	240	0,225	2,35E-03	3,84E-03	3,79E-03	2,62E-03	1,70E-03	3,23E-03	1,01	1,47	2,26
25	300	0,225	2,35E-03	3,84E-03	3,79E-03	2,62E-03	1,70E-03	3,23E-03	1,01	1,47	2,26
50	1020	0,222	2,21E-03	3,79E-03	3,74E-03	2,59E-03	1,62E-03	3,13E-03	1,01	1,47	2,35
50	1140	0,222	2,14E-03	3,79E-03	3,74E-03	2,59E-03	1,62E-03	3,08E-03	1,01	1,47	2,35
100	1260	0,226	2,08E-03	3,77E-03	3,81E-03	2,63E-03	1,70E-03	3,05E-03	0,99	1,43	2,21
100	1500	0,226	2,08E-03	3,72E-03	3,81E-03	2,63E-03	1,70E-03	3,04E-03	0,98	1,41	2,18
100	1740	0,226	2,06E-03	3,72E-03	3,81E-03	2,63E-03	1,70E-03	3,03E-03	0,98	1,41	2,18
500	2640	0,200	1,69E-03	3,57E-03	3,45E-03	2,46E-03	1,59E-03	2,67E-03	1,03	1,45	2,24
500	2820	0,198	1,65E-03	3,55E-03	3,51E-03	2,43E-03	1,58E-03	2,65E-03	1,01	1,46	2,25
500	3000	0,196	1,58E-03	3,58E-03	3,52E-03	2,49E-03	1,62E-03	2,61E-03	1,02	1,44	2,21
500	3180	0,196	1,57E-03	3,61E-03	3,56E-03	2,55E-03	1,62E-03	2,61E-03	1,01	1,42	2,22
1000	3960	0,160	1,07E-03	3,57E-03	3,35E-03	2,30E-03	1,47E-03	2,10E-03	1,06	1,55	2,42
1000	4080	0,157	1,04E-03	3,49E-03	3,28E-03	2,16E-03	1,30E-03	2,05E-03	1,06	1,61	2,69
1000	4320	0,153	9,88E-04	3,53E-03	3,31E-03	2,12E-03	1,27E-03	2,00E-03	1,07	1,67	2,78
1000	4500	0,150	9,45E-04	3,54E-03	3,30E-03	2,07E-03	1,24E-03	1,94E-03	1,07	1,71	2,84
1000	4620	0,150	9,45E-04	3,54E-03	3,30E-03	2,07E-03	1,24E-03	1,94E-03	1,07	1,71	2,84
2000	5580	0,107	5,59E-04	3,52E-03	3,21E-03	2,07E-03	1,27E-03	1,37E-03	1,10	1,70	2,78
2000	5880	0,103	5,30E-04	3,50E-03	3,09E-03	1,96E-03	1,22E-03	1,31E-03	1,13	1,79	2,87
2000	6060	0,101	5,17E-04	3,59E-03	3,10E-03	1,93E-03	1,27E-03	1,29E-03	1,16	1,86	2,82
2000	6780	0,094	4,63E-04	3,58E-03	3,26E-03	2,09E-03	1,22E-03	1,20E-03	1,10	1,72	2,93
2000	6960	0,092	4,49E-04	3,52E-03	3,17E-03	2,03E-03	1,19E-03	1,16E-03	1,11	1,74	2,96
2000	7200	0,092	4,49E-04	3,52E-03	3,17E-03	2,03E-03	1,19E-03	1,16E-03	1,11	1,74	2,96

Tabela A.10 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT2.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 10 SOLO: RMF L AMOSTRA: 10,70 cm GEOTÊXTIL: GT2 t_{GT} : 0,253 cm GRADIENTE: 1

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	19	0	0	96,35	92,55	90,60	88,55	87,12	86,92	86,25
0	1	22	0	180	96,75	92,80	90,67	88,55	87,10	86,90	86,17
0	2	8	0	780	96,85	92,85	90,67	88,57	87,10	86,90	86,15
0	2	9	0	840	96,85	92,85	90,67	88,57	87,10	86,90	86,15
25	2	10	0	900	96,85	92,85	90,65	88,60	87,10	86,90	86,15
25	2	11	0	960	96,85	92,85	90,65	88,60	87,10	86,90	86,15
25	2	12	0	1020	96,85	92,85	90,65	88,60	87,10	86,90	86,15
50	2	13	0	1080	96,90	92,85	90,70	88,60	87,10	86,90	86,15
50	2	14	0	1140	96,90	92,90	90,70	88,62	87,10	86,90	86,15
50	2	16	0	1260	96,90	92,90	90,70	88,62	87,10	86,90	86,15
100	2	18	0	1380	96,95	92,90	90,70	88,65	87,15	86,92	86,12
100	2	19	0	1440	96,95	92,90	90,70	88,65	87,15	86,90	86,12
100	2	21	0	1560	96,95	92,90	90,70	88,65	87,15	86,90	86,12
500	3	9	30	2310	97,00	92,72	90,65	88,60	87,15	86,90	86,10
500	3	16	30	2730	97,00	92,65	90,60	88,60	87,10	86,90	86,10
500	3	19	0	2880	97,05	92,65	90,60	88,60	87,10	86,90	86,10
500	3	21	0	3000	97,05	92,65	90,60	88,60	87,10	86,90	86,10
1000	4	12	0	3900	97,05	92,15	90,32	88,45	87,10	86,90	86,10
1000	4	18	0	4260	97,05	92,15	90,32	88,42	87,10	86,90	86,10
1000	4	21	30	4470	97,05	92,15	90,32	88,42	87,10	86,90	86,10
2000	5	12	30	5370	97,05	91,35	89,75	88,20	87,10	86,90	85,95
2000	5	18	0	5700	97,05	91,30	89,70	88,15	87,07	86,87	85,95
2000	5	21	0	5880	97,05	91,30	89,70	88,15	87,07	86,87	85,95
2000	6	9	0	6600	97,05	91,30	89,70	88,15	87,07	86,87	85,95
2000	6	16	0	7020	97,05	91,30	89,70	88,15	87,07	86,87	85,95
2000	6	19	0	7200	97,05	91,30	89,70	88,15	87,07	86,87	85,95

