UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

CAMILO ALBERTO HERNÁNDEZ ORTIZ

DESEMPENHO DE GEOTÊXTEIS NA FILTRAÇÃO DE SUSPENSÕES ÁGUA -
SOLO.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos – SP

2012

VERSÃO CORRIGIDA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

H558d Hernández Ortiz, Camilo Alberto
Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões
água - solo. / Camilo Alberto Hernández Ortiz;
orientador Orencio Monje Vilar. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. Geossintéticos não-tecidos. 2. filtração. 3.
partículas suspensas. 4. colmatção. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **CAMILO ALBERTO HERNANDEZ ORTIZ**.

Título da dissertação: "Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões água-solo".

Data da defesa: 13/12/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Orencio Monje Vilar** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof^a. Dr^a. **Eliane Viviani**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Dr. **Carlos Vinicius dos Santos Benjamim**
(Ober S/A Indústria e Comércio)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

A Deus, minha família e esposa Patricia que me dão força e sabedoria: A força para enfrentar qualquer dificuldade e a sabedoria para fazer o que é correto.

AGRADECIMENTOS

Ao Brasil, gigante da América do Sul, pela imensurável contribuição em minha formação e pela oportunidade de realizar esta aspiração pessoal. Minha eterna gratidão.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo fornecida durante o período do mestrado.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, que contribuíram decisivamente no meu crescimento nesta área de conhecimento.

A todos os funcionários e amigos do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, em especial a Maristela, Neiva, Álvaro, Heriverto, Clever, J. War e Oscar pelo apoio constante.

Ao professor Orencio que me ensinou que ter todo o conhecimento do mundo não é tão importante quanto ter a humildade e a disposição para compartilhá-lo.

HERNÁNDEZ C. A. O. (2012). **Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões água - solo**. São Carlos, 2012. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RESUMO: os geotêxteis não-tecidos desempenham, dentre outras funções, papel relevante na filtração e drenagem de solos. Nesta função, necessitam ter vazios suficientemente grandes para permitir a livre passagem de água e, ao mesmo tempo, vazios suficientemente pequenos para impedir o arraste de partículas, de sorte a evitar a erosão interna do solo. Critérios de dimensionamento para atender a ambos os requisitos estão disponíveis na literatura e são utilizados com sucesso há vários anos. Uma situação menos estudada e compreendida refere-se ao desempenho desses geotêxteis na filtração de água com sólidos em suspensão. Trata-se de uma situação tida como crítica, pela possibilidade de colmatação do geotêxtil por essas partículas, de acordo com diferentes mecanismos. Neste trabalho, verifica-se o desempenho, em laboratório, de geotêxteis não-tecidos frente à filtração de suspensões de solo em água, tal qual poderia ocorrer por ocasião de enxurradas. Nessa perspectiva, tenta-se verificar qual poderia ser o desempenho desses geotêxteis quando utilizados para compor sistemas de proteção da entrada de estruturas de captação de água, como bocas de lobo e bueiros. O trabalho utiliza um geotêxtil não tecido de fibras curtas, fabricado a partir de poliéster e suspensões contendo bentonita e uma areia fina argilosa, solo típico da região de São Carlos, em diferentes concentrações. Estabelecem-se correlações entre diferentes características e propriedades dos geotêxteis estudados e estuda-se o mecanismo de colmatação, que em geral ocorreu para todos os geotêxteis, em intervalos de tempo associados às características do geotêxtil e à concentração de solo na suspensão. As severas condições de colmatação observadas e o comprometimento da permeabilidade dos geotêxteis sugerem que para as concentrações de solo utilizadas, os geotêxteis não seriam capazes de cumprir com a proteção da entrada de estruturas de drenagem.

Palavras chave: Geossintéticos não-tecidos, filtração, partículas suspensas, colmatação.

HERNÁNDEZ C. A. O. (2012). **Performance of geotextiles in filtration of suspension water - soil**. São Carlos, 2012. Master Dissertation – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ABSTRACT: Nonwoven geotextiles play an important role in filtration and drainage of soils, among other functions. In these functions, they need to have large enough internal voids to allow free passage of water and at the same time these voids should be small enough to prevent the passing of particles and preventing piping formation or erosion of soil. Design criteria to satisfy both requirements are available in the literature and have been used successfully for many years. A topic that has not been deeply addressed refers to the performance of geotextiles on filtration of water with suspended solids since the possibility of geotextile clogging is real, impairing its behavior. In this work, the performance of nonwoven geotextiles in laboratory tests designed to observe the filtration of water containing solid particles in suspension is addressed. The tests were devised trying to understand what could be the performance of these geotextiles when used to compose inlet protection systems for drainage structures, such as culverts. The study used nonwoven short-fibers geotextile, made of polyester and suspensions containing bentonite and clayey fine sand, a typical soil of São Carlos area, Brazil, in different concentrations. The laboratory test results show that there exist correlations among different characteristics and properties of geotextiles studied and allowed to evaluate the mechanism of clogging, which generally occurred for all geotextiles, in time intervals associated to some characteristics of the geotextile and to the soil concentration in suspension. The severe clogging observed and the reduction of permeability of geotextile suggest that, for the solids concentration used, the geotextiles could not protect the entrance of drainage structures.

Keywords: nonwoven geotextiles, retention criteria; suspended particles; clogging.

HERNÁNDEZ C. A. O. (2012). **Desempeño de los geotextiles sometidos a la filtración de suspensiones agua-suelo**. São Carlos, 2012. Disertación de Maestría– Departamento de Geotecnia, Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo.

RESUMEN: Los geotextiles del tipo no tejidos desempeñan, funciones relevantes en requerimientos de filtración y drenaje en suelos. Para cumplir a cabalidad esta función, es necesario que el geotextil utilizado cuente con porosidad suficientemente grande que permita el libre paso del agua y al mismo tiempo, vacíos suficientemente pequeños que impidan el arrastre de partículas, evitando la erosión interna del suelo. Los criterios de diseño para atender estos requisitos están disponibles en la literatura y son utilizados con éxito desde hace años. Una situación menos estudiada y comprendida se refiere al desempeño que presentan estos geotextiles en la filtración de suspensiones. Se trata de una situación clasificada como crítica, por la posibilidad de colmatación que presentan los geotextiles a causa de estas pequeñas partículas, de acuerdo con diferentes mecanismos. En este trabajo, se verifica el desempeño, en el laboratorio, de los geotextiles no tejidos frente a la filtración de suspensiones de suelo en agua, evento que podría ocurrir por medio de lluvias torrenciales. Desde este punto de vista, se trata de verificar cual podría ser el desempeño de estos geotextiles al ser utilizados para componer sistemas de protección en la entrada de estructuras de captación de agua pluviales, como son las bocas de lobo y alcantarillas. El trabajo utilizó geotextil no tejido de fibras cortas, fabricado a partir de poliéster, también suspensiones de bentonita y una arena arcillosa, suelo típico de la región de São Carlos, en diferentes concentraciones. Se establecieron correlaciones entre diferentes características y propiedades de los geotextiles estudiados y se estudió el mecanismo de colmatación que ocurre de manera general en todos los geotextiles, en intervalos de tiempo asociados a las características del geotextil y a la concentración de suelo en la suspensión. Las severas condiciones de colmatación observadas y el comprometimiento de la permeabilidad de los geotextiles sugieren que, para las concentraciones del suelo utilizadas, estos no serian capaces de cumplir con los requerimientos de protección en entrada de estructuras de drenaje.

Palabras llave: Geosintéticos no tejidos, filtración, partículas en suspensión, colmatación.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Estruturas de proteção na entrada de bueiros. a) Estrutura de proteção circular. b) Estrutura de proteção no formato quadrado, apresentando funcionamento ruim. c) Barreira filtrante ao redor do bueiro. d) Barreira filtrante e de proteção em obras civis.....	5
Figura 2.2 Tipos de geotêxteis. a) Geotêxtil tecido. b) Geotêxtil não tecido.....	7
Figura 2.3 Exemplo do resultado do ensaio de tração em faixa larga de geotêxtil não tecido.	8
Figura 2.4 Esquema para ensaio de permeabilidade.....	9
Figura 2.5 Esquema para ensaio de transmissividade.....	10
Figura 2.6 Esquema de equipamento de ensaio abertura aparente de filtração na via úmida adaptado de NBR 15229 (ABNT, 2005).	11
Figura 2.7 a) Esquema ensaio hidrodinâmico. b) Curva granulométrica típica no ensaio de peneiramento hidrodinâmico adaptado de BUENO & VIDAL, (2004).....	12
Figura 2.8 Usos destacados de geossintéticos não-tecidos em sistemas de filtração e drenagem adaptado de SATO; YOSHIDA & FUTAKI,. (1986).....	14
Figura 2.9 a) Instalação de sistema drenante com geotêxtil não tecido, b) Esquema do mecanismo de retenção de solo, modificado de IGS, (2012).	15
Figura 2.10 Modelo bidimensional da projeção do biofilme, modificado de YAMAN et al., (2006) ..	16
Figura 2.11 Filtragem de partículas em suspensão através de uma manta de geossintéticos não tecido (FARIAS, 2005).	17
Figura 2.12 Esquema do movimento da água no interior do geotêxtil durante o ensaio de grande porte. (FARIAS, 2005).	17
Figura 2.13 a) Processo de enchimento das bolsas penduradas, b) Material filtrado retido na bolsa, modificado de MARTINS, (2006).....	18
Figura 2.14 Critérios de retenção do solo em condições de fluxo no estado estacionário, modificado de LUETTICH et al., (1992).....	21
Figura 2.15 Critérios de retenção do solo de condições de fluxo dinâmico, LUETTICH et al., (1992)21	
Figura 2.16 Mecanismo de colmatção interna em geotêxteis modificado de PALMEIRA & GARDONI (2000).	25
Figura 2.17 a) Grumos de solo no geotêxtil (PALMEIRA & GARDONI, 2000), b) Partículas de solo com tamanhos maiores que o especificado pela porometria do geotêxtil (PALMEIRA et al., 2005).	26

Figura 2.18 Mecanismo de colmatção física devido à cegamento modificado de PALMEIRA & GARDONI, (2000).	27
Figura 2.19 Mecanismo de colmatção física por bloqueamento modificado de PALMEIRA & GARDONI, (2000)	28
Figura 2.20 Esquema do mecanismo de filtração para partículas em suspensão adaptado de VIVIANI, (1992).	29
Figura 2.21 Modelo de LE COQ`S, (1996) em FAURE et al., (2006) Acomodamento em paralelo e em serie das partículas no interior do geotêxtil gerando entupimento.	30
Figura 2.22 Mecanismos de captura de partículas, modificado de HUTTEM, (2007).	32
Figura 3.1 Esquema geral dos trabalhos realizados.	33
Figura 3.2 Equipamento de medição utilizado durante os ensaios, balança analítica.	34
Figura 3.3 Equipamento utilizado na medição da Espessura de filtração em todos os corpos de prova geotêxtil.	34
Figura 3.4 Equipamento utilizado na medição da Permeabilidade normal em todos os corpos de prova geotêxtil.	35
Figura 3.5 Equipamento utilizado na medição da Transmissividade no plano em todos os corpos de prova geotêxtil.	36
Figura 3.6 Equipamento utilizado na medição da Abertura aparente de filtração em todos os corpos de prova geotêxtil.	36
Figura 3.7 Equipamento que simula a forma da roda gigante, utilizado segundo a norma G38087 (AFNOR, 1983).....	37
Figura 3.8 Microscópio digital MIC-D fabricado pela OLYMPUS, consegue ampliações de até 255x.	37
Figura 3.9 Microfotografias das diversas gramaturas. R1 644 g/m ² ; R2 525 g/m ² ; R3 385 g/m ² ; R4 291 g/m ² ; R5 203 g/m ² ; R6 156 g/m ² ; R7 127 g/m ²	38
Figura 3.10 Bentonita sódica em pó utilizada nos ensaios.	39
Figura 3.11 Curva granulométrica da bentonita utilizada nos ensaios.	40
Figura 3.12 Curva granulométrica do solo do Campus II.	42
Figura 3.13 Reservatório usado durante o ensaio, capacidade 150 litros.	43
Figura 3.14 Recipientes metálicos e corpo de prova fixado pronto para ensaio.	44
Figura 3.15 Potes plásticos utilizados na coleta de água filtrada, capacidade 2000 ml.	45

Figura 3.16 Funil acoplado na base do anel metálico.....	45
Figura 3.17 Dispositivo de agitação das partículas dissolvidas na água esquerda. Ar comprimido gerando agitação direita.....	46
Figura 3.18 Equipamento utilizado nos ensaios de filtração. a) Reservatório com a mistura água solo. b) Entrada de ar comprimido para o dispositivo de agitação. c) Lugar de fixação dos corpos de prova. d) Saída da água percolada.....	47
Figura 3.19 Bentonita após de 24 horas de estabilização 10 g/L.....	48
Figura 3.20 Corpo de prova disposto na base do anel metálico.	49
Figura 3.21 Corpos de prova secados ao ar.	50
Figura 4.1 Relação entre espessura (t_{GT}) e gramatura (G) dos geotêxteis ensaiados.	52
Figura 4.2 Relação entre gramatura (G) e transmissividade (T) dos geotêxteis ensaiados.....	53
Figura 4.3 Relação entre espessura (t_{GT}) e transmissividade (T) dos geotêxteis ensaiados.	54
Figura 4.4 Relação entre abertura de filtração segundo as normas AFNOR (F) e ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.....	55
Figura 4.5 Relação entre abertura de filtração AFNOR (F) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.....	56
Figura 4.6 Relação entre abertura de filtração ASTM (A) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.....	57
Figura 4.7 Relação entre a gramatura (G) permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.	58
Figura 4.8 Relação entre gramatura (G) e abertura de filtração AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.	59
Figura 4.9 Relação entre gramatura (G) e abertura de filtração ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.	59
Figura 4.10 Relação entre espessura (t_{GT}) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.....	60
Figura 4.11 Relação entre espessura (t_{GT}) e Permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.....	61
Figura 4.12 Relação entre espessura (t_{GT}) e AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.	61
Figura 4.13 Relação entre transmissividade (T) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.....	62
Figura 4.14 Relação entre transmissividade (T) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.....	63
Figura 4.15 Relação entre transmissividade (T) e AOS AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.	64
Figura 4.16 Relação entre volume e tempo para água limpa.	66

Figura 4.17 Ilustração de diferentes etapas do ensaio de filtração com o geotêxtil R6 (156 g/m ²) de partículas suspensas de bentonita. a) Acumulação da bentonita sobre o geotêxtil após o ensaio. b) Amostra secada ao ar, c) Microfotografia, partículas de bentonita entre os filamentos do geotêxtil (aumento 98x), d) Corte transversal do geotêxtil (aumento 31x).	67
Figura 4.18 Curvas de filtração de bentonita em suspensão concentração 5 g/L, geotêxteis não-tecidos de poliéster, R2 (525 g/m ²); R4 (291 g/m ²); R5 (203 g/m ²); R6 (156 g/m ²).	68
Figura 4.19 Tempo de transição para R2 e mistura água bentonita com 5 g/L.	69
Figura 4.20 Tempo de transição para R4 e mistura água bentonita com 5 g/L.	69
Figura 4.21 Tempo de transição para R5 e mistura água bentonita com 5 g/L.	70
Figura 4.22 Tempo de transição para R6 e mistura água bentonita com 5 g/L.	70
Figura 4.23 Relação entre gramatura (G) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão na concentração de 5g/l.	71
Figura 4.24 Relação entre espessura (t _{GT}) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão de bentonita na concentração de 5g/L.	71
Figura 4.25 Relação entre permissividade (P) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão de bentonita na concentração de 5g/L.	72
Figura 4.26 Relação entre transmissividade (T) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados.	73
Figura 4.27 Relação entre AOS ASTM (A) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados.	73
Figura 4.28 Relação entre AFNOR (F) e o tempo de transição (t _r) dos geotêxteis ensaiados.	74
Figura 4.29 Resultados dos ensaios de filtração do geotêxtil R1 (644 g/m ²) para misturas de solo-água nas concentrações de 20 g/L, 10g/L e 5g/L.	75
Figura 4.30 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 20 g/L.	75
Figura 4.31 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 10 g/L.	76
Figura 4.32 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 5 g/L.	77
Figura 4.33 Resultado do ensaio de filtração do geotêxtil R2 com gramatura 525 g/m ² e mistura solo-água com 20 g/L e o tempo de transição.	77
Figura 4.34 Curvas de filtração para o geotêxtil R3 (385 g/m ²) e tempos de transição t _r das misturas água-solo.	78
Figura 4.35 Curvas de filtração do geotêxtil R4 (291 g/m ²) e tempos de transição t _r (72s para 20 g/L) e (190s para 10 g/L) das misturas água-solo.	78
Figura 4.36 Curvas dos ensaios de filtração para R5 (203 g/m ²).	79