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	19	0	0	10,10	6,30	4,35	2,30	0,87	0,67	0
0	1	22	0	180	10,58	6,63	4,50	2,38	0,93	0,73	0
0	2	8	0	780	10,70	6,70	4,52	2,42	0,95	0,75	0
0	2	9	0	840	10,70	6,70	4,52	2,42	0,95	0,75	0
25	2	10	0	900	10,70	6,70	4,50	2,45	0,95	0,75	0
25	2	11	0	960	10,70	6,70	4,50	2,45	0,95	0,75	0
25	2	12	0	1020	10,70	6,70	4,50	2,45	0,95	0,75	0
50	2	13	0	1080	10,75	6,70	4,55	2,45	0,95	0,75	0
50	2	14	0	1140	10,75	6,75	4,55	2,47	0,95	0,75	0
50	2	16	0	1260	10,75	6,75	4,55	2,47	0,95	0,75	0
100	2	18	0	1380	10,83	6,78	4,58	2,53	1,03	0,80	0
100	2	19	0	1440	10,83	6,78	4,58	2,53	1,03	0,78	0
100	2	21	0	1560	10,83	6,78	4,58	2,53	1,03	0,78	0
500	3	9	30	2310	10,90	6,62	4,55	2,50	1,05	0,80	0
500	3	16	30	2730	10,90	6,55	4,50	2,50	1,00	0,80	0
500	3	19	0	2880	10,95	6,55	4,50	2,50	1,00	0,80	0
500	3	21	0	3000	10,95	6,55	4,50	2,50	1,00	0,80	0
1000	4	12	0	3900	10,95	6,05	4,22	2,35	1,00	0,80	0
1000	4	18	0	4260	10,95	6,05	4,22	2,32	1,00	0,80	0
1000	4	21	30	4470	10,95	6,05	4,22	2,32	1,00	0,80	0
2000	5	12	30	5370	11,10	5,40	3,80	2,25	1,15	0,95	0
2000	5	18	0	5700	11,10	5,35	3,75	2,20	1,12	0,92	0
2000	5	21	0	5880	11,10	5,35	3,75	2,20	1,12	0,92	0
2000	6	9	0	6600	11,10	5,35	3,75	2,20	1,12	0,92	0
2000	6	16	0	7020	11,10	5,35	3,75	2,20	1,12	0,92	0
2000	6	19	0	7200	11,10	5,35	3,75	2,20	1,12	0,92	0

s_v (kPa)	DELT(min)	Q(cm³/s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,183	2,13E-03	3,17E-03	2,75E-03	2,33E-03	1,13E-03	2,68E-03	1,15	1,36	2,79
0	180	0,200	2,24E-03	3,25E-03	2,90E-03	2,38E-03	1,14E-03	2,79E-03	1,12	1,37	2,86
0	780	0,196	2,16E-03	3,16E-03	2,80E-03	2,28E-03	1,08E-03	2,71E-03	1,13	1,39	2,92
0	840	0,196	2,16E-03	3,16E-03	2,80E-03	2,28E-03	1,08E-03	2,71E-03	1,13	1,39	2,92
25	900	0,196	2,16E-03	3,18E-03	2,76E-03	2,28E-03	1,08E-03	2,71E-03	1,15	1,40	2,94
25	960	0,196	2,16E-03	3,18E-03	2,76E-03	2,28E-03	1,08E-03	2,71E-03	1,15	1,40	2,94
25	1020	0,196	2,16E-03	3,18E-03	2,76E-03	2,28E-03	1,08E-03	2,71E-03	1,15	1,40	2,94
50	1080	0,189	2,06E-03	3,07E-03	2,66E-03	2,20E-03	1,04E-03	2,60E-03	1,15	1,40	2,94
50	1140	0,189	2,09E-03	3,05E-03	2,64E-03	2,20E-03	1,04E-03	2,60E-03	1,15	1,39	2,92
50	1260	0,189	2,09E-03	3,05E-03	2,64E-03	2,20E-03	1,04E-03	2,60E-03	1,15	1,39	2,92
100	1380	0,186	2,03E-03	3,02E-03	2,54E-03	1,99E-03	9,62E-04	2,54E-03	1,19	1,51	3,14
100	1440	0,186	2,03E-03	3,02E-03	2,54E-03	1,99E-03	9,87E-04	2,54E-03	1,19	1,51	3,06
100	1560	0,186	2,03E-03	3,02E-03	2,54E-03	1,99E-03	9,87E-04	2,54E-03	1,19	1,51	3,06
500	2310	0,171	1,76E-03	2,86E-03	2,36E-03	1,80E-03	8,85E-04	2,32E-03	1,21	1,59	3,24
500	2730	0,167	1,69E-03	2,84E-03	2,30E-03	1,84E-03	8,63E-04	2,26E-03	1,23	1,54	3,29
500	2880	0,167	1,67E-03	2,84E-03	2,30E-03	1,84E-03	8,63E-04	2,25E-03	1,23	1,54	3,29
500	3000	0,167	1,67E-03	2,84E-03	2,30E-03	1,84E-03	8,63E-04	2,25E-03	1,23	1,54	3,29
1000	3900	0,150	1,35E-03	2,80E-03	2,20E-03	1,66E-03	7,77E-04	2,03E-03	1,27	1,69	3,60
1000	4260	0,150	1,35E-03	2,78E-03	2,23E-03	1,66E-03	7,77E-04	2,03E-03	1,24	1,68	3,58
1000	4470	0,150	1,35E-03	2,78E-03	2,23E-03	1,66E-03	7,77E-04	2,03E-03	1,24	1,68	3,58
2000	5370	0,128	9,91E-04	2,80E-03	1,96E-03	1,23E-03	5,57E-04	1,70E-03	1,43	2,28	5,03
2000	5700	0,128	9,82E-04	2,80E-03	2,01E-03	1,26E-03	5,76E-04	1,70E-03	1,40	2,22	4,87
2000	5880	0,128	9,82E-04	2,80E-03	2,01E-03	1,26E-03	5,76E-04	1,70E-03	1,40	2,22	4,87
2000	6600	0,128	9,82E-04	2,80E-03	2,01E-03	1,26E-03	5,76E-04	1,70E-03	1,40	2,22	4,87
2000	7020	0,128	9,82E-04	2,80E-03	2,01E-03	1,26E-03	5,76E-04	1,70E-03	1,40	2,22	4,87
2000	7200	0,128	9,82E-04	2,80E-03	2,01E-03	1,26E-03	5,76E-04	1,70E-03	1,40	2,22	4,87

Tabela A.11 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT3.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 11 SOLO: RMF L AMOSTRA: 10,63 cm GEOTÊXTIL: GT3 t_{GT}: 0,430 cm GRADIENTE: 1

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	16	0	0	95,70	92,10	89,85	87,05	86,10	85,80	85,60
0	1	17	0	60	95,50	91,90	89,55	86,90	85,97	85,70	85,52
0	1	18	0	120	95,70	91,95	89,60	86,90	85,97	85,70	85,52
25	1	19	0	180	96,00	92,05	89,60	86,90	85,97	85,70	85,52
25	1	20	0	240	96,10	92,20	89,70	86,90	85,97	85,67	85,52
25	1	22	0	360	96,10	92,20	89,70	86,90	85,97	85,67	85,52
50	2	0	30	510	96,15	92,15	89,60	86,90	85,97	85,62	85,52
50	2	1	20	560	96,15	92,10	89,60	86,90	85,90	85,62	85,52
50	2	2	10	610	96,20	92,10	89,60	86,90	85,90	85,62	85,52
50	2	3	0	660	96,20	92,10	89,60	86,90	85,90	85,62	85,52
100	2	12	0	1200	96,30	91,50	89,20	86,70	85,80	85,50	85,42
100	2	16	0	1440	96,35	91,10	88,95	86,60	85,75	85,50	85,40
100	2	20	0	1680	96,40	90,80	88,75	86,55	85,73	85,50	85,40
100	2	22	0	1800	96,40	90,80	88,75	86,55	85,73	85,50	85,40
500	3	12	0	2640	96,85	88,20	87,12	85,82	85,40	85,34	85,15
500	3	14	0	2760	96,85	88,15	87,07	85,80	85,40	85,34	85,15
1000	3	18	30	3030	97,00	87,40	86,60	85,60	85,30	85,25	85,10
1000	3	22	30	3270	97,00	87,25	86,50	85,60	85,30	85,25	85,10
1000	4	12	0	4080	97,00	86,70	86,15	85,42	85,20	85,15	85,00
1000	4	15	0	4260	97,00	86,70	86,15	85,42	85,20	85,15	85,00
2000	4	17	0	4380	97,05	85,90	85,65	85,22	85,12	85,07	84,97
2000	4	23	0	4740	97,05	85,90	85,65	85,22	85,12	85,07	84,97
2000	5	12	0	5520	97,10	85,80	85,57	85,20	85,10	85,05	84,95
2000	5	22	0	6120	97,10	85,60	85,47	85,17	85,10	85,03	84,95
2000	6	9	0	6780	97,10	85,60	85,47	85,17	85,10	85,03	84,95
2000	6	16	0	7200	97,10	85,60	85,47	85,17	85,10	85,03	84,95

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	16	0	0	10,10	6,50	4,25	1,45	0,50	0,20	0
0	1	17	0	60	9,98	6,38	4,03	1,38	0,45	0,18	0
0	1	18	0	120	10,18	6,43	4,08	1,38	0,45	0,18	0
25	1	19	0	180	10,48	6,53	4,08	1,38	0,45	0,18	0
25	1	20	0	240	10,58	6,68	4,18	1,38	0,45	0,15	0
25	1	22	0	360	10,58	6,68	4,18	1,38	0,45	0,15	0
50	2	0	30	510	10,63	6,63	4,08	1,38	0,45	0,10	0
50	2	1	20	560	10,63	6,58	4,08	1,38	0,38	0,10	0
50	2	2	10	610	10,68	6,58	4,08	1,38	0,38	0,10	0
50	2	3	0	660	10,68	6,58	4,08	1,38	0,38	0,10	0
100	2	12	0	1200	10,88	6,08	3,78	1,28	0,38	0,08	0
100	2	16	0	1440	10,95	5,70	3,55	1,20	0,35	0,10	0
100	2	20	0	1680	11,00	5,40	3,35	1,15	0,33	0,10	0
100	2	22	0	1800	11,00	5,40	3,35	1,15	0,33	0,10	0
500	3	12	0	2640	11,70	3,05	1,97	0,67	0,25	0,19	0
500	3	14	0	2760	11,70	3,00	1,92	0,65	0,25	0,19	0
1000	3	18	30	3030	11,90	2,30	1,50	0,50	0,20	0,15	0
1000	3	22	30	3270	11,90	2,15	1,40	0,50	0,20	0,15	0
1000	4	12	0	4080	12,00	1,70	1,15	0,42	0,20	0,15	0
1000	4	15	0	4260	12,00	1,70	1,15	0,42	0,20	0,15	0
2000	4	17	0	4380	12,08	0,93	0,68	0,25	0,15	0,10	0
2000	4	23	0	4740	12,08	0,93	0,68	0,25	0,15	0,10	0
2000	5	12	0	5520	12,15	0,85	0,62	0,25	0,15	0,10	0
2000	5	22	0	6120	12,15	0,65	0,52	0,22	0,15	0,08	0
2000	6	9	0	6780	12,15	0,65	0,52	0,22	0,15	0,08	0
2000	6	16	0	7200	12,15	0,65	0,52	0,22	0,15	0,08	0