Figura 4.37 Resultados dos ensaios de filtração para geotêxtil R6 (156 g/m ²) nas diferentes concentrações.....	80
Figura 4.38 Resultados dos ensaios de filtração do geotêxtil R7 (127 g/m ²) e diferentes concentrações.	81
Figura 4.39 Resultados ensaios de filtração concentração 20 g/L para as gramaturas estudadas.	82
Figura 4.40 Resultados ensaios de filtração concentração 10 g/L para as gramaturas estudadas.	83
Figura 4.41 Resultados ensaios de filtração concentração 5 g/L para as gramaturas estudadas.	83
Figura 4.42 Fotografias de R1 (644 g/m ²) após do ensaio de filtração na concentração 20 g/L, para o geotêxtil virgem e reutilização R1r após de seco ao ar.	84
Figura 4.43 Fotografias de R7 (127 g/m ²) após do ensaio de filtração na concentração 20 g/L e reutilização (R7r) após de seco ao ar.	85
Figura 4.44 Resultados dos ensaios de filtração na concentração 20 g/L, para R1 (644 g/m ²) e reutilização do corpo de prova apos de seco ao ar R1r.	85
Figura 4.45 Resultados dos ensaios de filtração na concentração 20 g/L, para R7 (127 g/m ²) e reutilização do corpo de prova apos de seco ao ar R7r.	86
Figura 4.46 Comparação resultados filtração 20 g/L reutilizando os corpos de prova para todas as gramaturas estudadas.....	87
Figura 4.47 Microfotografias dos corpos de prova apos sua reutilização (fase 2) na filtração da mistura água-solo na concentração de 20 g/L. (relação de ampliação 255x)	88
Figura 4.48 Fotos de R1 (644 g/m ²) apos cada uma das fases do ensaio: F1 - após ensaio na amostra virgem; F2 - primeira reutilização após secagem ao ar; F3 Esquerda - segunda reutilização; Direita (taxa de ampliação 31x) - corte transversal mostrando o interior do geotêxtil.	89
Figura 4.49 Resultados obtidos nas três fases de ensaio para R1. Geotêxtil virgem - F1; Primeiro reuso - F2; Segundo reuso - F3.....	90
Figura 4.50 Curvas de vazão aproximada em cada uma das fases de ensaio para R1, Direita acima mostra um zoom das curvas nas fases de reutilização dada sua pequena vazão.	91
Figura 4.51 Fotos de R6 (156 g/m ²) apos cada uma das fases do ensaio; F1: Após ensaio na mostra virgem; F2: Após a primeira reutilização, F3 Esquerda: segunda reutilização, após secagem ao ar. F3 Direita: (taxa de ampliação 50x) corte transversal mostrando o processo de colmatção no interior do geotêxtil.	92
Figura 4.52 Curvas de filtração para R6 (156 g/m ²) na concentração de 5 g/L. Geotêxtil virgem - F1; Primeiro reuso - F2; Segundo reuso - F3.	93

Figura 4.53 Curvas da vazão x tempo para R6 nas diversas fases de ensaio e reutilização do corpo de prova. Ensaio com o corpo de prova virgem (Fase 1 - F1); Primeiro reúso (Fase 2 - F2); Segundo reúso (Fase 3 - F3). Acima, á direita, se apresentam as curvas de reutilização F2 e F3 ampliadas...	94
Figura 4.54 Corpos de prova após da fase 3 do ensaio de filtração da mistura água solo na concentração de 5 g/L. Esquerda:(taxa de ampliação 132x) geotêxtil R1; Direita: geotêxtil R6. (relação de ampliação 43x)	95
Figura 4.55 Esquema da progressiva obstrução das aberturas de filtração na parte superior do geotêxtil.	95
Figura 4.56 Fotografias da superfície dos corpos de prova R1 após a fase 3 (F3) na direita (taxa de ampliação 57x) e R6 na esquerda (taxa de ampliação 31x) após de seu segundo reuso.....	96
Figura 4.57 Modelo de colmatação de geossintéticos não-tecidos pela aglomeração de partículas de solo suspensas na água ao redor dos filamentos. A: Passagem livre, B: Aglomeração de partículas nos filamentos, C: Colmatação do geotêxtil.....	96
Figura 4.58 Corte transversal dos corpos de prova após o segundo reuso, fase 3 - F3. (taxa de ampliação esquerda 31x, direita 50x)	97
Figura 5.1 Esquema de funcionamento de uma silt-fence (KOERNER, 2005).	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Identificação da função habitual para cada tipo de geossintético e as matérias-primas, modificado de KOERNER R.M. (2005).....	7
Tabela 2.2 Critérios colmatação modificado de CHRISTOPHER & FISCHER, (1992).	24
Tabela 3.1 Propriedades da bentonita	40
Tabela 3.2 Análise química da bentonita oriunda da Bentonit União Nordeste. Modificado de LEITE et al., (2008).....	41
Tabela 3.3 Características do solo utilizado na pesquisa.	42
Tabela 4.1 Características físicas dos geotêxteis não-tecidos.	51
Tabela 4.2 Propriedades hidráulicas dos geotêxteis.	52
Tabela 4.3 Correlações das características e propriedades dos geotêxteis ensaiados.	64
Tabela 5.1 Características da Bentonita	98
Tabela 5.2 Características da areia argilosa.	98
Tabela 5.3 Aberturas de filtração dos geotêxteis estudados.	99
Tabela 5.4 Alguns critérios de retenção para filtros AGUIAR & VERTEMATTI (2004).....	99

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

Abreviaturas

A	ASTM
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalization
AOS	Apparent Opening Size (O_{95})
ASTM	American Society for Testing Materials
CP	Corpo de prova
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
F	AFNOR
G	Gramatura
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
NBR	Norma Brasileira
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
T	Transmissividade
t_{GT}	Espessura do geotêxtil
t_r	tempo de transição

P	Permissividade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Cloreto de polivinila
R1	Corpo de prova gramatura 644 g/m ²
R2	Corpo de prova gramatura 525 g/m ²
R3	Corpo de prova gramatura 385 g/m ²
R4	Corpo de prova gramatura 291 g/m ²
R5	Corpo de prova gramatura 203 g/m ²
R6	Corpo de prova gramatura 156 g/m ²
R7	Corpo de prova gramatura 127 g/m ²
USP	Universidade de São Paulo

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	PROBLEMA	1
1.2	OBJETIVO	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2	GEOSSINTÉTICOS.....	6
a)	<i>Geotêxteis</i>	<i>6</i>
2.3	FILTRAÇÃO.....	12
2.4	COLMATAÇÃO DE GEOTÊXTEIS.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	33
3.1	INTRODUÇÃO.....	33
3.2	MATERIAIS	33
a)	<i>Características dos geotêxteis.</i>	<i>33</i>
b)	<i>Bentonita.....</i>	<i>39</i>
c)	<i>Solo.....</i>	<i>41</i>
d)	<i>Ensaio de filtração</i>	<i>43</i>
3.3	MÉTODO DE REALIZAÇÃO DE ENSAIO	47
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1	INTRODUÇÃO.....	51

4.2	CARACTERÍSTICAS DOS GEOTÊXTEIS UTILIZADOS	51
4.3	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO	65
a)	<i>Água limpa</i>	65
b)	<i>Água com partículas de bentonita em suspensão</i>	66
c)	<i>Água com partículas de solo em suspensão.</i>	74
5	AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO	98
6	CONCLUSÃO E PERSPETIVAS	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 INTRODUÇÃO

Geossintéticos são materiais poliméricos que têm encontrado amplo e crescente uso em várias aplicações da engenharia, graças à sua versatilidade e possibilidades de uso, como em filtração e drenagem, reforço de solos e na composição de barreiras impermeabilizantes, dentre outras. Uma das primeiras aplicações dos geossintéticos refere-se ao seu uso em estruturas de filtração e de drenagem, funções cumpridas com êxito pelos geotêxteis não-tecidos. Essa utilização, consubstanciada pela longa experiência e por muitos estudos experimentais revelaram diversas vantagens e desvantagens dos geotêxteis, em especial, de suas limitações durante o processo de filtração, pois, em certas circunstâncias o geotêxtil pode vir a ficar colmatado, reduzindo a sua permeabilidade.

1.1 Problema

A captação e esgotamento de águas pluviais se constituem num aspecto essencial da drenagem superficial. Em áreas urbanas, sistemas típicos de drenagem incluem sarjetas, bocas de lobo e tubulações enterradas que conduzem a água captada até uma área de deságue, com frequência um canal ou rio da rede de drenagem permanente da área de interesse. Se o dimensionamento hidráulico desses elementos não traz grandes dificuldades ao projetista, fatores externos podem comprometer a funcionalidade e eficiência do sistema. Em especial, o entupimento das bocas de lobo e mesmo de entradas de bueiros nas travessias viárias têm se constituído num sério problema. As recorrentes inundações em São Paulo e outros centros urbanos têm entre suas causas o entupimento das bocas de lobo por sedimento, por lixo e por detritos lançados descontroladamente nas vias públicas.

Dessa forma, soluções que permitem, pelo menos em algumas situações, conter os detritos que ocorrem aos pontos de captação das águas pluviais e a livre passagem do fluxo poderiam ser de grande utilidade na preservação da funcionalidade das estruturas de drenagem e nos trabalhos de manutenção.

1.2 Objetivo

O objetivo deste estudo é estudar o desempenho, em laboratório, de geotêxteis não-tecidos frente à filtração de suspensões de solo em água, tal qual poderia ocorrer por ocasião de enxurradas. Nessa perspectiva, tenta-se verificar qual poderia ser o desempenho desses geotêxteis quando utilizados para compor sistemas de proteção da entrada de estruturas de captação de água, como bocas de lobo e bueiros. O trabalho utiliza um geotêxtil não tecido de fibras curtas, fabricado a partir de poliéster e suspensões contendo bentonita e um solo típico da região de São Carlos, em diferentes concentrações.

1.3 Organização do Trabalho

A seguir descreve-se a estrutura organizacional dos Capítulos deste Trabalho.

No Capítulo 1 faz-se a apresentação do trabalho e seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com breve resumo de conceitos e os tipos e funções dos geossintéticos mais utilizados na engenharia geotécnica, dando-se maior ênfase aos geotêxteis não-tecidos. São apresentados os principais passos a serem seguidos no dimensionamento de obras de proteção de colmatação com geotêxteis.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e as metodologias utilizadas para os principais ensaios executados neste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados para análise de geotêxteis e sedimentos suspensos, bem como os resultados de permeabilidade dos geotêxteis pós-ensaios de reutilização.

No capítulo 5 se apresenta a avaliação dos critérios de retenção para filtros geotêxteis propostos por diversos autores

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e perspectivas da utilização de geotêxteis não-tecidos na filtração de partículas em suspensão.

No capítulo 7 é apresentada a bibliografia utilizada na realização desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Com o desenvolvimento desta pesquisa, pretende-se verificar a funcionalidade de geotêxteis não-tecidos na filtração de enxurradas contendo sedimentos em suspensão. (A Figura 2.1 mostra alguns dispositivos, construídos com geotêxtil, utilizados na proteção de estruturas de drenagem). Sabidamente, as partículas suspensas na água é uma das condições mais desfavoráveis de trabalho dos geotêxteis não-tecidos na função de filtração, fato que pode ser observado na Figura 2.1b, onde o geotêxtil não está permitindo uma vazão adequada, devido à escolha equivocada do tipo de geotêxtil a utilizar naquelas circunstâncias.

Figura 2.1 Estruturas de proteção na entrada de bueiros. a) Estrutura de proteção circular. b) Estrutura de proteção no formato quadrado, apresentando funcionamento ruim. c) Barreira filtrante ao redor do bueiro. d) Barreira filtrante e de proteção em obras civis.

Embora a utilização de geotêxteis em aplicações que envolvem filtração e drenagem seja ampla e consagrada, diversos aspectos acerca do desempenho necessitam serem esclarecidos, principalmente, aqueles que resultam na sua colmatação. Dado que dependendo do entorno no qual é inserido o geotêxtil e também das características hidráulicas e de retenção que ele apresenta, pode ocorrer a sua impregnação por partículas de solo movidas pelo fluxo ou mesmo a deposição de filmes biológicos quando em contato com líquidos com carga orgânica, com comprometimento de seu desempenho. Apresentam-se, na sequência, de acordo com a NBR 12553 (ABNT, 2003), informações gerais sobre geotêxteis e informações específicas acerca da sua funcionalidade quando utilizado em filtração.

2.2 Geossintéticos

É o nome comum dado a produtos de polímeros tanto naturais como sintéticos, como, por exemplo, polipropileno ou poliéster, desenvolvidos pela indústria para serem utilizados em aplicações geotécnicas com a finalidade de separação, filtração, drenagem, reforço e controle de erosão superficial dentre outras NBR 12553 (ABNT 2003), Tabela 2.1.

a) Geotêxteis

Por interessar diretamente a este trabalho a seguir dá-se ênfase aos geotêxteis.

Geotêxteis são mantas permeáveis compostas de fibras ou filamentos que em conjunto apresentam diversas características físico-mecânicas e químico-biológicas formando estruturas de têxtil bidimensionais e cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que em uma obra de interesse geotécnico possa desempenhar diversas funções, NBR 12553 (ABNT, 2003).

Tabela 2.1 Identificação da função habitual para cada tipo de geossintético e as matérias-primas, modificado de KOERNER R.M. (2005).

Tipo de Geossintético (G)	Função Primária						Matéria prima
	Contenção	Drenagem	Erosão	Filtração	Proteção	Reforço	Separação
Geocélula (GL)			✓		✓	✓	Poliétileno (PE)
Geocomposto (GC)	✓	✓		✓		✓	Poliétileno (PE), Polietileno de alta densidade (PEAD)
Geocomposto argiloso (GCL)	✓						Poliâmida (PA) (náilon), Poliéster (PET), Polipropileno (PP)
Geofibras						✓	Poliâmida (PA) (náilon), Poliéster (PET), Polietileno de alta densidade (PEAD)
Geofôrma (GF)							Poliestireno (PS)
Geogrelha (GG)						✓	Poliâmida (PA) (náilon), Policloreto de vinila (PVC), Poliéster (PET), Polietileno (PE), Polipropileno (PP)
Geomembrana (GM)	✓						Policloreto de vinila (PVC), Polietileno (PE), Polietileno de alta densidade (PEAD), Polipropileno (PP)
Georrede (GN)		✓			✓		Policloreto de vinila (PVC), Poliéster (PET), Polipropileno (PP)
Geotêxtil (GT)	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	Poliâmida (PA) (náilon), Poliéster (PET), Polipropileno (PP)
Geotubo (GP)		✓					Policloreto de vinila (PVC), Polietileno de alta densidade (PEAD)

✓* Quando impregnado com material asfáltico.

Os geotêxteis obtêm seus nomes de acordo com a estrutura das fibras que os conformam, e podem-se classificar em dois grandes grupos: os geotêxteis tecidos (Figura 2.2a) conformados por filamentos sintéticos entrelaçados sistematicamente, utilizados comumente para reforço em estruturas de solo; os geotêxteis não-tecidos (Figura 2.2b) são um aglomerado de fibras sintéticas, sem uma ordem preestabelecida, que são unidas por processos físicos, químicos ou processos térmicos. Uma das grandes utilidades dos geotêxteis não-tecidos é na conformação de sistemas de filtração e drenagem.

Figura 2.2 Tipos de geotêxteis. a) Geotêxtil tecido. b) Geotêxtil não tecido.

- Caracterização de geotêxteis

Os geotêxteis são usualmente caracterizados por ensaios de natureza física, mecânica e hidráulica que determinam a qualidade de fabricação.

Os ensaios físicos mais usuais são os de massa por unidade de área (gramatura) e espessura nominal, os quais estão normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas por suas siglas ABNT, NBR 12568 (ABNT, 2003) e NBR 12569 (ABNT, 1992) respectivamente.

Ensaio mecânicos envolvem, com frequência, diferentes formas de ensaios de tração, nos quais se busca a relação entre carregamento e deformações, como o de faixa larga no qual se mede a resistência à tração unidirecional não confinada NBR 12824 (ABNT, 1993). Na Figura 2.3 tem-se um exemplo do resultado do ensaio de tração.

Os ensaios mecânicos também contemplam a resistência à tração de emendas NBR 13134 (ABNT, 1994), puncionamentos NBR 13359 (ABNT, 1995), propagação de rasgos D4533 (ASTM, 1991), fluência NBR 15226 (ABNT, 2005), tração multidirecional e resistência a estouro D3786 (ASTM, 2008).

Figura 2.3 Exemplo do resultado do ensaio de tração em faixa larga de geotêxtil não tecido.

Além dos ensaios de caracterização física e mecânica os geotêxteis são submetidos a ensaios para medida de propriedades hidráulicas. Estes compreendem principalmente a determinação das características de permeabilidade normal ao plano (permissividade) NBR 15223 (ABNT 2005), a capacidade de fluxo no plano (transmissividade) NBR 15225 (ABNT, 2005) e a determinação da abertura de filtração característica NBR 15229 (ABNT, 2005).

O ensaio de permeabilidade normal (Figura 2.4) consiste em fazer passar a água de maneira perpendicular através de um geotêxtil. A permissividade (P) correlaciona o coeficiente de permeabilidade normal k_n (em m/s) e a espessura do geossintético (t_{GT}) como:

$$P = k_n / t_{GT} \quad (s^{-1})$$

Equação 2.1

Este ensaio tem importância na utilização de geotêxteis em drenagem, dado que o sistema está limitado pela permeabilidade quando usado como elemento filtrante (RANKILOR, 1985).

Figura 2.4 Esquema para ensaio de permeabilidade.

O esquema a seguir na Figura 2.5 mostra a determinação da capacidade de fluxo no plano no qual se define o parâmetro de transmissividade (T). A transmissividade relaciona a permeabilidade no plano (k_p) e a espessura do

geossintético medida sob determinada tensão normal de confinamento, e depende do gradiente sob o qual se processa o fluxo.

A transmissividade (T) se expressa pelo produto da permeabilidade no plano pela espessura sob determinada tensão de confinamento como:

$$T = k_p \cdot t_{GT}$$

Equação 2.2

Figura 2.5 Esquema para ensaio de transmissividade.

A abertura de filtração consiste em medir o diâmetro equivalente da maior partícula que pode atravessar o geotêxtil. Existem diferentes ensaios para esta finalidade os quais comumente são o ensaio de peneiramento a seco e ensaio hidrodinâmico.

O peneiramento a seco D4751 (ASTM, 1999) se faz com esferas de vidro de diâmetro conhecido, tal que 5% ou menos atravessem o geotêxtil, obtendo-se a abertura aparente de filtração O_{95d} .

Sobre o peneiramento a seco recaem questionamentos como o efeito da eletricidade estática e peneiramentos sucessivos, os quais devem ter-se em conta para a qualidade dos resultados.

O peneiramento a seco não é comparável com os ensaios hidrodinâmicos já que estes são feitos com amostras de solo submetidas a fluxo de água. As montagens típicas são normatizadas pela NBR 15229 (ABNT, 2005) no qual um fluxo contínuo de água, sob pressão, é lançado sobre uma amostra de solo colocado sobre um corpo de prova do geotêxtil. Este se apoia sobre uma peneira presa a um agitador que impõe movimentos verticais e horizontais ao conjunto, e desta forma se determina a curva granulométrica e a abertura de filtração (Figura 2.6).

Na França foi desenvolvido o ensaio hidrodinâmico normalizado pela G38087 (AFNOR, 1983) com o qual se obtém a curva granulométrica e a abertura de filtração O_{95} . Fisicamente essa abertura representa o maior diâmetro de partícula que pode passar pelo geotêxtil (Figura 2.7). A montagem consiste num aparelho giratório com quatro hastes. Em cada ponta se tem um anel metálico que contém na parte inferior o geotêxtil sobre o qual fica o solo. O conjunto gira e passa por um reservatório de água limpa durante 24 horas. A água adentra no anel carregando as partículas finas, ficando sobre o geotêxtil o material mais grosseiro.

Figura 2.6 Esquema de equipamento de ensaio abertura aparente de filtração na via úmida adaptado de NBR 15229 (ABNT, 2005).

Recobre-se o material que passa, o qual após secagem tem a sua curva de distribuição granulométrica. Desta obtém-se o diâmetro equivalente de partícula, tal que 95% das partículas sejam menores que ele, definindo-se então o O_{95d} designado como a abertura de filtração e representa o menor diâmetro que o geotêxtil pode reter, ou em outras palavras o maior diâmetro de partícula que pode passar pelo geotêxtil (BUENO & VILAR, 2004).

Os ensaios de caracterização hidráulica permitem a escolha do geotêxtil, de acordo com as partículas de solo a ser retidas, evitando o entupimento prematuro do sistema filtro-drenante (BUENO & VIDAL, 2004; KOERNER, 2005; KALINOVICH *et al.*, 2008).

Figura 2.7 a) Esquema ensaio hidrodinâmico. b) Curva granulométrica típica no ensaio de peneiramento hidrodinâmico adaptado de BUENO & VIDAL, (2004).

2.3 Filtração

Dentre as várias funções desempenhadas pelos geotêxteis, duas estão associadas aos primórdios de seu desenvolvimento: a filtração e a drenagem.

A filtração compreende o movimento de líquido através do geotêxtil. Ao mesmo tempo, ao proporcionar livre fluxo, o geotêxtil deve ser capaz de reter o solo por onde a água percola.

Nessas funções, o geotêxtil deve atender a dois requisitos contraditórios: ter uma estrutura suficientemente aberta para permitir o livre fluxo de líquido e uma estrutura suficientemente fechada para permitir a retenção de partículas. Adicionalmente deve haver uma compatibilidade entre o solo e o geotêxtil de forma a que ele não seja colmatado ao longo do tempo, com redução indesejável de permeabilidade.

Entre os tipos de mecanismos fundamentais de filtração definidos em HUTTEN (2007) se tem:

De superfície: a partícula é maior do que os poros e simplesmente não pode passar através do filtro. Partículas, menores do que os diâmetros dos poros passam. Isto se apresenta em materiais donde as aberturas são uniformes em diâmetro.

De profundidade: isto se aplica a filtros e materiais não-tecidos que são relativamente espessos em comparação com o diâmetro do poro, e em que os diâmetros dos poros são bastante variáveis. As partículas penetram nos poros até atingirem um ponto de estrangulamento em que o diâmetro torne-se menor do que a partícula e, neste ponto a partícula fica presa no poro.

De superfície ou bolo (cake): envolve a captura de partículas na superfície (ou perto da superfície) a modo de construção, as partículas se dispõem em uma camada, que participa no processo de filtração, dando uma superfície modificada.

Na função de drenagem, o geotêxtil deve ser capaz de conduzir os líquidos ao longo de seu plano. Assim, o geotêxtil deve apresentar uma permeabilidade compatível com a vazão que se deseja drenar. A propriedade essencial que retrata essa função é a transmissividade (T), produto da condutividade hidráulica (k_p) ao longo do plano e da espessura (t_{GT}) do geotêxtil, cuja determinação foi esquematizada na Figura 2.5. Esta definição é necessária, uma vez que os geotêxteis são compressíveis e têm sua espessura modificada pela ação das tensões normais atuantes em determinado projeto.

Exemplos do uso de geotêxteis em obras geotécnicas relacionadas à drenagem e filtração podem ser vistos na Figura 2.8. Outro exemplo, ocorre nas trincheiras drenantes em rodovias, conforme mostrado na Figura 2.9. O processo de instalação consiste na abertura de uma vala, seguida da colocação do geotêxtil. Em seguida preenche-se a vala com material granular, cuja função será drenar a água do sistema, sendo fechado o geotêxtil e recoberto a trincheira com solo com a finalidade de evitar a entrada de água superficial.

Figura 2.8 Usos destacados de geossintéticos não-tecidos em sistemas de filtração e drenagem adaptado de SATO; YOSHIDA & FUTAKI,. (1986).

Na atualidade, os geotêxteis utilizados em filtração têm a vantagem de menor custo em relação ao uso de materiais convencionais como, por exemplo, os filtros granulares, principalmente devido a sua fácil e prática instalação, além de que as fibras de material sintético, por serem produzidas industrialmente, apresentarem melhor controle de qualidade (RANKILOR, 1985; SATO, YOSHIDA & FUTAKI, 1986; MURTY *et al.*, 1994; PALMEIRA, BEIRIGO & GARDONI, 2010).

Devido as suas qualidades filtro–drenantes os geotêxteis não-tecidos vêm sendo estudados em diversas pesquisas que o propõem como alternativa na filtração da água contaminada com metais pesados e carbono orgânico (MULLIGAN *et al.*, 2009) bem como na eliminação da turbidez na água de chuva (SHUCJMANN,

2010) dando bons resultados em ambos casos, na remoção de turbidez e clareamento da água.

Figura 2.9 a) Instalação de sistema drenante com geotêxtil não tecido, b) Esquema do mecanismo de retenção de solo, modificado de IGS, (2012).

O uso de geotêxteis também tem sido estudado no desempenho em sistemas de drenagem para resíduos sólidos, situação sujeita a colmatção biológica, tópico sobre o qual ainda persistem muitas dúvidas e que continua a ser estudado em relação ao processo de colmatção e alternativas de manutenção. (KOERNER & KOERNER, 1992, KOERNER & KOERNER, 1995, COLMANETE, 2000, JUNQUEIRA et al., 2006, PALMEIRA et al., 2008).

YAMAN et al., (2006) descrevem como a alta densidade de matéria orgânica parece estar associada a uma baixa permeabilidade do sistema filtrante, ressaltando o processo da acumulação de certa quantidade de matéria orgânica nos poros do filtro antes do entupimento e posterior falha hidráulica (Figura 2.10).

Além dos trabalhos mencionados, existem outros que buscam novas aplicações para os geossintéticos, mas no momento são poucos os estudos que tratam de filtração de partículas em suspensão. Este tipo de filtração ocorre quando o líquido percolante possui pequenas partículas sem contato superficial entre si (SILVEIRA, 2005), e é uma condição típica que pode ocorrer com geotêxteis filtrando águas de enxurradas.

Figura 2.10 Modelo bidimensional da projeção do biofilme, modificado de YAMAN et al., (2006)

FARIAS, (2005) utilizou geotêxteis não-tecidos em um sistema para controle da erosão em voçorocas. Geotêxteis não-tecidos foram colocados como barreira para impedir o arraste das partículas de solo durante eventos de chuva. O autor realizou ensaios utilizando um equipamento de grande porte (simulador hidráulico) cujas características permitem passar através de um canal uma grande quantidade de água que contém partículas de solo (Figura 2.11). As condições de filtração durante o ensaio são dadas pelas propriedades hidráulicas do geotêxtil, envolvendo tanto a permissividade como a transmissividade como se ilustra na Figura 2.12. O autor observa que para todos os geotêxteis o desempenho com as amostras virgens é satisfatório, no entanto durante o reúso ficou evidenciada a acumulação de solo na face montante quando o solo possui característica siltosa e/ou argilosa, causando considerável decréscimo do fluxo.

Os geotêxteis com melhor desempenho em relação à passagem da água e retenção de partículas de solo foram os de maior abertura de filtração e menor espessura. Isto indica que os geotêxteis mais leves e mais econômicos, têm um desempenho melhor em relação aos mais pesados e mais caros na hora de reter partículas transportadas pela água de chuva (FARIAS, 2005).

Figura 2.11 Filtragem de partículas em suspensão através de uma manta de geossintéticos não tecido (FARIAS, 2005).

Figura 2.12 Esquema do movimento da água no interior do geotêxtil durante o ensaio de grande porte. (FARIAS, 2005).

Atualmente vêm-se utilizando geotêxteis tecidos na forma de GEOBAGS para filtração, especialmente no caso de resíduos de mineração e tratamento de lodos, onde os materiais são acondicionados nos geobags, sendo expelido o líquido e retido o sólido. MARTINS, (2006) avaliou a funcionalidade deste sistema como satisfatório, onde o autor mostrou a recuperação da água com baixo volume de sedimentos. A Figura 2.13 mostra o processo de utilização de geobags proposto por MARTINS, (2006).

Figura 2.13 a) Processo de enchimento das bolsas penduradas, b) Material filtrado retido na bolsa, modificado de MARTINS, (2006).

A utilização de geossintéticos em filtração também se estende a outros estados da matéria, sendo utilizados, por exemplo, como meios drenantes para gás metano em aterros sanitários, instalações onde a degradação gere gases e outros.

Segundo GARDONI, (1995) os critérios para construção de filtros granulares quando são aplicados em filtros utilizando geotêxteis, podem não ser o ideal para um bom desempenho. Isto leva a criação de critérios que cumpram com maior segurança as necessidades do projeto ao usar geossintéticos. A seleção do geossintético adequado para uso em filtração e drenagem é um processo complexo devido ao número de variáveis envolvidas nos projetos (WILLIAMS & LUNA, 1987),

pois um filtro deve prevenir a excessiva migração de partículas de solo e ao mesmo tempo permitir o fluxo de água sem apresentar conflitos de requisitos já que atua em duas funções aparentemente contrárias (LUETTICH et al., 1992; KOERNER & KOERNER, 1992).

Os critérios de retenção para o projetos com filtros geotêxteis consistem, em geral, em fórmulas empíricas ou semi-empíricas que relacionam o tamanho de partículas do solo (representado, por exemplo, D_{50} ou D_{85}) a ser protegido ao tamanho da abertura de filtração do geotêxtil (representado, por exemplo, pelo tamanho da abertura de filtração, AFNOS, ou pelo tamanho da abertura aparente, AOS, com os valores de O_{95} ou de O_{95d}). A maioria dos critérios de projeto prescreve um intervalo para a relação ou parâmetros relacionados com as propriedades do solo, tais como classificação e tipo de solo (CHRISTOPHER & FISCHER, 1992). Métodos de concepção mais específicos tomam em consideração as condições hidráulicas ou propriedades adicionais do geotêxtil e do solo (LUETTICH et al., 1992). Extensas revisões de critérios de retenção geotêxteis podem ser encontrados na literatura (ver, por exemplo, PALMEIRA & FANNIN, 2002).

Para que as obras civis que adotam os geossintéticos na filtração e drenagem cumpram seu propósito com bom desempenho deve ter-se em conta no projeto critérios descritos em trabalhos como os de LUETTICH et al., (1992) e de CHRISTOPHER & FISCHER, (1992).