s _v (kPa)	DELTA(min)	Q(cm ³ /s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,254	3,05E-03	3,48E-03	6,05E-03	5,62E-03	5,27E-03	3,70E-03	0,57	0,62	0,66
0	60	0,254	3,05E-03	3,51E-03	6,36E-03	6,24E-03	5,85E-03	3,74E-03	0,55	0,56	0,60
0	120	0,254	2,93E-03	3,48E-03	6,36E-03	6,24E-03	5,85E-03	3,67E-03	0,55	0,56	0,59
25	180	0,267	2,92E-03	3,58E-03	6,67E-03	6,55E-03	6,14E-03	3,74E-03	0,54	0,55	0,58
25	240	0,275	3,05E-03	3,58E-03	6,88E-03	6,75E-03	7,60E-03	3,82E-03	0,52	0,53	0,47
25	360	0,275	3,05E-03	3,58E-03	6,88E-03	6,75E-03	7,60E-03	3,82E-03	0,52	0,53	0,47
50	510	0,264	2,85E-03	3,47E-03	6,60E-03	6,48E-03	1,09E-02	3,65E-03	0,53	0,54	0,32
50	560	0,264	2,82E-03	3,51E-03	6,60E-03	7,68E-03	1,09E-02	3,65E-03	0,53	0,46	0,32
50	610	0,261	2,75E-03	3,47E-03	6,54E-03	7,59E-03	1,08E-02	3,59E-03	0,53	0,46	0,32
50	660	0,261	2,75E-03	3,47E-03	6,54E-03	7,59E-03	1,08E-02	3,59E-03	0,53	0,46	0,32
100	1200	0,226	2,04E-03	3,26E-03	6,10E-03	6,58E-03	1,17E-02	3,05E-03	0,53	0,49	0,28
100	1440	0,214	1,77E-03	3,29E-03	6,17E-03	6,77E-03	8,88E-03	2,87E-03	0,53	0,49	0,37
100	1680	0,205	1,58E-03	3,33E-03	6,15E-03	6,86E-03	8,49E-03	2,73E-03	0,54	0,49	0,39
100	1800	0,205	1,58E-03	3,33E-03	6,15E-03	6,86E-03	8,49E-03	2,73E-03	0,54	0,49	0,39
500	2640	0,108	5,42E-04	3,14E-03	5,58E-03	4,79E-03	2,36E-03	1,36E-03	0,56	0,66	1,33
500	2760	0,108	5,38E-04	3,18E-03	5,76E-03	4,79E-03	2,36E-03	1,36E-03	0,55	0,66	1,35
1000	3030	0,080	3,60E-04	3,07E-03	5,53E-03	4,42E-03	2,21E-03	9,87E-04	0,56	0,69	1,39
1000	3270	0,073	3,25E-04	3,07E-03	5,07E-03	4,05E-03	2,03E-03	9,05E-04	0,61	0,76	1,52
1000	4080	0,057	2,38E-04	3,06E-03	4,66E-03	3,13E-03	1,57E-03	6,94E-04	0,66	0,98	1,95
1000	4260	0,057	2,38E-04	3,06E-03	4,66E-03	3,13E-03	1,57E-03	6,94E-04	0,66	0,98	1,95
2000	4380	0,039	1,51E-04	3,95E-03	5,37E-03	2,87E-03	1,61E-03	4,73E-04	0,74	1,38	2,45
2000	4740	0,035	1,35E-04	3,53E-03	4,80E-03	2,56E-03	1,44E-03	4,22E-04	0,74	1,38	2,45
2000	5520	0,028	1,06E-04	3,20E-03	3,84E-03	2,05E-03	1,15E-03	3,36E-04	0,83	1,56	2,78
2000	6120	0,025	9,40E-05	4,02E-03	3,92E-03	1,84E-03	1,30E-03	3,02E-04	1,02	2,18	3,10
2000	6780	0,025	9,40E-05	4,02E-03	3,92E-03	1,84E-03	1,30E-03	3,02E-04	1,02	2,18	3,10
2000	7200	0,025	9,40E-05	4,02E-03	3,92E-03	1,84E-03	1,30E-03	3,02E-04	1,02	2,18	3,10

Tabela A.12 – Dados do ensaio de filtração com o sistema RMF-GT4.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 12 SOLO: RMF L AMOSTRA: 10,62 cm GEOTÊXTIL: GT4 $t_{GT} : 0,150$ cm GRADIENTE: 1

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	17	0	0	96,90	92,75	90,55	88,50	87,60	87,25	87,00
0	1	18	0	60	96,85	92,70	90,50	88,47	87,57	87,22	86,97
0	1	19	0	120	96,85	92,70	90,50	88,47	87,57	87,22	86,97
25	1	20	0	180	96,85	92,70	90,50	88,40	87,55	87,20	86,97
25	1	21	0	240	96,85	92,65	90,47	88,40	87,55	87,20	86,97
25	1	22	0	300	96,85	92,65	90,47	88,40	87,55	87,20	86,97
50	2	1	0	480	96,85	92,60	90,45	88,40	87,55	87,20	86,97
50	2	2	0	540	96,85	92,57	90,45	88,40	87,53	87,20	86,97
50	2	4	0	660	96,85	92,57	90,45	88,40	87,53	87,20	86,97
100	2	15	0	1320	96,85	92,35	90,30	88,32	87,47	87,17	86,95
100	2	17	0	1440	96,85	92,27	90,25	88,32	87,45	87,15	86,95
100	2	19	0	1560	96,85	92,27	90,25	88,32	87,45	87,15	86,95
500	3	0	30	1890	96,90	92,05	90,15	88,30	87,40	87,11	86,92
500	3	3	0	2040	96,90	92,05	90,15	88,27	87,42	87,11	86,92
500	3	12	0	2580	96,95	91,80	89,95	88,22	87,40	87,10	86,92
500	3	17	30	2910	96,95	91,70	89,85	88,20	87,39	87,10	86,92
500	3	21	0	3120	96,95	91,70	89,85	88,20	87,39	87,10	86,92
1000	4	0	0	3300	97,00	91,40	89,70	88,15	87,37	87,05	86,85
1000	4	12	0	4020	97,00	91,05	89,50	88,02	87,35	87,05	86,80
1000	4	19	0	4440	97,00	90,95	89,45	87,97	87,30	87,05	86,77
1000	4	22	0	4620	97,00	90,95	89,45	87,97	87,30	87,05	86,77
2000	5	1	0	4800	97,05	90,65	89,40	87,90	87,30	87,02	86,75
2000	5	12	0	5460	97,08	90,60	89,30	87,89	87,30	87,02	86,75
2000	5	23	0	6120	97,10	90,55	89,20	87,87	87,30	87,02	86,75
2000	6	9	0	6720	97,10	90,55	89,20	87,87	87,30	87,02	86,75
2000	6	17	0	7200	97,10	90,55	89,20	87,87	87,30	87,02	86,75