LUETTICH et al., (1992) fazem uma síntese dos critérios de projeto de geotêxteis aplicados em filtração. Além das clássicas abordagens de retenção e de permeabilidade que um filtro deve apresentar, os autores ressaltam a importância de um critério para evitar a colmatação e garantir que o geotêxtil tenha um significativo mínimo de vazios. Dessa forma, se as partículas de solo bloquearem ou colmatarem alguns desses vazios, a permeabilidade do geotêxtil não seria drasticamente reduzida. Dois pontos adicionais são ainda ressaltados, quais sejam o critério de sobrevivência aos rigores da instalação e o critério de durabilidade que garante que

o geotêxtil seja resistente às ações adversas provocadas, por exemplo, pela exposição a raios ultravioletas ou pelo contato com substâncias químicas.

O método de projeto proposto por LUETTICH et al., (1992) consiste de nove etapas, a saber:

1. Definir os requisitos de filtro desejáveis para a aplicação pretendida.
2. Definir as condições de contorno do problema, controlando as condições do solo no redor do geotêxtil. Altas pressões de confinamento poderiam levar à intrusão de partículas no interior do filtro diminuindo a capacidade de drenagem. Por sua vez, solos muito compactados têm menores velocidades de fluxo por conta da redução da condutividade hidráulica. Os parâmetros anteriores ajudam a definir as condições de fluxo que atuam no redor do filtro, que pode ser um fluxo no estado estacionário ou dinâmico. A definição dessas condições é importante dado que os critérios de retenção para cada condição são diferentes, como se mostrará em seguida.
3. Determinar os requisitos de retenção do geotêxtil: O geotêxtil deve ser capaz de reter um solo quando se conhecem as propriedades e características deste, como são: os limites de Atterberg, a distribuição e o tamanho das partículas, as condições de densidade do solo, entre outros. Então se podem aplicar parâmetros dependendo do tipo de fluxo presente.

Luetlich et al, (1992) apresentaram critérios de retenção de solo na forma de fluxogramas, para projetos com condições de fluxo de estado estacionário ou transiente. Nos fluxogramas, os solos a serem retidos são classificados de acordo com quantidade de material fino, dentre outras características. Os fluxogramas se baseiam nas propriedades do solo e nas condições de fluxo a que o filtro será submetido. As propriedades devem ser obtidas a partir de ensaios de laboratório, como, por exemplo, a curva de distribuição granulométrica, limite de Atterberg, potencial de dispersão e condições de

densidade do solo (específico para solos granulares), cujos resultados são usados para cálculos de parâmetros específicos, como C_u , C_c e C'_u , que governam o critério de retenção (LUETTICH et al., 1992). Os citados fluxogramas se encontram nas Figuras 2.14 e 2.15.

Figura 2.14 Critérios de retenção do solo em condições de fluxo no estado estacionário, modificado de LUETTICH et al., (1992)

Figura 2.15 Critérios de retenção do solo de condições de fluxo dinâmico, LUETTICH et al., (1992)

4. Determinar os requisitos de permeabilidade do geotêxtil. A condutividade hidráulica dos geotêxteis deve ser maior que a do solo a ser retido. Para definir o critério de permeabilidade dos geotêxteis é necessário inicialmente determinar a condutividade hidráulica do solo a ser protegido. LUETTICH et al., (1992) descrevem dois métodos para determinação da permeabilidade do solo sendo:

Em aplicações críticas como barragens de terra os autores recomendam realizar ensaios de laboratório com amostras representativas das condições de campo seguindo as recomendações da norma D 5084 ASTM (2000) ou similares. Para casos não críticos os autores utilizam as características dos diâmetros das partículas como por exemplo D15s.

Posteriormente deve-se determinar o gradiente hidráulico de aplicação (i_s) do filtro, sendo este dependente da aplicação do mesmo. Por fim os autores determinam a permeabilidade mínima permitida para o geotêxtil (k_{GT}) baseado na permeabilidade do solo e no gradiente hidráulico do mesmo. A Equação 2.3 mostra o valor de k_{GT} mínimo.

Solicitação normal

$$k_{GT} > i_s \cdot k_s$$

Equação 2.3

Para condições mais severas de trabalhos CHRISTOPHER & FISHER, (1992) recomendam uma permeabilidade mínima permitida da ordem de dez vezes maior que em condições normais, conforme a Equação 2.4 a seguir.

Solicitação severa

$$10 \cdot k_{GT} > i_s \cdot k_s$$

Equação 2.4

5. Determinar os requisitos anti-colmatação do geotêxtil. Talvez este seja o critério mais importante, pois deve garantir a funcionalidade do filtro em longo prazo. LUETTICH et al., (1992) recomendam algumas maneiras de satisfazer este

requisito como a utilização de geotêxteis com grandes aberturas (O_{95}) que respeitam o critério de retenção. No caso de geotêxteis não-tecidos os autores recomendam o uso de geotêxteis com alta porosidade, enquanto para geotêxteis tecidos é recomendável que a porcentagem de área aberta seja maior. Para adicionalmente minimizar o risco de colmatação, testes de desempenho devem ser realizados para verificar o comportamento do geotêxtil frente a um dado solo. CHRISTOPHER & FISHER, (1992) discutem diversos aspectos da filtração com geotêxteis dentre eles os problemas de colmatação. Após destacar a utilidade de ensaios específicos para tal finalidade, os autores sintetizam alguns critérios anti-colmatação e que são apresentados na Tabela 2.2.

6. Determinar os requisitos de sobrevivência à instalação.
7. Determinar os requisitos de durabilidade.
8. Efetuar considerações específicas para o problema a tratar
9. Selecionar o geotêxtil para aplicar como filtro.

Tabela 2.2 Critérios colmatação modificado de CHRISTOPHER & FISCHER, (1992).

A. Crítico / aplicações severas*

Testes de solo / ensaios de filtração
(CALHOUN, 1972; HALIBURTON et al, 1982; HALIBURTON & WOOD, 1982; GIROUD, 1982; CARROLL, 1983; CHRISTOPHER & HOLTZ, 1985, 1989; KOERNER, 1990)

B. Menos críticos / aplicações pouco severas

1. Testes de solo / ensaios de filtração

2. Para solos que contem finos. Alternativas do Mínimo Tamanho de Poros, especialmente em solos que tem matriz não continua.

(a) $O_{95} > 3D_{15}$ para $C_u > 3$
(Christopher & Holtz, 1985 e modificado em 1989)

(b) $O_{95} > 4D_{15}$
(Comité Francês de Geotêxteis, 1986)

(c) $O_{15} / D_{15} > 0,8$ até 1,2

$O_{50} / D_{50} > 0,2$ até 1
(Fischer et al., 1990)

3. Para $C_u < 3$, Deve ser especificada a máxima abertura de filtração para o critério de retenção

4. Qualificação da área de abertura aparente.

Geotêxteis tecidos: porcentagem de área aberta: $> 4\%$ até 6%
(Calhoun, 1972; Koerner, 1990)

Geotêxteis não tecidos: Porosidade $> 30\%$ até 40%
(Christopher & Holtz, 1985; Koerner, 1990)

*Os ensaios de filtração são provas de rendimento que não podem ser feitas pelo fabricante dado que dependem do solo e das condições específicas do projeto. As provas a realizar deverão ser especificadas a empresa ou seus representantes.

2.4 Colmatação de geotêxteis

Um dos maiores problemas dos geotêxteis não-tecidos utilizados nos sistemas de filtração e drenagem, tem sido a facilidade com que estes podem ficar colmatados.

A colmatação é definida como a perda de carga hidráulica devido à obstrução física, tal que o fluxo residual resultante é inferior ao caudal mínimo para o qual foi projetado o sistema filtro drenante (SANSONE & KOERNER, 1992).

A colmatação física geralmente acontece na interface solo-filtro onde ocorre o deslocamento de partículas finas que são levadas pela água.

Autores como SAXENA & HSU, (1986); WILLIAMS et al., (1989); PALMEIRA & GARDONI, (2000); GIROUD, (2004); SILVEIRA, (2005); LEE & BOURDEAU, (2006); GIROUD, (2010) coincidem em que os três principais mecanismos responsáveis da colmatção física em filtros geotêxteis se devem a: colmatção interna, cegamento e bloqueamento.

Na Figura 2.16 ilustra-se o processo de colmatção interna que é o mais antigo mecanismo de colmatção física conhecido. Ocorre quando partículas de solo ficam retidas no interior do geotêxtil ocupando a maior fração dos poros, reduzindo a permeabilidade do sistema (PALMEIRA & GARDONI, 2000).

Figura 2.16 Mecanismo de colmatção interna em geotêxteis modificado de PALMEIRA & GARDONI (2000).

Trabalhos de PALMEIRA & GARDONI, (2000), PALMEIRA et al., (2005) realizaram exumação de geotêxteis utilizados em sistemas de drenagem rodoviários e observaram grumos de solo dispostos no interior do geotêxtil (Figura 2.17 a). Também foram percebidas no interior dos geotêxteis partículas que apresentavam diâmetro maior que o esperado, dada à abertura de filtração do geotêxtil registrada nos ensaios de caracterização (Figura 2.17 b).

Segundo BEIRIGO, (2005) e PALMEIRA, BEIRIGO & GARDONI, (2010) os tamanhos das partículas que ficam retidas no interior do geotêxtil, dependem da

força e das condições de fluxo presentes na interface filtro-drenante, além das dimensões de abertura de filtração do geotêxtil.

Figura 2.17 a) Grumos de solo no geotêxtil (PALMEIRA & GARDONI, 2000), b) Partículas de solo com tamanhos maiores que o especificado pela porometria do geotêxtil (PALMEIRA et al., 2005).

Ao estudar o fenômeno de colmatção é importante ter em conta a concentração atuante das partículas transportadas em solução, mais só está, não pode ser usada ao estimar o grau de obstrução física que tem um geotêxtil. Devido a que para uma determinada concentração de partículas, existem diferentes tamanhos os quais podem causar diferenças significativas na obstrução. Portanto o tamanho das partículas além do número total delas deve ser considerado (XIAO & REDDI, 2000).

Na Figura 2.18 é ilustrado o esquema para colmatção por cegamento. Neste caso, as partículas acumulam-se acima do geotêxtil formando uma camada fina (chamada de “cake”) que impede o livre fluxo atuando a maneira de um pré-filtro no contato solo-geotêxtil.

O cegamento ocorre por arraste de partículas finas de solos que são naturalmente instáveis e ainda pela deposição de partículas que se encontram suspensas no líquido a ser filtrado. Estas situações promovem a deposição de partículas sobre a manta geotêxtil, reduzindo a sua permeabilidade e mesmo

formando filmes de partículas muito finas que apresentam aberturas de filtração inferiores à do próprio geotêxtil (Vidal, 1990; Farias, 1999).

Figura 2.18 Mecanismo de colmatação física devido à cegamento modificado de PALMEIRA & GARDONI, (2000).

No caso de bloqueamento (Figura 2.19) a movimentação gradual e posterior acomodação de partículas de solo que apresentam diâmetro suficiente para obstruir individualmente cada abertura do geotêxtil, promovem a oclusão dos poros, alterando o valor da condutividade hidráulica proporcionada originalmente (CHRISTOPHER & FISCHER, 1992; FAURE et al., 2006).

O mecanismo de colmatação física em geotêxteis ocorre tanto em solos arenosos quanto em argilosos. Em solos arenosos acontece a aglutinação de partículas de solo ao redor das fibras geotêxteis, no entanto para os solos argilosos as partículas ficam dentro dos poros do filtro em forma de uma pasta dispersa que entra em contato direto com o solo a ser filtrado (GARDONI, 1995).

Figura 2.19 Mecanismo de colmatação física por bloqueamento modificado de PALMEIRA & GARDONI, (2000)

Um dos mecanismos de colmatação física pouco estudada é aquele que faz referência às partículas de solo em suspensão. Autores como NAREJO & KOERNER, (1992) descrevem esta condição como a mais desfavorável, ao afetar a vida útil dos sistemas filtro-drenantes. Devido a isto durante a instalação de filtros geotêxteis, as recomendações técnicas tem especial interesse em que exista bom contato da manta geotêxtil e o solo, evitando assim a formação de fluxos que carreguem partículas suspensas (AGUIAR & VERTEMATTI, 2004)

Quando se fala de partículas em suspensão, se tem a ideia que estas apresentam tamanhos muito pequenos que podem se manter sem sedimentar por longos períodos de tempo em um fluido em repouso.

Trabalhos como os de VIVIANI, (1992); GIROUD, (2005); FARIAS, (2005) expõem o processo que leva a colmatação devido a partículas em suspensão, explicam que estas seguem a direção do fluxo, e como algumas vão ficando na superfície do geotêxtil formando uma camada de solo (Figura 2.20). A quantidade de partículas de solo que atravessa pelo geotêxtil tende a diminuir em função da formação desta fina camada, funcionando assim como um filtro natural de material, que obstrui a passagem livre da água e compromete o desempenho como filtro.

Figura 2.20 Esquema do mecanismo de filtração para partículas em suspensão adaptado de VIVIANI, (1992).

No trabalho de FAURE et al., (2006) se intenta dar explicação ao significado físico ao processo que leva ao entupimento. Simula-se a acumulação de partículas finas no interior de um filtro geotêxtil, ao combinar resultados de testes de colmatação com o modelo empírico proposto por LE COQ'S, (1996), no qual a acumulação de partículas se dispõe em paralelo, gerando acumulação em series que ficam nos caminhos sinuosos do interior do geotêxtil. Com isto o autor intenta estimar a máxima quantidade de partículas que poderiam ser injetadas no geotêxtil antes que ocorra o entupimento (Figura 2.21).

No modelo descrito as partículas finas podem atravessar, no entanto quando sua concentração é aumentada tendem a se organizar em series de camadas, o que leva a uma acumulação rápida que obstruí a livre passagens dada a redução da área aberta para o fluxo, o que gera a diminuição do valor da carga hidráulica até níveis prévios de colmatação.

É importante referir que falar de "completo entupimento" é um erro, dado que os sistemas sempre mantém alguma permeabilidade nominal, embora talvez demasiado baixo para as necessidades específicas do projeto (SANSONE; KOERNER, 1992).

Figura 2.21 Modelo de LE COQ`S, (1996) em FAURE et al., (2006) Acomodamento em paralelo e em serie das partículas no interior do geotêxtil gerando entupimento.

Ensaio realizado por WU et al., (2006) com a finalidade de conhecer melhor os mecanismos que levam a colmatação, foram feitos utilizando esferas de aço, mostrando resultados que quando se tem 100% de abertura de livre drenagem não se gera entupimento, o que leva a pensar que os resultados experimentais com esferas de aço subestimam o potencial de colmatação do sistema de filtração.

A maioria das teorias relativas aos mecanismos que levam a colmatação de um meio filtrante que utiliza geotêxteis não-tecidos, baseiam-se em um efeito de filtração de rastreio simples ou peneiração onde a partícula é simplesmente maior do que o buraco no meio e não pode passar. Outros mecanismos de captura de partículas de diâmetros muito menores que a abertura de filtração do geotêxtil são expostos por HUTTEM, (2007) os quais são:

Impacto inercial: este ocorre quando a inércia das partículas é tão alta que tem suficiente impulso para sair da linha do fluxo e impactar a fibra.

Interceptação: ocorre quando uma partícula não tem a inércia suficiente para sair da linha de fluxo, no entanto se aproxima o suficiente nas fibras de modo que as

forças naturais vão anexar a partícula na fibra. A definição matemática feita por LASTOW & PODGORSKI, 1998, diz que “uma partícula é interceptada quando a distância entre o centro de massa da partícula para a superfície da fibra é igual ou menor do que o raio da partícula”.

Difusão: é baseada no movimento Browniano (zig-zag) de partículas muito pequenas ($< 0,5 \mu$). Este movimento aleatório e probabilístico a partir da racionalização faria com que uma partícula que vira possivelmente fique envolvida numa fibra.