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELT(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	17	0	0	9,90	5,75	3,55	1,50	0,60	0,25	0
0	1	18	0	60	9,88	5,73	3,53	1,50	0,60	0,25	0
0	1	19	0	120	9,88	5,73	3,53	1,50	0,60	0,25	0
25	1	20	0	180	9,88	5,73	3,53	1,43	0,58	0,23	0
25	1	21	0	240	9,88	5,68	3,50	1,43	0,58	0,23	0
25	1	22	0	300	9,88	5,68	3,50	1,43	0,58	0,23	0
50	2	1	0	480	9,88	5,63	3,48	1,43	0,58	0,23	0
50	2	2	0	540	9,88	5,60	3,48	1,43	0,56	0,23	0
50	2	4	0	660	9,88	5,60	3,48	1,43	0,56	0,23	0
100	2	15	0	1320	9,90	5,40	3,35	1,37	0,52	0,22	0
100	2	17	0	1440	9,90	5,32	3,30	1,37	0,50	0,20	0
100	2	19	0	1560	9,90	5,32	3,30	1,37	0,50	0,20	0
500	3	0	30	1890	9,98	5,13	3,23	1,38	0,48	0,19	0
500	3	3	0	2040	9,98	5,13	3,23	1,35	0,50	0,19	0
500	3	12	0	2580	10,03	4,88	3,03	1,30	0,48	0,18	0
500	3	17	30	2910	10,03	4,78	2,93	1,28	0,47	0,18	0
500	3	21	0	3120	10,03	4,78	2,93	1,28	0,47	0,18	0
1000	4	0	0	3300	10,15	4,55	2,85	1,30	0,52	0,20	0
1000	4	12	0	4020	10,20	4,25	2,70	1,22	0,55	0,25	0
1000	4	19	0	4440	10,23	4,18	2,68	1,20	0,53	0,28	0
1000	4	22	0	4620	10,23	4,18	2,68	1,20	0,53	0,28	0
2000	5	1	0	4800	10,30	3,90	2,65	1,15	0,55	0,27	0
2000	5	12	0	5460	10,33	3,85	2,55	1,14	0,55	0,27	0
2000	5	23	0	6120	10,35	3,80	2,45	1,12	0,55	0,27	0
2000	6	9	0	6720	10,35	3,80	2,45	1,12	0,55	0,27	0
2000	6	17	0	7200	10,35	3,80	2,45	1,12	0,55	0,27	0

s_v (kPa)	DELT(min)	Q (cm ³ /s)	$K17$ (cm/s)	$K79$ (cm/s)	$K912$ (cm/s)	$K1012$ (cm/s)	$K1112$ (cm/s)	$K112$ (cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,296	3,07E-03	4,81E-03	6,81E-03	5,45E-03	4,90E-03	4,38E-03	0,71	0,88	0,98
0	60	0,296	3,07E-03	4,83E-03	6,81E-03	5,45E-03	4,90E-03	4,39E-03	0,71	0,89	0,99
0	120	0,296	3,07E-03	4,83E-03	6,81E-03	5,45E-03	4,90E-03	4,39E-03	0,71	0,89	0,99
25	180	0,292	3,03E-03	4,69E-03	7,04E-03	5,56E-03	5,26E-03	4,33E-03	0,67	0,84	0,89
25	240	0,292	2,99E-03	4,74E-03	7,04E-03	5,56E-03	5,26E-03	4,33E-03	0,67	0,85	0,90
25	300	0,292	2,99E-03	4,74E-03	7,04E-03	5,56E-03	5,26E-03	4,33E-03	0,67	0,85	0,90
50	480	0,283	2,87E-03	4,66E-03	6,84E-03	5,40E-03	5,11E-03	4,21E-03	0,68	0,86	0,91
50	540	0,283	2,85E-03	4,69E-03	6,84E-03	5,59E-03	5,11E-03	4,21E-03	0,69	0,84	0,92
50	660	0,283	2,85E-03	4,69E-03	6,84E-03	5,59E-03	5,11E-03	4,21E-03	0,69	0,84	0,92
100	1320	0,271	2,60E-03	4,65E-03	6,84E-03	5,77E-03	5,11E-03	4,02E-03	0,68	0,81	0,91
100	1440	0,267	2,51E-03	4,66E-03	6,72E-03	5,89E-03	5,53E-03	3,95E-03	0,69	0,79	0,84
100	1560	0,267	2,51E-03	4,66E-03	6,72E-03	5,89E-03	5,53E-03	3,95E-03	0,69	0,79	0,84
500	1890	0,252	2,24E-03	4,64E-03	6,31E-03	5,80E-03	5,50E-03	3,71E-03	0,74	0,80	0,84
500	2040	0,246	2,18E-03	4,49E-03	6,29E-03	5,43E-03	5,36E-03	3,61E-03	0,71	0,83	0,84
500	2580	0,238	1,99E-03	4,58E-03	6,31E-03	5,47E-03	5,47E-03	3,47E-03	0,73	0,84	0,84
500	2910	0,233	1,92E-03	4,61E-03	6,30E-03	5,49E-03	5,37E-03	3,41E-03	0,73	0,84	0,86
500	3120	0,233	1,92E-03	4,61E-03	6,30E-03	5,49E-03	5,37E-03	3,41E-03	0,73	0,84	0,86
1000	3300	0,212	1,63E-03	4,50E-03	5,62E-03	4,50E-03	4,39E-03	3,06E-03	0,80	1,00	1,03
1000	4020	0,195	1,41E-03	4,45E-03	5,52E-03	3,92E-03	3,23E-03	2,81E-03	0,81	1,13	1,38
1000	4440	0,190	1,35E-03	4,40E-03	5,47E-03	3,96E-03	2,81E-03	2,73E-03	0,81	1,11	1,57
1000	4620	0,190	1,35E-03	4,40E-03	5,47E-03	3,96E-03	2,81E-03	2,73E-03	0,81	1,11	1,57
2000	4800	0,172	1,16E-03	4,33E-03	5,17E-03	3,46E-03	2,64E-03	2,45E-03	0,84	1,25	1,64
2000	5460	0,169	1,13E-03	4,32E-03	5,13E-03	3,41E-03	2,60E-03	2,41E-03	0,84	1,27	1,66
2000	6120	0,167	1,10E-03	4,30E-03	5,14E-03	3,35E-03	2,56E-03	2,36E-03	0,84	1,28	1,68
2000	6720	0,167	1,10E-03	4,30E-03	5,14E-03	3,35E-03	2,56E-03	2,36E-03	0,84	1,28	1,68
2000	7200	0,167	1,10E-03	4,30E-03	5,14E-03	3,35E-03	2,56E-03	2,36E-03	0,84	1,28	1,68