Atração eletrostática: baseia-se numa carga elétrica ou eletrostática sobre a partícula e/ou das fibras que irá forçar a partícula a ser desviada de linha do fluxo e ser atraídas para a fibra.

Na Figura 2.22 se apresenta o esquema que ilustra alguns mecanismos de captura de partículas em suspensão.

Os processos que produzem a colmatação são indesejáveis em qualquer obra geotécnica por isso pesquisas de métodos que ajudem a combater seus efeitos negativos são realizadas continuamente. Gerando critérios chamados de “anti-entupimento” que pretendem garantir um número significativo de aberturas ou caminhos para a água de modo que, ao produzirem bloqueios em algumas linhas de fluxo, outras fiquem livres evitando a caída excessiva do fluxo (LUETTICH et al, 1992).

XIAO & REDDI, (2000) compararam a colmatação por partículas finas em geotêxteis não-tecidos agulhados e filtros de areia. Os resultados mostraram que a velocidade crítica de fluxo que determina a deposição de partículas é muito menor em geotêxteis do que na areia e que para a mesma concentração o geotêxtil fornece uma melhor filtração, sem colmatação excessiva. As concentrações de partículas utilizadas, entretanto, foram bastante baixas, de 0,5 e 1,0 g/L.

Figura 2.22 Mecanismos de captura de partículas, modificado de HUTTEM, (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

3.1 Introdução

As etapas de trabalho experimental desta pesquisa encontram-se esquematizadas na Figura 3.1.

Foram realizados ensaios de laboratório para a caracterização de geossintéticos e do solo. Posteriormente foram feitos ensaios de filtração de partículas suspensas de bentonita e solo, com o objetivo de avaliar a interação que estas têm com os geotêxteis não-tecidos.

Figura 3.1 Esquema geral dos trabalhos realizados.

3.2 Materiais

a) Características dos geotêxteis.

Para a realização dos ensaios de caracterização dos geotêxteis foram necessários os materiais e equipamentos a seguir descritos:

Gramatura: esta é a relação da massa por unidade de área, acordo com a norma NBR 12568 (ABNT, 2003), se calcula a partir da geometria retangular o valor médio de dez determinações expreso em g/m^2 na qual se utiliza a balança analítica de precisão de 0,1 g. (

- Figura 3.2).

Figura 3.2 Equipamento de medição utilizado durante os ensaios, balança analítica.

- Espessura: se expressa em milímetros e é determinada registrando-se a distância interna entre duas placas rígidas, que comprimem o corpo de prova sob determinada tensão vertical, de acordo com a norma NBR 12569 (ABNT, 1992) (Figura 3.3).

Figura 3.3 Equipamento utilizado na medição da Espessura de filtração em todos os corpos de prova geotêxtil.

- Permissividade: segundo a norma NBR 15223 (ABNT, 2005) é a velocidade com que a água passa perpendicularmente através de uma espessura determinada de geotêxtil, desta forma para cada espessura o material apresenta uma condutividade hidráulica diferente. Dado que as espessuras dos corpos de prova tem variação milimétrica o equipamento deve oferecer boa precisão de medida (Figura 3.4).

Figura 3.4 Equipamento utilizado na medição da Permeabilidade normal em todos os corpos de prova geotêxtil.

- Transmissividade: os geotêxteis não-tecidos permitem a passagem de fluidos ao longo do seu corpo, à medida que o geossintético se comprime a vazão no plano decresce. O equipamento utilizado se ilustra na Figura 3.5, e as especificações do ensaio são descritas na norma NBR 15225 (ABNT, 2005).
- Abertura aparente – $O_{95,d}$: é um ensaio equivalente ao da abertura de filtração, porém conduzido com peneiramento em seco de esferas de vidro, segundo a norma D4751 (ASTM, 1999) Figura 3.6.
- Abertura de filtração – O_{95} , este ensaio se faz por peneiramento úmido utilizando a norma francesa, G38087 (AFNOR, 1983). Figura 3.7.

Figura 3.5 Equipamento utilizado na medição da Transmissividade no plano em todos os corpos de prova geotêxtil.

Figura 3.6 Equipamento utilizado na medição da Abertura aparente de filtração em todos os corpos de prova geotêxtil.

Os geotêxteis usados são do tipo não-tecido de fibra curta agulhados, de poliéster. Para realizar os ensaios de filtração se utilizaram sete gramaturas, as quais são referidas de R1 a R7, sendo R1 (644 g/m^2), R2 (525 g/m^2), R3 (385 g/m^2) R4 (291 g/m^2), R5 (203 g/m^2), R6 (156 g/m^2) e R7 (127 g/m^2).

Para as análises dos corpos de prova antes e após a filtração, foram tiradas fotografias na lente de aumento Olympus Mic-D Figura 3.8. Esta lente funciona gerando uma imagem digital na tela do computador e permite alcançar ampliações de até 255x. Foi utilizada para verificar e fotografar as superfícies dos geotêxteis, bem como alguns cortes realizados nos corpos de prova.

Figura 3.7 Equipamento que simula a forma da roda gigante, utilizado segundo a norma G38087 (AFNOR, 1983).

Figura 3.8 Microscópio digital MIC-D fabricado pela OLYMPUS, consegue ampliações de até 255x.

A Figura 3.9 mostra microfotografias da estrutura dos diferentes geotêxteis onde se podem apreciar as fibras cortadas e os vazios. Estes aparecem nas fotos por meio dos locais de maior luminosidade, onde os feixes de luz atravessam facilmente o geotêxtil. Assim, nota-se que os vazios tendem a aumentar em tamanho com a diminuição da gramatura.

Figura 3.9 Microfotografias das diversas gramaturas. R1 644 g/m^2 ; R2 525 g/m^2 ; R3 385 g/m^2 ; R4 291 g/m^2 ; R5 203 g/m^2 ; R6 156 g/m^2 ; R7 127 g/m^2 .

b) Bentonita

A bentonita usada nos ensaios na concentração de 5 g/L se apresenta em pó, de cor marrom claro, composição sódica (Na) e propriedades altamente expansivas. (Figura 3.10).

Figura 3.10 Bentonita sódica em pó utilizada nos ensaios.

A bentonita é uma argila muito fina (coloidal) que deve seu nome da mineração encontrada no Fort Benton, Estados Unidos. A bentonita sódica é um material altamente expansivo que aumenta grandemente seu volume em contato com a água. Seu principal uso geotécnico está na composição de lamas de perfuração e de estabilização construção de barreiras de baixa permeabilidade.

Para sua classificação se tem a curva de distribuição granulométrica conforme NBR 6502 (ABNT, 1995) (Figura 3.11); a massa específica dos sólidos NBR 6508 (ABNT, 1984); e os limites de consistência: limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984); limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984), mostrados de maneira resumida na Tabela 3.1. Estes resultados permitem enquadrar a bentonita de acordo

com o sistema unificado de classificação de solo como uma argila de alta plasticidade CH.

Figura 3.11 Curva granulométrica da bentonita utilizada nos ensaios.

LEITE et al., (2008) caracterizam a bentonita sódica Brasgel, distribuída pela empresa Bentonit União Nordeste por meio de análises de difração de raios x, e os resultados obtidos se apresentam na Tabela 3.2

Tabela 3.1 Propriedades da bentonita

PROPRIEDADES	VALORES
Teor de silte	30%
Teor de argila	70%
Limite de liquidez	430%
Limite de plasticidade	58%
Índice de plasticidade	372%
Classificação SUCS	CH

Tabela 3.2 Análise química da bentonita oriunda da Bentonit União Nordeste. Modificado de LEITE et al., (2008)

Componentes	(%)
Perda ao rubro	12,62
SiO ₂	57,40
Resíduos insolúveis	1,35
Fe ₂ O ₃	4,07
Al ₂ O ₃	21,9
CaO	0,56
MgO	2,00
Na ₂ O	0,80
K ₂ O	0,11

A escolha da bentonita para este estudo recaiu no fato de que suas maiores partículas são menores que as aberturas de filtração dos geotêxteis utilizados no estudo. Assim, seria de se esperar que essas partículas tenderiam a atravessar os geotêxteis, embora fosse facilmente presumível que outros efeitos, como cargas de superfície elevadas, tendessem a complicar esse panorama.

c) Solo

O solo utilizado nas concentrações de 20 g/L, 10g/L e 5g/L foi coletado na cidade de São Carlos, Estado de São Paulo, no CAMPUS II da Escola de Engenharia de São Carlos atrás do edifício do Departamento de Aeronáutica. Para sua classificação se tem a curva de distribuição granulométrica conforme NBR 6502 (ABNT, 1995) (Figura 3.12); a massa específica dos sólidos NBR 6508 (ABNT, 1984); e os limites de consistência: limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984); limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984), mostrados de maneira resumida na Tabela

3.3. Estes resultados permitem enquadrar o solo de acordo com o sistema unificado de classificação de solo como uma AREIA ARGILOSA (SC).

Figura 3.12 Curva granulométrica do solo do Campus II.

Tabela 3.3 Características do solo utilizado na pesquisa.

PROPRIEDADES	VALORES
Teor de areia	67,3%
Teor de silte	5,2%
Teor de argila	27,5%
Limite de liquidez	32%
Limite de plasticidade	15%
Índice de plasticidade	17%
Classificação SUCS	SC

d) Ensaio de filtração

Os equipamentos utilizados para os ensaios de filtração e os procedimentos são descritos a seguir:

- Reservatório.

Durante os ensaios de filtração usou-se um reservatório de polietileno com uma capacidade de 150 litros; adequado com sistema para entrada da água e outro para saída da mistura da água e as partículas suspensas de bentonita e solo utilizada nos ensaios (Figura 3.13).

Figura 3.13 Reservatório usado durante o ensaio, capacidade 150 litros.

- Recipientes metálicos

Para a realização dos diferentes ensaios de filtração foram usados recipientes metálicos para fixar os corpos de prova a serem ensaiados (Figura 3.14). Estes recipientes são os mesmos usados nos ensaios de abertura de filtração hidrodinâmico da norma G38087 AFNOR (1983), onde é posicionado o geotêxtil.

Neste ponto cabe ressaltar que a escolha por esta opção baseou-se na disponibilidade de equipamento e facilidade de execução do ensaio. Deve-se, portanto, destacar que o objetivo é estudar a filtração e colmatação dos geotêxteis e não simular os dispositivos representados na Fig. 2.1, onde o fluxo se dá, preferencialmente, através de um plano vertical, à semelhança do que ocorre nas clássicas *silt fences* (Koerner, 2005).

Figura 3.14 Recipientes metálicos e corpo de prova fixado pronto para ensaio.

- Coletores plásticos

Coletores plásticos graduados com capacidade de 2000 ml foram usados na coleta da água que atravessa o corpo de prova, durante os intervalos das leituras, para o controle das vazões (Figura 3.15).

Figura 3.15 Potes plásticos utilizados na coleta de água filtrada, capacidade 2000 ml.

- Funil

Construiu-se um funil com geomembrana lisa de polietileno de alta densidade (PEAD), para direcionar a água que atravessa o geotêxtil para os potes plásticos (Figura 3.16).

Figura 3.16 Funil acoplado na base do anel metálico.

- Sistema de agitação de partículas suspensas

Para manter as partículas suspensas durante a realização dos ensaios, desenvolveu-se um dispositivo que agita a mistura por meio de ar comprimido. Uma mangueira com furos em toda a sua extensão era abastecida com ar comprimido e localizada no fundo do reservatório promovendo a agitação contínua Figura 3.17.

É de importância ressaltar que a fração grossa correspondente aos tamanhos das areias fica depositada no fundo do reservatório dado seu peso, mesmo com o sistema de agitação ligado.

Figura 3.17 Dispositivo de agitação das partículas dissolvidas na água esquerda. Ar comprimido gerando agitação direita.

- Água utilizada

A água utilizada durante a execução dos ensaios de filtração é água fornecida pela rede pública.

Um esquema geral do equipamento é mostrado na Figura 3.18

Figura 3.18 Equipamento utilizado nos ensaios de filtração. a) Reservatório com a mistura água solo. b) Entrada de ar comprimido para o dispositivo de agitação. c) Lugar de fixação dos corpos de prova. d) Saída da água percolada.

3.3 Método de realização de ensaio

A seguir são descritas as sequências de preparação dos ensaios de filtração e os procedimentos adotados durante e após a sua execução.

- Execução dos ensaios de filtração

Primeiramente foram executados ensaios, em todos os geotêxteis virgens, com água limpa a fim de se ter o comportamento sem elementos que provocassem a colmatção e verificar se alguma alteração poderia ocorrer só com a passagem de água.

Para os ensaios de filtração utilizou-se um reservatório de 150 litros que foi cheio até sua capacidade máxima com água da rede pública, à qual se adicionou solo na quantidade desejada para a mistura e também todos os acessórios necessários para manter as partículas finas em suspensão durante os ensaios de filtração.

A suspensão contendo bentonita foi preparada deixando-se primeiramente a bentonita hidratar por 24 horas Figura 3.19.

Figura 3.19 Bentonita após de 24 horas de estabilização 10 g/L.

Decorridas 24 horas dá-se início ao sistema de agitação por 10 minutos, para homogeneização e depois disto se dá início ao ensaio.

Na preparação dos ensaios de filtração com solo típico, este foi secado ao ar, destorroado e peneirado na malha nº 10 (abertura = 2 mm). O material que passa foi posto em sacos plásticos mantendo sua umidade, depois se fez o procedimento semelhante ao da bentonita, para todas as concentrações utilizadas no solo (20, 10 e 5 g/L).

Os corpos de prova de geossintéticos foram preparados seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 12593 (ABNT, 1992). Na montagem nos recipientes metálicos, uma armação metálica proporciona suporte ao geotêxtil para minimizar o embarrigamento (Figura 3.20).

Figura 3.20 Corpo de prova disposto na base do anel metálico.

De modo a garantir que o fluxo da água passe exclusivamente através do geotêxtil durante a execução do ensaio, executava-se uma completa impermeabilização das bordas do anel com ajuda de um anel de borracha e todo o conjunto é preso com parafusos.

Com o sistema de agitação mantendo as partículas finas suspensas, dá-se início ao ensaio, iniciando o fluxo e o cronômetro no mesmo instante. Fez-se a coleta da água filtrada em intervalos de 10 segundos no primeiro minuto, a cada 20 segundos no segundo minuto e a cada 30 segundos no terceiro minuto. A partir do quarto minuto de ensaio a leitura se fez a cada minuto até completar 20 minutos, que é o tempo durante o qual se conduz o ensaio.

- Ensaios de filtração após da secagem dos corpos de prova já ensaiados.

Alguns geotêxteis, após o primeiro ciclo de filtração, foram ensaiados novamente para simular períodos de seca entre intervalos chuvosos.

Nestes casos deixou-se o geotêxtil secar ao ar (Figura 3.21), após a secagem, as amostras de geotêxtil foram montadas novamente para realizar mais uma vez o ensaio.

Figura 3.21 Corpos de prova secados ao ar.

Os resultados do primeiro ciclo foram identificados por F1 e os do segundo, por F2. Em alguns casos, o procedimento foi repetido mais uma vez, decifrando-se os resultados por F3.

Os corpos de prova após ensaio e secagem ao ar foram analisados com lente de aumento tomando-se fotos da disposição das partículas na superfície e também de cortes transversais para ver a disposição de partículas no interior dos corpos de prova.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da etapa experimental desta pesquisa, os quais são organizados em três tópicos: 1) Resultados obtidos na avaliação da filtração dos geotêxteis com água limpa; 2) Resultados da filtração de suspensões água - bentonita sódica; 3) Resultados de filtração de suspensões de água e um solo típico da região de São Carlos – SP.