Tabela A.13 – Dados do ensaio de filtração com o sistema ABG-GT1.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 13 SOLO: ABG L AMOSTRA: 10,45 cm GEOTÊXTIL: GT1 t_{GT} : 0,148 cm GRADIENTE: 1

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	22	0	0	97,35	87,70	87,20	86,90	86,85	86,77	86,70
0	1	22	30	30	97,35	87,70	87,20	86,90	86,85	86,77	86,70
0	1	23	0	60	97,40	87,52	87,10	86,85	86,78	86,75	86,65
0	1	23	30	90	97,40	87,52	87,10	86,85	86,78	86,75	86,65
0	2	0	0	120	97,40	87,52	87,10	86,85	86,78	86,75	86,65
50	2	1	0	180	97,45	87,30	86,95	86,75	86,70	86,65	86,51
50	2	3	0	300	97,45	87,25	86,90	86,70	86,65	86,62	86,47
50	2	4	30	390	97,45	87,25	86,90	86,70	86,65	86,62	86,47
50	2	6	0	480	97,45	87,25	86,90	86,70	86,65	86,62	86,47
100	2	18	0	1200	97,45	87,00	86,80	86,57	86,53	86,50	86,38
100	2	21	0	1380	97,45	86,92	86,72	86,53	86,50	86,47	86,36
100	3	0	0	1560	97,45	86,92	86,72	86,53	86,50	86,47	86,36
100	3	12	0	2280	97,45	86,92	86,72	86,53	86,50	86,47	86,36
500	3	18	0	2640	97,45	86,75	86,60	86,47	86,45	86,42	86,34
500	3	20	0	2760	97,45	86,75	86,60	86,47	86,45	86,42	86,34
500	4	0	0	3000	97,45	86,73	86,60	86,47	86,45	86,42	86,34
500	4	9	0	3540	97,45	86,73	86,60	86,47	86,45	86,42	86,34
500	4	12	0	3720	97,45	86,73	86,60	86,47	86,45	86,42	86,34
1000	5	0	0	4440	97,45	86,65	86,55	86,45	86,42	86,40	86,34
1000	5	10	0	5040	97,45	86,64	86,55	86,45	86,42	86,40	86,34
1000	5	12	0	5160	97,45	86,64	86,55	86,45	86,42	86,40	86,34
1000	5	18	0	5520	97,45	86,64	86,55	86,45	86,42	86,40	86,34
2000	6	0	0	5880	97,45	86,60	86,50	86,40	86,39	86,37	86,30
2000	6	8	0	6360	97,45	86,60	86,50	86,40	86,39	86,37	86,30
2000	6	14	0	6720	97,45	86,60	86,50	86,40	86,39	86,37	86,30
2000	6	22	0	7200	97,45	86,60	86,50	86,40	86,39	86,37	86,30

s _v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	22	0	0	10,65	1,00	0,50	0,20	0,15	0,07	0
0	1	22	30	30	10,65	1,00	0,50	0,20	0,15	0,07	0
0	1	23	0	60	10,75	0,87	0,45	0,20	0,13	0,10	0
0	1	23	30	90	10,75	0,87	0,45	0,20	0,13	0,10	0
0	2	0	0	120	10,75	0,87	0,45	0,20	0,13	0,10	0
50	2	1	0	180	10,94	0,79	0,44	0,24	0,19	0,14	0
50	2	3	0	300	10,98	0,78	0,43	0,23	0,18	0,15	0
50	2	4	30	390	10,98	0,78	0,43	0,23	0,18	0,15	0
50	2	6	0	480	10,98	0,78	0,43	0,23	0,18	0,15	0
100	2	18	0	1200	11,07	0,62	0,42	0,19	0,15	0,12	0
100	2	21	0	1380	11,09	0,56	0,36	0,17	0,14	0,11	0
100	3	0	0	1560	11,09	0,56	0,36	0,17	0,14	0,11	0
100	3	12	0	2280	11,09	0,56	0,36	0,17	0,14	0,11	0
500	3	18	0	2640	11,11	0,41	0,26	0,13	0,11	0,08	0
500	3	20	0	2760	11,11	0,41	0,26	0,13	0,11	0,08	0
500	4	0	0	3000	11,11	0,39	0,26	0,13	0,11	0,08	0
500	4	9	0	3540	11,11	0,39	0,26	0,13	0,11	0,08	0
500	4	12	0	3720	11,11	0,39	0,26	0,13	0,11	0,08	0
1000	5	0	0	4440	11,12	0,32	0,22	0,12	0,09	0,07	0
1000	5	10	0	5040	11,12	0,31	0,22	0,12	0,09	0,07	0
1000	5	12	0	5160	11,12	0,31	0,22	0,12	0,09	0,07	0
1000	5	18	0	5520	11,12	0,31	0,22	0,12	0,09	0,07	0
2000	6	0	0	5880	11,15	0,30	0,20	0,10	0,09	0,07	0
2000	6	8	0	6360	11,15	0,30	0,20	0,10	0,09	0,07	0
2000	6	14	0	6720	11,15	0,30	0,20	0,10	0,09	0,07	0
2000	6	22	0	7200	11,15	0,30	0,20	0,10	0,09	0,07	0