4.2 Características dos geotêxteis utilizados

Os geotêxteis utilizados neste trabalho foram fornecidos por um único fabricante (RENNER), são de poliéster não tecido, com fibras curtas e diferentes gramaturas. Na identificação das amostras ensaiadas empregou-se a nomenclatura R1 a R7, em função da gramatura do geotêxtil. A caracterização física das amostras de geotêxtil não tecido, quanto à gramatura e espessura é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Características físicas dos geotêxteis não-tecidos.

		AMOSTRAS						
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Característica	unidades							
GRAMATURA	g/m ²	644	525	385	291	203	156	127
N	-	14	14	14	14	14	14	14
CV	(%)	5,0	6,6	6,1	8,1	6,1	8,3	9,2
ESPESSURA	mm	4,08	3,40	3,00	2,38	1,94	1,92	1,86
N	-	11	11	11	11	11	11	11
CV	(%)	3,8	7,1	5,8	5,6	5,7	9,7	4,4

N = Número de corpos de prova

CV = Coeficiente de variação

Na Tabela 4.2 são apresentadas as propriedades hidráulicas dos geotêxteis, a saber: a permissividade, a transmissividade; os tamanhos de abertura aparente do

geotêxtil (AOS por suas siglas em inglês), de acordo com a norma D4751 ASTM (1999) e, também, de acordo com a norma G38087 AFNOR (1983).

Tabela 4.2 Propriedades hidráulicas dos geotêxteis.

		AMOSTRAS						
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Parâmetros	unidades							
PERMISSIVIDADE	s^{-1}	0,86	0,71	1,36	1,4	2,78	2,48	3,33
TRANSMISSIVIDADE	m^2/s	2,3E-05	1,5E-05	1,1E-05	9,4E-06	5,5E-06	5,1E-06	4,0E-06
ABERT. FILTRAÇÃO (ASTM)	mm	0,053	0,053	0,053	0,061	0,120	0,130	0,140
ABERT. FILTRAÇÃO (AFNOR)	mm	0,083	0,070	0,075	0,087	0,107	0,127	0,140

Utilizando os resultados obtidos dos ensaios de caracterização física e hidráulica dos geotêxteis foram feitos gráficos que buscam encontrar possíveis correlações entre as propriedades físicas e hidráulicas (gramatura, permissividade, transmissividade, entre outras). A Figura 4.1 relaciona a espessura (t) e correspondente gramatura (G) dos geotêxteis estudados (R1: 644 g/m²; R2: 525 g/m²; R3: 385 g/m²; R4: 291 g/m²; R5: 203 g/m²; R6 156 g/m² e R7: 127 g/m²).

Figura 4.1 Relação entre espessura (t_{GT}) e gramatura (G) dos geotêxteis ensaiados.

Era de esperar que a relação entre a espessura e a gramatura ocorresse de forma linear pela origem, no entanto os dados experimentais não apresentam ajuste,

devido aparentemente a que as gramaturas menores R5 (203 g/m²), R6 (156 g/m²) e R7 (127 g/m²) apresentam pouca variação na espessura. A relação que apresenta um bom ajuste dos dados experimentais é dada por: $G = 224,11t_{GT}^2 + 261,68$ com $R^2 = 0,98$ onde t_{GT} deve ser expresso em **mm**, resultando **G** em **g/m²**.

A Figura 4.2 relaciona gramatura (G) e transmissividade (T) onde, os dados podem ser representados por uma relação linear pela origem, mostrando que com o aumento da gramatura aumenta também a transmissividade. Os dados experimentais podem ser expressos com a seguinte equação: $T = 3 \times 10^{-8}G$ com $R^2 = 0,97$ onde **G** deve ser expresso em **g/m²**, resultando **T** em **m²/s**.

Figura 4.2 Relação entre gramatura (G) e transmissividade (T) dos geotêxteis ensaiados.

A Figura 4.3 relaciona a espessura (t_{GT}) e a correspondente transmissividade (T) dos geotêxteis estudados mostrando novamente uma relação linear que não passa pela origem, apresentando similitude com o visto na correlação espessura (t_{GT}) gramatura (G). A correlação pode-se representar pela equação de correlação: $T = 8 \times 10^{-6}t_{GT} - 1 \times 10^{-5}$ com $R^2 = 0,97$ onde t_{GT} deve ser expresso em **mm**, resultando **T** em **m²/s**.

Note-se que o geotêxtil de maior gramatura R1 (644 g/m²), apresenta também os maiores valores de espessura e de transmissividade.

Figura 4.3 Relação entre espessura (t_{GT}) e transmissividade (T) dos geotêxteis ensaiados.

Figura 4.4 relaciona a abertura de filtração segundo a norma francesa G38087 (AFNOR, 1983) (F) e abertura de filtração aparente AOS segundo a norma D4751 (ASTM, 1999) (A). A equação de correlação é: **$A = 1,5F - 0,056$** com **$R^2 = 0,92$** Onde **F** deve ser expresso em **mm**, resultando **A** em **mm**.

Figura 4.4 Relação entre abertura de filtração segundo as normas AFNOR (F) e ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.

Note-se que a maior abertura de filtração para os dois casos corresponde com a menor gramatura R7 (127 g/m^2) estudada.

A disposição anômala que apresentam os corpos de prova das gramaturas maiores R1 (644 g/m^2) R2 (525 g/m^2) ocorre devido ao fato que na realização dos ensaios de abertura aparente pela norma ASTM, o menor tamanho das esferas de vidro disponíveis no laboratório corresponde com 0,053 mm, sugerindo que a abertura aparente para estes geotêxteis é menor que isso.

A Figura 4.5 relaciona a abertura de filtração AFNOR (F) e a permissividade dos geotêxteis estudados.

Figura 4.5 Relação entre abertura de filtração AFNOR (F) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.

Note-se que a maior abertura de filtração corresponde com a maior permissividade, sendo coerente com a menor gramatura R7 (127 g/m²) estudada.

Os dados encontram-se de maneira muito dispersa dificultando uma curva que se ajuste. Observa-se que uma relação linear representa a distribuição os dados. A equação de correlação é: $P = 34,95F - 1,59$ com $R^2 = 0,86$ onde F deve ser expresso em **mm**, resultando P em **s⁻¹**.

A Figura 4.6 relaciona abertura de filtração ASTM (A) e permissividade (P) dos geotêxteis estudados.

Note-se que a maior abertura de filtração aparente maior é a permissividade sendo isto de coerência com a menor gramatura estudada R7 (127 g/m²).

Os dados estão dispersos e não permitem lograr uma curva de ajuste adequada, também estes estão influenciados pelo tamanho das esferas de vidro usadas nos ensaios. Observe-se relação linear pela origem correlaciona-se na equação: $P = 21,62F$ com $R^2 = 0,91$ onde A deve ser expresso em **mm**, resultando P em **s⁻¹**

Figura 4.6 Relação entre abertura de filtração ASTM (A) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.

É de importância referir que: as esferas de vidro utilizadas no ensaio AOS ASTM (A) correspondem a 0,053 mm e não conseguem passar através das amostras R1: 644 g/m²; R2 525 g/m²; R3: 385 g/m² por isto se utiliza o valor de 0,053 mm para a abertura aparente, aclarando que a abertura de filtração aparente para estes corpos de prova é menor.

A Figura 4.7 relaciona gramatura (G) e permissividade (P) dos geotêxteis estudados.

Note-se que o aumento da gramatura produz um decréscimo nos valores de permissividade, sendo de forma mais acentuada até R3 (385 g/m²). A partir deste ponto, a permissividade diminui pouco, apresentando-se os mínimos valores para R1 e R2. Uma equação de regressão que representa relativamente bem os dados experimentais é: $P = 1 \times 10^{-5} G^2 - 0,014 G + 4,78$ com $R^2 = 0,93$, onde G se expressa em g/m² e P em s⁻¹.

Figura 4.7 Relação entre a gramatura (G) permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.

A Figura 4.8 relaciona gramatura (G) e abertura de filtração da AFNOR (F) dos geotêxteis estudados.

Note-se que de forma similar ao gráfico anterior o aumento da gramatura resulta na redução da abertura de filtração, sendo mais acentuada até R3 (385 g/m²). A partir de este ponto a variação é pequena.

Observa-se que uma relação polinomial de ordem 2 representa com boa precisão a relação entre gramatura (G) e AFNOR (F). A equação de correlação é: $F = 6 \times 10^{-7} G^2 - 0,0005 G + 0,2$ com $R^2 = 0,99$ onde G se expressa em g/m² e F em mm.

Figura 4.8 Relação entre gramatura (G) e abertura de filtração AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.

A Figura 4.9 relaciona gramatura (G) e abertura de filtração AOS ASTM (A) dos geotêxteis estudados.

Figura 4.9 Relação entre gramatura (G) e abertura de filtração ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.

Uma relação polinomial de ordem 3 representa com boa precisão a relação entre gramatura (G) e AOS ASTM (A). A equação de correlação é: $A = 8 \times 10^{-10} G^3 + 2 \times 10^{-6} G^2 - 0,001 G + 0,25$ com $R^2 = 0,96$ onde G deve ser expresso em g/m^2 , resultando A em mm .

A Figura 4.10 relaciona espessura (t_{GT}) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis estudados.

Figura 4.10 Relação entre espessura (t_{GT}) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.

Note-se que o aumento da espessura produz decaimento dos valores de abertura de filtração aparente, esta diminuição ocorre de maneira acentuada até os valores de R3 (385 g/m^2) e varia pouco nas maiores gramaturas R2 (525 g/m^2) e R1 (644 g/m^2).

Observa-se que uma relação polinomial de ordem 4 representa com boa precisão a relação entre espessura (t_{GT}) e AOS ASTM (A). A equação de correlação é: $A = 0,038t_{GT}^2 - 0,26t_{GT} + 0,48$ com $R^2 = 0,93$ onde t_{GT} deve ser expresso em mm resultando A em mm.

A Figura 4.11 relaciona espessura (t_{GT}) e permissividade (P) dos geotêxteis estudados.

Note-se que com o aumento da espessura do geotêxtil se tem diminuição dos valores de permissividade.

Uma relação polinomial de ordem 2 representa com boa precisão a relação entre espessura (t_{GT}) e permissividade (P). A equação de correlação é: $P = 0,73t_{GT}^2$

– $5,24t_{GT} + 10,15$ com $R^2 = 0,91$ onde t_{GT} deve ser expresso em mm resultando P em s^{-1} .

Figura 4.11 Relação entre espessura (t_{GT}) e Permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.

A Figura 4.12 relaciona espessura (t_{GT}) e abertura de filtração AFNOR (F) dos geotêxteis estudados.

Figura 4.12 Relação entre espessura (t_{GT}) e AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.

Note-se que na medida em que aumenta a espessura dos corpos de prova os valores de abertura de filtração diminuem de forma acentuada até R2 (525 g/m²), variando pouco de R2 para R1 (644 g/m²).

Neste caso, uma equação polinomial de ordem 2 representa a relação entre espessura (t_{GT}) e AFNOR (F). A equação de correlação é: $F = 0,028t_{GT}^2 - 0,19t_{GT} + 0,38$ com $R^2 = 0,90$ Onde t_{GT} deve ser expresso em mm resultando F em mm.

A Figura 4.13 relaciona transmissividade (T) e permissividade (P) dos geotêxteis estudados.

Figura 4.13 Relação entre transmissividade (T) e permissividade (P) dos geotêxteis ensaiados.

Note-se que o aumento da transmissividade do corpo de prova reflete na diminuição da permissividade. Os valores de permissividade decrescem acentuadamente até R2 (525 g/m²), entre R2 e R1 sendo pouca a variação.

Observa-se que uma relação polinomial de ordem 2 representa com boa precisão a relação entre transmissividade (T) e permissividade (P). A equação de correlação é: $P = 1 \times 10^{10}T^2 - 473297T + 4,84$ com $R^2 = 0,97$ onde T deve ser expresso em m²/s, resultando P em s⁻¹.

A Figura 4.14 relaciona transmissividade (T) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis estudados.

O aumento da transmissividade provoca a diminuição dos valores de abertura aparente, esta diminuição se destaca até os valores de R3 (385 g/m²) sendo pouca a variação para R2 e R1.

Figura 4.14 Relação entre transmissividade (T) e AOS ASTM (A) dos geotêxteis ensaiados.

Uma relação polinomial ordem 2 representa com boa precisão a relação entre transmissividade (T) e AOS ASTM (A). A equação de correlação é: **$A = 6 \times 10^8 T^2 - 20782T + 0,21$** com **$R^2 = 0,96$** onde **T** deve ser expresso em **m²/s**, resultando **A** em **mm**.

A Figura 4.15 relaciona transmissividade (T) e abertura de filtração AFNOR (F) dos geotêxteis estudados. Note-se que ao aumentar os valores de transmissividade diminuem de forma acentuada a abertura de filtração, isto até chegar no R3, depois os valores variam pouco para R2 e R1.

Observa-se que uma relação polinomial ordem 2 representa com boa precisão a relação entre transmissividade (T) e AFNOR (F). A equação de correlação é: **$F = 5 \times 10^8 T^2 - 15109T + 0,19$** com **$R^2 = 0,96$** onde **T** deve ser expresso em **m²/s**, resultando **F** em **mm**.

Os dados obtidos das características físicas e propriedades hidráulicas permitem correlações que apresentam linhas de tendência com comportamento coerente. Várias das correlações podem ser expressas por uma reta, enquanto outras precisam de curvas de grau maior.

Figura 4.15 Relação entre transmissividade (T) e AOS AFNOR (F) dos geotêxteis ensaiados.

Na Tabela 4.3 é apresentado o quadro resumo das correlações entre as características e propriedades dos geotêxteis estudados.

Tabela 4.3 Correlações das características e propriedades dos geotêxteis ensaiados.

Variável	Permissividade $P \text{ (s}^{-1}\text{)}$	AOS ASTM $A \text{ (mm)}$	AOS AFNOR $F \text{ (mm)}$	Transmissividade $T \text{ (m}^2\text{/s)}$	Gramatura $G \text{ (g/m}^2\text{)}$
Espessura $t_{GT} \text{ (mm)}$	$P = 0,73t_{GT}^2 - 5,24t_{GT} + 10,15$ $R^2 = 0,91$	$A = 0,038t_{GT}^2 - 0,26t_{GT} + 0,48$ $R^2 = 0,93$	$F = 0,028t_{GT}^2 - 0,19t_{GT} + 0,38$ $R^2 = 0,90$	$T = 8 \times 10^{-6}t_{GT} - 1 \times 10^{-5}$ $R^2 = 0,97$	$G = 224,11t_{GT} + 261,68$ $R^2 = 0,98$
Gramatura $G \text{ (g/m}^2\text{)}$	$P = 1 \times 10^{-5}G^2 - 0,014G + 4,78$ $R^2 = 0,93$	$A = 8 \times 10^{-10}G^3 + 2 \times 10^{-6}G^2 - 0,001G + 0,25$ $R^2 = 0,96$	$F = 6 \times 10^{-7}G^2 - 0,0005G + 0,2$ $R^2 = 0,99$	$T = 3 \times 10^{-8}G$ $R^2 = 0,97$	
Transmissividade $T \text{ (m}^2\text{/s)}$	$P = 1 \times 10^{10}T^2 - 473297T + 4,84$ $R^2 = 0,97$	$A = 6 \times 10^8T^2 - 20782T + 0,21$ $R^2 = 0,96$			
AOS AFNOR $F \text{ (mm)}$	$P = 34,95F - 1,59$ $R^2 = 0,86$	$A = 1,5F - 0,056$ $R^2 = 0,92$			
AOS ASTM $A \text{ (mm)}$	$P = 21,62A$ $R^2 = 0,91$				

4.3 Ensaios de filtração

a) Água limpa

Em complemento aos ensaios de caracterização hidráulica, realizaram-se ensaios de filtração em todos os geotêxteis, para que se pudesse conhecer o comportamento quanto à vazão para as diversas gramaturas utilizadas e ter-se um padrão de referência para os ensaios subsequentes com partículas em suspensão.