s _v (kPa)	DELTA(min)	Q(cm ³ /s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K12/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,031	1,32E-04	2,70E-03	5,40E-03	2,30E-03	1,85E-03	4,24E-04	0,50	1,17	1,46
0	30	0,031	1,32E-04	2,70E-03	5,40E-03	2,30E-03	1,85E-03	4,24E-04	0,50	1,17	1,46
0	60	0,031	1,29E-04	3,22E-03	5,40E-03	2,66E-03	1,30E-03	4,20E-04	0,60	1,21	2,49
0	90	0,031	1,29E-04	3,22E-03	5,40E-03	2,66E-03	1,30E-03	4,20E-04	0,60	1,21	2,49
0	120	0,031	1,29E-04	3,22E-03	5,40E-03	2,66E-03	1,30E-03	4,20E-04	0,60	1,21	2,49
50	180	0,023	9,37E-05	2,93E-03	3,36E-03	1,36E-03	6,91E-04	3,08E-04	0,87	2,16	4,24
50	300	0,022	8,66E-05	2,72E-03	3,25E-03	1,33E-03	5,99E-04	2,85E-04	0,84	2,05	4,55
50	390	0,022	8,66E-05	2,72E-03	3,25E-03	1,33E-03	5,99E-04	2,85E-04	0,84	2,05	4,55
50	480	0,022	8,66E-05	2,72E-03	3,25E-03	1,33E-03	5,99E-04	2,85E-04	0,84	2,05	4,55
100	1200	0,017	6,50E-05	2,68E-03	3,03E-03	1,23E-03	5,76E-04	2,17E-04	0,88	2,18	4,65
100	1380	0,015	5,91E-05	2,71E-03	3,10E-03	1,21E-03	5,76E-04	1,99E-04	0,87	2,24	4,70
100	1560	0,015	5,91E-05	2,71E-03	3,10E-03	1,21E-03	5,76E-04	1,99E-04	0,87	2,24	4,70
100	2280	0,015	5,91E-05	2,71E-03	3,10E-03	1,21E-03	5,76E-04	1,99E-04	0,87	2,24	4,70
500	2640	0,011	4,23E-05	2,74E-03	2,95E-03	1,12E-03	5,76E-04	1,44E-04	0,93	2,46	4,76
500	2760	0,011	4,23E-05	2,74E-03	2,95E-03	1,12E-03	5,76E-04	1,44E-04	0,93	2,46	4,76
500	3000	0,009	3,38E-05	2,36E-03	2,36E-03	8,93E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,00	2,64	5,13
500	3540	0,009	3,38E-05	2,36E-03	2,36E-03	8,93E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,00	2,64	5,13
500	3720	0,009	3,38E-05	2,36E-03	2,36E-03	8,93E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,00	2,64	5,13
1000	4440	0,008	3,14E-05	2,88E-03	2,50E-03	1,08E-03	5,31E-04	1,08E-04	1,15	2,66	5,42
1000	5040	0,007	2,51E-05	2,42E-03	2,00E-03	8,67E-04	4,25E-04	8,66E-05	1,21	2,80	5,70
1000	5160	0,007	2,51E-05	2,42E-03	2,00E-03	8,67E-04	4,25E-04	8,66E-05	1,21	2,80	5,70
1000	5520	0,007	2,51E-05	2,42E-03	2,00E-03	8,67E-04	4,25E-04	8,66E-05	1,21	2,80	5,70
2000	5880	0,005	1,79E-05	1,64E-03	1,64E-03	5,85E-04	2,82E-04	6,17E-05	1,00	2,81	5,83
2000	6360	0,004	1,43E-05	1,32E-03	1,32E-03	4,68E-04	2,26E-04	4,93E-05	1,00	2,81	5,83
2000	6720	0,004	1,43E-05	1,32E-03	1,32E-03	4,68E-04	2,26E-04	4,93E-05	1,00	2,81	5,83
2000	7200	0,004	1,43E-05	1,32E-03	1,32E-03	4,68E-04	2,26E-04	4,93E-05	1,00	2,81	5,83

Tabela A.14 – Dados do ensaio de filtração com o sistema ABG-GT2.

ENSAIO DE GR SOB TENSÃO: 14 SOLO: ABG L AMOSTRA: 10,70 cm GEOTÊXTIL: GT2 t_{GT} : 0,240 cm GRADIENTE: 1

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	P1(cm)	P7(cm)	P8(cm)	P9(cm)	P10(cm)	P11(cm)	P12(cm)
0	1	13	0	0	97,30	89,50	88,60	87,20	87,05	86,90	86,80
0	1	14	0	60	97,30	89,50	88,60	87,20	87,05	86,90	86,80
0	1	15	0	120	97,30	89,20	88,30	86,92	86,77	86,65	86,55
0	1	16	0	180	97,30	89,20	88,30	86,92	86,77	86,65	86,55
0	1	18	0	300	97,30	89,20	88,30	86,92	86,77	86,65	86,55
50	1	20	0	420	97,30	88,92	88,10	86,85	86,70	86,60	86,50
50	2	9	0	1200	97,35	88,00	87,40	86,55	86,45	86,37	86,28
50	2	12	0	1380	97,35	88,00	87,40	86,55	86,45	86,37	86,28
50	2	18	0	1740	97,35	88,00	87,40	86,55	86,45	86,37	86,28
100	2	20	30	1890	97,40	87,65	87,20	86,47	86,40	86,33	86,25
100	3	9	0	2640	97,40	86,80	86,65	86,30	86,28	86,25	86,15
100	3	12	0	2820	97,40	86,80	86,65	86,30	86,28	86,25	86,15
100	3	18	0	3180	97,40	86,80	86,65	86,30	86,28	86,25	86,15
500	3	21	0	3360	97,40	86,62	86,50	86,28	86,25	86,22	86,12
500	4	9	0	4080	97,40	86,45	86,40	86,25	86,22	86,20	86,12
500	4	12	0	4260	97,40	86,45	86,40	86,25	86,22	86,20	86,12
500	4	22	0	4860	97,40	86,45	86,40	86,25	86,22	86,20	86,12
1000	5	8	0	5460	97,40	86,42	86,40	86,22	86,20	86,18	86,10
1000	5	10	0	5580	97,40	86,42	86,40	86,22	86,20	86,18	86,10
1000	5	12	0	5700	97,40	86,40	86,38	86,22	86,20	86,18	86,10
1000	5	14	0	5820	97,40	86,40	86,38	86,22	86,20	86,18	86,10
1000	5	18	0	6060	97,40	86,40	86,38	86,22	86,20	86,18	86,10
2000	5	22	0	6300	97,40	86,38	86,35	86,20	86,18	86,15	86,07
2000	6	8	0	6900	97,40	86,38	86,35	86,20	86,18	86,15	86,07
2000	6	10	0	7020	97,40	86,38	86,35	86,20	86,18	86,15	86,07
2000	6	13	0	7200	97,40	86,38	86,35	86,20	86,18	86,15	86,07