As curvas volume x tempo de geotêxteis ensaiados são apresentadas na Figura 4.16 donde se tomam os valores médios do tempo que demora encher um recipiente de capacidade de um litro com água limpa, que passa através de cada corpo de prova.

Devido à configuração que apresenta o equipamento, os ensaios dos diferentes geotêxteis apresentaram resultados similares, sendo uma única curva capaz de retratar o comportamento geral de todos.

Note-se que para todos os corpos de prova, o tempo que leva passar um litro de água é aproximadamente 7 segundos.

Os ensaios de filtração com água limpa foram realizados em todas as amostras de geotêxteis (R1: 644 g/m²; R2: 525 g/m²; R3: 385 g/m²; R4: 291 g/m²; R5: 203 g/m²; R6 156 g/m² e R7: 127 g/m²), registrando-se tempos aproximadamente iguais para todos os geotêxteis, resultado que surpreende dado que para cada gramatura registram-se permissividades diferentes durante os ensaios de caracterização. Utilizando os valores da espessura dos corpos de prova e conhecendo a área foram calculados os valores de permissividade (s⁻¹) alcançados no equipamento desenvolvido. No entanto, a diferença entre a permissividade da norma brasileira e a calculada no ensaio de filtração atinge valores de até um

segundo podendo estar relacionado às diferentes configurações entre o ensaio desenvolvido e o ensaio normatizado.

Figura 4.16 Relação entre volume e tempo para água limpa.

b) Água com partículas de bentonita em suspensão

Sendo a bentonita composta principalmente por argila, supõe-se que o aporte de partículas em suspensão durante os ensaios é importante.

Na Figura 4.17 são apresentadas fotos referentes ao ensaio do geotêxtil R6 (156 g/m²), que apresenta características de comportamento muito similares às observadas nas demais gramaturas. Na Figura 4.17a, mostra-se a deposição do espesso filme de bentonita sobre o geotêxtil após o término do ensaio. Na foto 4.17b nota-se a presença de trincas e deslocamentos de bentonita, aspecto que toma o filme depositado da foto anterior, após secagem ao ar. Na Figura 4.17c se apresenta uma microfotografia da superfície do geotêxtil ensaiado, donde se observam partículas aproximadamente esféricas em contato com os filamentos. Isto sugere que a deposição do filme de bentonita na superfície do geotêxtil é a principal causa da redução da permeabilidade, pois são poucas as partículas que chegam ao interior

do geotêxtil, conforme se pode observar na Figura 4.17d. Esta mostra uma fotografia do corte transversal do corpo de prova e onde se comprova que a bentonita se concentra na parte superior do geotêxtil, deixando a parte interna praticamente limpa.

Figura 4.17 Ilustração de diferentes etapas do ensaio de filtração com o geotêxtil R6 (156 g/m^2) de partículas suspensas de bentonita. a) Acumulação da bentonita sobre o geotêxtil após o ensaio. b) Amostra secada ao ar, c) Microfotografia, partículas de bentonita entre os filamentos do geotêxtil (aumento 98x), d) Corte transversal do geotêxtil (aumento 31x).

A Figura 4.18 mostra os volumes percolados acumulados através dos geotêxteis estudados R2, R4, R5, R6 em função da gramatura. Neste caso, tem-se uma mistura de bentonita na concentração de 5 g/L. Nota-se que os volumes aumentam ao longo do tempo até certo ponto. A partir desse tempo limite, praticamente nada mais percola, indicando uma drástica redução da permeabilidade do geotêxtil.

Note-se que o maior volume percolado para a concentração de 5 g/L de bentonita, ocorre no geotêxtil de menor gramatura R6 (156 g/m²). No entanto, não se pode falar de uma relação direta entre volume acumulado e gramatura (G), dado que para os demais corpos de prova os volumes percolados ficam próximos.

Figura 4.18 Curvas de filtração de bentonita em suspensão concentração 5 g/L, geotêxteis não-tecidos de poliéster, R2 (525 g/m²); R4 (291 g/m²); R5 (203 g/m²); R6 (156 g/m²).

Para determinar os tempos a partir do qual ocorre à drástica redução dos volumes percolados, definiu-se o tempo de transição (t_r), conforme se ilustra nas Figura 4.19 a 4.23. O valor do tempo de transição foi definido, arbitrariamente, na interseção, das linhas feitas sobre cada uma das pendentes manifestadas pelos dados.

Figura 4.19 Tempo de transição para R2 e mistura água bentonita com 5 g/L.

Figura 4.20 Tempo de transição para R4 e mistura água bentonita com 5 g/L.

Observa-se que o tempo de transição maior ocorre para o corpo de prova R5 (203 g/m²) aos 100 segundos e o menor para R2 (525 g/m²), aos 33 segundos de ensaio, sendo os volumes acumulados totais quase iguais para os dois ensaios. No entanto R6 (156 g/m²) apresentou um valor de t_r intermediário de 75 segundos e foi quem apresentou o maior volume acumulado.

Figura 4.21 Tempo de transição para R5 e mistura água bentonita com 5 g/L.

Figura 4.22 Tempo de transição para R6 e mistura água bentonita com 5 g/L.

As Figuras 4.23 a 4.29 mostram a relação entre as propriedades físicas e hidráulicas (gramatura (G), espessura (t_{GT}), permissividade (P), transmissividade (T), e abertura de filtração de acordo com as normas da ASTM (A) e da AFNOR (F) e os valores de tempo de transição, t_r , para cada corpo de prova ensaiado na concentração de 5 g/L de bentonita. Assim, inicialmente, na Figura 4.23 apresenta-

se a relação entre a gramatura e o tempo de transição, para as diferentes gramaturas, onde se nota uma tendência dos t_r diminuir com a gramatura.

Figura 4.23 Relação entre gramatura (G) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão na concentração de 5g/l.

Na Figura 4.24 é apresentada a relação entre a espessura e o tempo de transição.

Figura 4.24 Relação entre espessura (t_{GT}) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão de bentonita na concentração de 5g/L.

Observa-se que com o aumento da espessura se apresenta uma tendência de redução do valor de t_r , o que é de esperar-se, devido à relação que apresenta a gramatura e a espessura já descrita anteriormente.

Na Figura 4.25 é apresentada a relação entre a permissividade e os valores do tempo de transição (t_r). Observa-se que ao aumentar a permissividade, aumentam os valores de t_r , de forma praticamente linear.

Figura 4.25 Relação entre permissividade (P) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados com suspensão de bentonita na concentração de 5g/L.

Na Figura 4.26 é apresentada a relação entre a transmissividade (T) e o tempo de transição (t_r). Embora não pareça haver relação física entre t_r e T também foi possível notar que com o aumento da transmissividade, os valores do tempo de transição decaem, provavelmente refletindo o comportamento visto nas correlações mostradas anteriormente entre G, t_{GT} e P.

Figura 4.26 Relação entre transmissividade (T) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados.

Com relação à abertura de filtração uma suposição lógica, pelo menos para solos granulares, seria esperar que o tempo de transição (t_r) deve aumentar com o aumento das aberturas determinadas pelas normas da ASTM (A) e da AFNOR (F). Para a filtração de bentonita em suspensão, mesmo considerando suas propriedades tixotrópicas, pôde-se confirmar essa relação, como se mostra nas Figuras 4.27 e 4.28, onde se nota que com o aumento da abertura de filtração, aumentam os tempos de transição.

Figura 4.27 Relação entre AOS ASTM (A) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados.

Figura 4.28 Relação entre AFNOR (F) e o tempo de transição (t_r) dos geotêxteis ensaiados.

c) Água com partículas de solo em suspensão.

Após concluídos os ensaios de filtração da água com partículas suspensas de bentonita, foram realizados os testes para a filtração das partículas suspensas em água, utilizando o solo coletado no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, cujas características foram apresentadas no item 4.3.

Os ensaios de filtração das partículas de solo em suspensão foram feitos para três diferentes concentrações: 20; 10 e 5 gramas por litro, realizando-se ensaios com as diversas gramaturas do geotêxtil.

A Figura 4.29 mostra os volumes acumulados ao longo do tempo de ensaio para o geotêxtil R1, o de maior gramatura (644 g/m²), nas diferentes concentrações da mistura água-solo.

Note-se, a influência que tem a concentração da mistura água-solo nas diferenças nos valores de volumes percolados acumulados. As concentrações de 10 e de 20 g/L rapidamente tendem a colmatar o geotêxtil, com tempos de transição

inferiores a 200 s. Já para a concentração de 5 g/L, o geotêxtil tende a preservar a sua função, permitindo a passagem de apreciável volume de água.

Figura 4.29 Resultados dos ensaios de filtração do geotêxtil R1 (644 g/m²) para misturas de solo-água nas concentrações de 20 g/L, 10g/L e 5g/L.

A Figura 4.30 apresenta a curva de filtração e o tempo de transição no corpo de prova R1 na concentração água-solo de 20 g/L.

Figura 4.30 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 20 g/L.

Nota-se que após alcançar o tempo de transição a redução de fluxo percolado alcança níveis críticos para um sistema de drenagem, pois apenas uma pequena

capacidade de vazão fica mantida, visto que a deposição de partículas, praticamente, bloqueou o geotêxtil. Assim, para as finalidades pretendidas para os geotêxteis estudados nesta pesquisa, que é o de proteção de estruturas de drenagem, os níveis de vazão oferecidos são provavelmente insuficientes.

A Figura 4.31 apresenta a curva de filtração e o tempo de transição do corpo de prova R1 na concentração de 10 g/L.

Nota-se que o volume percolado e o tempo de transição são um pouco maiores que observados para a concentração de 20 g/L, sugerindo que a concentração de partículas em suspensão é um fator que condiciona o desempenho do sistema filtro-drenante.

Figura 4.31 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 10 g/L.

Na Figura 4.32 é apresentada a curva de filtração do R1 na concentração de 5 g/L.

Nota-se que para a concentração de 5 g/L o tempo de transição registrado foi quase a metade do registrado nas outras concentrações, no entanto a diminuição do fluxo de filtração não é tão acentuada e o geotêxtil preserva a permeabilidade num patamar aceitável.

Figura 4.32 Tempo de transição para R1 e mistura água-solo com 5 g/L.

Na Figura 4.33 se apresenta a curva dos valores acumulados durante o ensaio de filtração do geotêxtil R2 (525 g/m²) na concentração de 20 g/L de solo. Nota-se que após o tempo de transição de 64 segundos, a vazão diminui drasticamente, indicando, praticamente, a quase total obstrução do geotêxtil.

Figura 4.33 Resultado do ensaio de filtração do geotêxtil R2 com gramatura 525 g/m² e mistura solo-água com 20 g/L e o tempo de transição.

A Figura 4.34 apresenta as curvas de filtração para o geotêxtil R3 (385 g/m²), na concentração de 20 g/L e 10 g/L com os respectivos valores de t_r .

Figura 4.34 Curvas de filtração para o geotêxtil R3 (385 g/m²) e tempos de transição t_r das misturas água-solo.

Nota-se que, para 20 g/L, R3 apresenta um $t_r \approx 59$ segundos sendo a metade do t_r de R1 na mesma concentração. O volume acumulado filtrado da mistura 10 g/L apresentou valores muito mais elevados ao comparar com R1 (644 g/m²) da Figura 4.31. Além disso, a concentração de 10 g/L não apresentou uma grande redução no fluxo durante o tempo de ensaio.

Na Figura 4.35 apresentam-se as curvas de filtração para R4 (291 g/m²) nas concentrações, 20 g/L e de 10 g/L.

Figura 4.35 Curvas de filtração do geotêxtil R4 (291 g/m²) e tempos de transição t_r (72s para 20 g/L) e (190s para 10 g/L) das misturas água-solo.

Na Figura 4.36 são apresentadas as curvas de filtração para R5 (203 g/m²), nas diferentes concentrações de solo.

Figura 4.36 Curvas dos ensaios de filtração para R5 (203 g/m²).

Digno de nota é o fato de que, na concentração de 5g/L, não há uma variação no volume percolado, pelo menos durante o tempo de ensaio. Isto sugere que a depender da concentração e das características do geotêxtil é possível, em determinadas situações, contar-se com o benefício da proteção de estruturas de drenagem. No entanto, isto deve ser confirmado com ensaios de mais longa duração, para verificar se isto é permanente, ou se há um tempo limite em que se pode contar com esse comportamento.

Por outro lado, o volume acumulado filtrado no final do ensaio para R5 (203 g/m²) na mistura água solo 20 g/L, é apenas um pouco maior que o registrado na concentração de 10 g/L, sendo isto contrário ao ocorrido nos ensaios anteriores já descritos, onde uma maior concentração de solo causou colmatção mais rapidamente. Entretanto, registre-se que do ponto de vista prático, as diferenças são insignificantes, devendo ficar ressaltado desses resultados a incapacidade do geotêxtil de cumprir, simultaneamente, a função de filtração e manter a capacidade de vazão.

A Figura 4.37 mostra o desempenho na filtração do geotêxtil R6 (156 g/m²) para diversas concentrações. As diferenças no volume filtrado parecem estar relacionadas diretamente com a concentração da mistura água-solo.

Figura 4.37 Resultados dos ensaios de filtração para geotêxtil R6 (156 g/m²) nas diferentes concentrações.

Note-se o comportamento do tempo de transição mostra valores perto dos 100 segundos para concentrações de 5 g/L e 10 g/L. No entanto a vazão que ocorre para 5g/L decai após ocorrer t_r , num comportamento discrepante do observado para R1 e R3.

A Figura 4.38 apresenta o comportamento de R7 (127 g/m²) no ensaio de filtração com as concentrações de 20 g/L, 10 g/L e 5g/L. Como tem sido a tendência geral, os resultados mostram a influência da concentração de solo no processo de filtração, evidenciado pelo aumento dos valores de t_r com a diminuição da concentração de solo. Note-se, neste caso, que na concentração de 5g/L o geotêxtil permite a passagem contínua da suspensão, sem redução aparente da vazão.

Figura 4.38 Resultados dos ensaios de filtração do geotêxtil R7 (127 g/m²) e diferentes concentrações.

R7 é a menor gramatura utilizada e na concentração de 20 g/L mostra uma drástica redução da vazão (acima de 90%) ao passar o tempo de transição (t_r) de aproximadamente 100 segundos. Após, resta apenas um pequeno fluxo residual o que indica, praticamente, a total colmatação do geotêxtil. Na concentração de 10 g/L a diminuição do fluxo acontece de forma gradual, levando mais de 250 segundos até t_r , porém o geotêxtil ainda preserva alguma capacidade de vazão ainda que bastante inferior à observada no início do ensaio.

Na Figura 4.39 são comparados os resultados do desempenho de todas as gramaturas utilizadas na filtração da mistura água-solo na concentração de 20 g/L. A menor quantidade de água filtrada até o tempo de transição ocorre para R3, aproximadamente 8 litros, e o volume maior ocorre para R7. Note-se, ainda, que a diferença de volume filtrado entre R3 e R7 é próximo dos 6 litros. Em geral os tempos de transição ocorrem antes dos 200 segundos, o que parece ser um tempo limite para a colmatação nesta concentração.

Figura 4.39 Resultados ensaios de filtração concentração 20 g/L para as gramaturas estudadas.

O desempenho visto para todos os geotêxteis na concentração de solo de 20 g/L foi a colmatação que ocorre pela deposição das partículas de solo. Isto indica que as estruturas protegidas por geotêxteis, sujeitas a fluxo com partículas suspensas em alta concentração, perdem rapidamente sua funcionalidade, tornando-se inservíveis.