s_v (kPa)	DIA	HORA	MINUTOS	DELTA(min)	h1/12(cm)	h7/12(cm)	h8/12(cm)	h9/12(cm)	h10/12(cm)	h11/12(cm)	h12/12(cm)
0	1	13	0	0	10,50	2,70	1,80	0,40	0,25	0,10	0
0	1	14	0	60	10,50	2,70	1,80	0,40	0,25	0,10	0
0	1	15	0	120	10,75	2,65	1,75	0,37	0,22	0,10	0
0	1	16	0	180	10,75	2,65	1,75	0,37	0,22	0,10	0
0	1	18	0	300	10,75	2,65	1,75	0,37	0,22	0,10	0
50	1	20	0	420	10,80	2,42	1,60	0,35	0,20	0,10	0
50	2	9	0	1200	11,07	1,72	1,12	0,27	0,17	0,09	0
50	2	12	0	1380	11,07	1,72	1,12	0,27	0,17	0,09	0
50	2	18	0	1740	11,07	1,72	1,12	0,27	0,17	0,09	0
100	2	20	30	1890	11,15	1,40	0,95	0,22	0,15	0,08	0
100	3	9	0	2640	11,25	0,65	0,50	0,15	0,13	0,10	0
100	3	12	0	2820	11,25	0,65	0,50	0,15	0,13	0,10	0
100	3	18	0	3180	11,25	0,65	0,50	0,15	0,13	0,10	0
500	3	21	0	3360	11,28	0,50	0,38	0,16	0,13	0,10	0
500	4	9	0	4080	11,28	0,33	0,28	0,13	0,10	0,08	0
500	4	12	0	4260	11,28	0,33	0,28	0,13	0,10	0,08	0
500	4	22	0	4860	11,28	0,33	0,28	0,13	0,10	0,08	0
1000	5	8	0	5460	11,30	0,32	0,30	0,12	0,10	0,08	0
1000	5	10	0	5580	11,30	0,32	0,30	0,12	0,10	0,08	0
1000	5	12	0	5700	11,30	0,30	0,28	0,12	0,10	0,08	0
1000	5	14	0	5820	11,30	0,30	0,28	0,12	0,10	0,08	0
1000	5	18	0	6060	11,30	0,30	0,28	0,12	0,10	0,08	0
2000	5	22	0	6300	11,33	0,31	0,28	0,13	0,11	0,08	0
2000	6	8	0	6900	11,33	0,31	0,28	0,13	0,11	0,08	0
2000	6	10	0	7020	11,33	0,31	0,28	0,13	0,11	0,08	0
2000	6	13	0	7200	11,33	0,31	0,28	0,13	0,11	0,08	0

s_v (kPa)	DELTA(min)	Q(cm ³ /s)	K1/7(cm/s)	K7/9(cm/s)	K9/12(cm/s)	K10/12(cm/s)	K11/12(cm/s)	K12/12(cm/s)	GR ASTM	GR(8mm)	GR(3mm)
0	0	0,079	4,49E-04	2,38E-03	6,84E-03	3,50E-03	3,28E-03	1,11E-03	0,35	0,68	0,72
0	60	0,079	4,49E-04	2,38E-03	6,84E-03	3,50E-03	3,28E-03	1,11E-03	0,35	0,68	0,72
0	120	0,079	4,32E-04	2,40E-03	7,39E-03	3,98E-03	3,28E-03	1,09E-03	0,32	0,60	0,73
0	180	0,079	4,32E-04	2,40E-03	7,39E-03	3,98E-03	3,28E-03	1,09E-03	0,32	0,60	0,73
0	300	0,079	4,32E-04	2,40E-03	7,39E-03	3,98E-03	3,28E-03	1,09E-03	0,32	0,60	0,73
50	420	0,070	3,69E-04	2,34E-03	6,91E-03	3,87E-03	2,90E-03	9,58E-04	0,34	0,60	0,81
50	1200	0,047	2,21E-04	2,22E-03	5,97E-03	3,03E-03	2,15E-03	6,23E-04	0,37	0,73	1,03
50	1380	0,047	2,21E-04	2,22E-03	5,97E-03	3,03E-03	2,15E-03	6,23E-04	0,37	0,73	1,03
50	1740	0,047	2,21E-04	2,22E-03	5,97E-03	3,03E-03	2,15E-03	6,23E-04	0,37	0,73	1,03
100	1890	0,039	1,76E-04	2,28E-03	6,11E-03	2,87E-03	2,01E-03	5,16E-04	0,37	0,79	1,13
100	2640	0,019	8,11E-05	2,69E-03	4,48E-03	1,65E-03	8,06E-04	2,56E-04	0,60	1,62	3,33
100	2820	0,019	8,11E-05	2,69E-03	4,48E-03	1,65E-03	8,06E-04	2,56E-04	0,60	1,62	3,33
100	3180	0,019	8,11E-05	2,69E-03	4,48E-03	1,65E-03	8,06E-04	2,56E-04	0,60	1,62	3,33
500	3360	0,011	4,56E-05	2,26E-03	2,40E-03	9,45E-04	4,61E-04	1,46E-04	0,94	2,39	4,90
500	4080	0,009	3,59E-05	3,07E-03	2,36E-03	9,82E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,30	3,12	6,67
500	4260	0,009	3,59E-05	3,07E-03	2,36E-03	9,82E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,30	3,12	6,67
500	4860	0,009	3,59E-05	3,07E-03	2,36E-03	9,82E-04	4,61E-04	1,16E-04	1,30	3,12	6,67
1000	5460	0,006	2,24E-05	1,92E-03	1,60E-03	6,14E-04	2,88E-04	7,27E-05	1,20	3,13	6,67
1000	5580	0,006	2,24E-05	1,92E-03	1,60E-03	6,14E-04	2,88E-04	7,27E-05	1,20	3,13	6,67
1000	5700	0,005	2,01E-05	1,92E-03	1,44E-03	5,53E-04	2,59E-04	6,54E-05	1,33	3,47	7,41
1000	5820	0,005	2,01E-05	1,92E-03	1,44E-03	5,53E-04	2,59E-04	6,54E-05	1,33	3,47	7,41
1000	6060	0,005	2,01E-05	1,92E-03	1,44E-03	5,53E-04	2,59E-04	6,54E-05	1,33	3,47	7,41
2000	6300	0,005	1,91E-05	1,83E-03	1,27E-03	4,78E-04	2,47E-04	6,21E-05	1,44	3,82	7,41
2000	6900	0,005	1,91E-05	1,83E-03	1,27E-03	4,78E-04	2,47E-04	6,21E-05	1,44	3,82	7,41
2000	7020	0,005	1,91E-05	1,83E-03	1,27E-03	4,78E-04	2,47E-04	6,21E-05	1,44	3,82	7,41
2000	7200	0,005	1,91E-05	1,83E-03	1,27E-03	4,78E-04	2,47E-04	6,21E-05	1,44	3,82	7,41