Na Figura 4.40 são apresentados os resultados do desempenho das diversas gramaturas utilizadas na filtração da mistura água-solo na concentração de 10 g/L. Contrariamente ao observado para a concentração de 20 g/L, o geotêxtil que apresentou melhor desempenho foi o R3. Uma possível explicação para essa discrepância pode estar associada à heterogeneidade dos geotêxteis utilizados, que, sabidamente, para o caso de não-tecidos, pode ser muito acentuada. Em comparação com a concentração de 20 g/L, nota-se que os tempos de transição são um pouco mais elevados, porém ainda reduzidos quando se pensa no desempenho desses geotêxteis para a proteção da entrada de estruturas de drenagem.

Figura 4.40 Resultados ensaios de filtração concentração 10 g/L para as gramaturas estudadas.

Na Figura 4.41 são comparados os resultados de desempenho das diversas gramaturas utilizadas na filtração de água-solo na concentração de 5 g/L.

Figura 4.41 Resultados ensaios de filtração concentração 5 g/L para as gramaturas estudadas.

Note-se que para uma concentração de 5 g/L o melhor desempenho quanto ao volume acumulado filtrado é o do geotêxtil R5, seguido de R7, os quais não apresentaram diminuição significativa do fluxo durante o ensaio. O conjunto de resultados sugere, portanto, que a depender do geotêxtil e da carga de sedimento

na enxurrada, é possível proporcionar proteção à entrada de estruturas de drenagem, pelo menos durante algum tempo, quando a manutenção do sistema deve ser realizada, com a substituição do geotêxtil.

Dando continuidade aos ensaios de filtração de água com partículas de solo em suspensão, foram realizados ensaios nos quais se reutilizaram os corpos de prova, na mesma concentração com que foram ensaiados previamente. A reutilização se fez após da secagem ao ar durante 24 horas e estes corpos de prova reutilizados passam a levar a sigla Rr junto com o numero que identifica o geotêxtil. A intenção destes ensaios de reutilização é tentar simular períodos de chuva e secagem. Para a realização destes ensaios de filtração foi usado o mesmo solo coletado no Campus II da USP, ensaiando-se a concentração 20 gramas por litro.

As Figura 4.42 e 4.43 apresentam, respectivamente, fotografias dos corpos de prova R1 e sua reutilização R1r, e R7 e R7r, sendo estas representativas do que acontece para todas as gramaturas estudadas.

Figura 4.42 Fotografias de R1 (644 g/m²) após do ensaio de filtração na concentração 20 g/L, para o geotêxtil virgem e reutilização R1r após de seco ao ar.

Note-se o aumento da camada de solo sobre o geotêxtil reutilizado, além da formação de placas e gretas de dessecação.

As imagens apresentadas são representativas do ocorrido para todas as amostras geotêxteis, nas quais se observa o aumento na camada de solo acima deles além da formação de placas e gretas de dessecação.

Figura 4.43 Fotografias de R7 (127 g/m²) após do ensaio de filtração na concentração 20 g/L e reutilização (R7r) após de seco ao ar.

Na Figura 4.44 são apresentadas as curvas correspondentes ao ensaio de filtração R1 e posterior reutilização R1r na concentração de 20 g/L.

Figura 4.44 Resultados dos ensaios de filtração na concentração 20 g/L, para R1 (644 g/m²) e reutilização do corpo de prova apos de seco ao ar R1r.

A Figura 4.45 apresenta as curvas de filtração para o geotêxtil R7 e R7r na reutilização.

Note-se que no processo de reutilização os geotêxteis R1 e R7 permitem apenas a passagem de pequeno volume de água, que tende rapidamente a diminuir. A vazão associada se reduz acentuadamente, após 200 s de ensaio. De uma forma geral, o comportamento visto nos corpos de prova R1 e R7 é típico do observado em todos os corpos de prova na concentração de 20 g/L.

Figura 4.45 Resultados dos ensaios de filtração na concentração 20 g/L, para R7 (127 g/m²) e reutilização do corpo de prova apos de seco ao ar R7r.

Na Figura 4.46 apresentam-se os resultados dos ensaios de reutilização para todas as gramaturas estudadas.

Figura 4.46 Comparação resultados filtração 20 g/L reutilizando os corpos de prova para todas as gramaturas estudadas.

Note-se o comportamento similar das curvas em todos os corpos de prova, observando-se que a gramatura que permite uma maior vazão é R7r (127 g/m²) e a que apresenta pior desempenho está associada a R2r (525 g/m²).

Na Figura 4.47 são apresentadas as microfotografias dos corpos de prova dos diversos geotêxteis ensaiados, após reutilização. Estas fotos são da superfície superior do corpo de prova, após remoção do filme de partículas depositadas. Note-se a aglomeração das partículas formando aglutinações que ficam ao redor dos fios do geotêxtil, porém sem penetrá-lo profundamente, num comportamento similar ao mostrado por CHEN et al. (2008).

Nos ensaios seguintes se realizou a filtração da mistura água-solo na concentração de 5 g/L, em ensaios de maior duração (uma hora em cada fase), para os corpos virgens. Só foram utilizadas duas gramaturas R1, (644 g/m²) e R6 (156 g/m²), com as quais se fizeram três ensaios de filtração, um com os corpos de prova virgens e mais dois de reutilização, utilizando a mesma concentração. Os corpos de prova foram secos ao ar durante 24 horas antes de se proceder as fases de reutilização (Fase 2 e Fase 3).

Figura 4.47 Microfotografias dos corpos de prova apos sua reutilização (fase 2) na filtração da mistura água-solo na concentração de 20 g/L. (relação de ampliação 255x)

Na Figura 4.48 são apresentadas as fotos do corpo de prova R1, após cada uma das três fases de ensaio (F1, F2, F3), e foto do corte transversal feito na fase 3 após o segundo reúso.

Figura 4.48 Fotos de R1 (644 g/m²) após cada uma das fases do ensaio: F1 - após ensaio na amostra virgem; F2 - primeira reutilização após secagem ao ar; F3 Esquerda - segunda reutilização; Direita (taxa de ampliação 31x) - corte transversal mostrando o interior do geotêxtil.

F1 mostra o corpo de prova após o primeiro ensaio no qual as partículas ficam retidas perto da superfície. Na fase 2 (F2), nota-se acumulação de material na superfície do corpo de prova gerando um delgado filme de partículas. Na foto F3, esquerda aparece um filme espesso de solo sobre o corpo de prova e em F3, direita, se apresenta uma foto de corte vertical do geotêxtil. Como destaque, note-se a

acumulação de solo na metade superior do geotêxtil, promovendo cegamento e o fato de que as partículas ficam retidas no interior do geotêxtil apenas na sua porção próxima da superfície em contato com a suspensão (F3 direita), permanecendo as fibras da parte inferior limpas. Assim, como comentado em diversas passagens, a acumulação excessiva de partículas de solo no interior e na superfície do geotêxtil parece ser a causa principal da perda da capacidade drenante do geotêxtil quando em contato com suspensões solo - água.

Na Figura 4.49 são apresentadas as curvas do volume filtrado durante o tempo de ensaio em cada uma das fases.

Figura 4.49 Resultados obtidos nas três fases de ensaio para R1. Geotêxtil virgem - F1; Primeiro reúso - F2; Segundo reúso - F3.

Note-se a diminuição acentuada das inclinações das curvas, após reúso. Para o geotêxtil virgem, F1, tem-se mais de 40 litros percolados em cerca de 25 minutos, para F2 pouco mais de 10 litros em cerca de 65 minutos e para F3, aproximadamente 5 litros após 60 minutos de ensaio.

Tendo o volume filtrado acumulado no tempo pode-se obter uma aproximação da vazão na qual a água é filtrada, em cada uma das fases do ensaio (Figura 4.50).

Durante F1, a vazão medida corresponde a 8,6 L/min no início e durante o ensaio diminui até se estabilizar na ordem de 1 L/min, ocorrendo perda de cerca de

90% da capacidade drenante do geotêxtil. Em F2, a vazão inicial foi 3,2 L/min, aproximadamente 63% menor que a vazão inicial em F1, e diminui até 0,091 L/min. Em F3, começa com 0,036 L/min, 99,6% menor que o corpo de prova virgem e diminui até 0,030 L/min. As reduções que ocorrem na reutilização refletem o ocorrido nas etapas anteriores, comprovando a colmatagem do geotêxtil, que não se altera durante a secagem e a perda praticamente total de sua capacidade drenante. Assim, embora nos ensaios de curta duração na concentração de 5g/L parecesse que o geotêxtil preservaria a capacidade drenante, o fato é que se o fluxo for de mais longa duração (no caso, 60 minutos) o cegamento do geotêxtil ocorrerá.

Figura 4.50 Curvas de vazão aproximada em cada uma das fases de ensaio para R1, Direita acima mostra um zoom das curvas nas fases de reutilização dada sua pequena vazão.

Na Figura 4.51 se apresentam as fotos do ensaio de filtração na concentração de 5 g/L e a reutilização do corpo de prova R6 (156 g/m²), após cada uma das 3 fases de ensaio.

Os resultados dos ensaios para R6 mostram comportamento similar ao o ocorrido e descrito para R1. A espessura de filme de solo acima do corpo de prova aumenta após cada ensaio de reuso e também se repete o comportamento no interior do geotêxtil, onde as partículas de solo ficam principalmente na parte superior e a parte inferior permanece praticamente limpa, isenta de partículas retidas.

Figura 4.51 Fotos de R6 (156 g/m²) após cada uma das fases do ensaio; F1: Após ensaio na mostra virgem; F2: Após a primeira reutilização, F3 Esquerda: segunda reutilização, após secagem ao ar. F3 Direita: (taxa de ampliação 50x) corte transversal mostrando o processo de colmatção no interior do geotêxtil.

Na Figura 4.52 são apresentadas as curvas de filtração das três fases de ensaio para R6.

Note-se que o corpo de prova R6, virgem, filtra uma grande quantidade de água em um curto período de tempo. Para a primeira reutilização, Fase 2 - F2, a quantidade de volume filtrado em uma hora de ensaio decai até uma taxa quase estável durante o resto do ensaio. Na fase 3 (segunda reutilização do corpo de prova R6) o volume acumulado filtrado é muito menor do que o volume medido no ensaio na amostra virgem e na fase 2, mas ainda permanece alguma capacidade de fluxo.

Figura 4.52 Curvas de filtração para R6 (156 g/m²) na concentração de 5 g/L. Geotêxtil virgem - F1; Primeiro reúso - F2; Segundo reúso - F3.

Dos resultados de volumes acumulados ao longo do tempo, derivaram-se as vazões em cada tempo, as quais são apresentadas na Figura 4.53.

No corpo de prova virgem F1, a vazão inicial medida corresponde a 8 L/min e esta diminui até 2,9 L/min durante o ensaio, mostrando uma redução aproximada do 64%. Para F2 a vazão inicial foi 1,6 L/min, reduzindo-se até 0,2 L/min e, por fim, na fase 3 inicia com 0,11 L/min e diminui até 0,072 L/min. Assim, repete-se o observado para o geotêxtil R1, ou seja, embora nos ensaios de curta duração na concentração de 5g/L parecesse que o geotêxtil preservaria a capacidade drenante, o fato é que se o fluxo for de mais longa duração (no caso, 60 minutos) o cegamento do geotêxtil ocorrerá.

A perda progressiva da capacidade de percolação com o reúso evidencia a facilidade com que as partículas finas de solo causam colmatação ao se acumular no interior e na superfície do geotêxtil. Na Figura 4.54 são apresentadas as fotos após a fase 3 do ensaio de filtração dos geotêxteis R1r (644 g/m²) e R6r (156 g/m²) na concentração de 5 g/L, onde se pode observar a deposição de partículas aderidas às fibras do geotêxtil e o espesso filme que tende a se formar sobre a

superfície de R6, mesmo este tendo uma abertura de filtração muito maior que a de R1.

Uma possível descrição do processo de colmatção com solo observado poderia ser que no início parece acontecer à deposição interna nos filamentos, imediatamente abaixo da superfície do geotêxtil. Em seguida, ocorre o bloqueio pela aglomeração de partículas de argila, processo que é seguido, de forma quase concomitante aos anteriores, pela acumulação de material na superfície gerando cegamento que pode ser identificado pela formação do filme de partículas na superfície.

Figura 4.53 Curvas da vazão x tempo para R6 nas diversas fases de ensaio e reutilização do corpo de prova. Ensaio com o corpo de prova virgem (Fase 1 - F1); Primeiro reuso (Fase 2 - F2); Segundo reuso (Fase 3 - F3). Acima, à direita, se apresentam as curvas de reutilização F2 e F3 ampliadas.

Também é importante tomar em consideração o comportamento das partículas finas suspensas, em sua maioria de tamanho argila. Estas são pequenas o suficiente para atravessar os geotêxteis, considerando-se as suas aberturas de filtração. Assim, seria de se esperar que as partículas finas em suspensão passassem pelo geotêxtil. No entanto as partículas ficam aglutinadas ao redor das fibras de maneira contínua, possivelmente por conta das forças de superfície que se desenvolvem entre as partículas ou entre as partículas e as fibras, fazendo com que

uma considerável porcentagem dos espaços vazios existentes na metade superior do geotêxtil fiquem ocupados.

Figura 4.54 Corpos de prova após da fase 3 do ensaio de filtração da mistura água solo na concentração de 5 g/L. Esquerda:(taxa de ampliação 132x) geotêxtil R1; Direita: geotêxtil R6. (relação de ampliação 43x)

Na Figura 4.55 é apresentado um esquema que permite ilustrar a forma com que as partículas finas suspensas ficam aderidas aos filamentos do geotêxtil de maneira progressiva até causar o recobrimento dos espaços por onde deveria fluir a água.

Figura 4.55 Esquema da progressiva obstrução das aberturas de filtração na parte superior do geotêxtil.

Note-se a acumulação progressiva de partículas ao redor dos filamentos da superfície, estas partículas vão se juntando a outras, formando aglomerados, que dificultam a passagem livre da água. Isto pode ser observado na Figura 4.56 que apresenta fotografias, com menor ampliação do que a mostrada na Figura 4.54, e onde fica patente a aglomeração de partículas. Note-se a fixação das partículas de

solo nos filamentos formando uma acumulação de baixa permeabilidade que atinge principalmente a metade superior da espessura do geotêxtil.

Figura 4.56 Fotografias da superfície dos corpos de prova R1 após a fase 3 (F3) na direita (taxa de ampliação 57x) e R6 na esquerda (taxa de ampliação 31x) após de seu segundo reuso.

Ainda para explicar a colmatção, na Figura 4.57 se apresenta outra ilustração, desta vez mostrando o que ocorre em um plano vertical do geotêxtil, ao longo de sua espessura.

Figura 4.57 Modelo de colmatção de geossintéticos não-tecidos pela aglomeração de partículas de solo suspensas na água ao redor dos filamentos. A: Passagem livre, B: Aglomeração de partículas nos filamentos, C: Colmatção do geotêxtil.

No estágio “A” se tem um geotêxtil com todos os vazios livres, que permite a passagem da água juntamente com as partículas suspensas de solo sem interrupções. No segundo estágio, “B”, a água percorre no interior do geotêxtil na velocidade permitida pela permissividade e algumas partículas iniciam o processo de aglutinação, no momento de passar o geotêxtil, devido à diminuição do fluxo pela tortuosidade dos caminhos que percorre a água. No terceiro estágio, “C”, as partículas bloqueiam a maior parte dos espaços do geotêxtil causando a acumulação de partículas na superfície, gerando diminuição do fluxo e a colmatação.

O modelo proposto, em que o processo de aglutinamento das partículas se desenvolve na metade superior da espessura dos geotêxteis, ficando a parte inferior aparentemente limpa, fica corroborado pelas observações efetuadas após os ensaios. Para comprovar este fato, a Figura 4.58 mostra fotos dos cortes transversais dos corpos de prova R1 e R6 após a fase F3, segundo reúso.

Figura 4.58 Corte transversal dos corpos de prova após o segundo reúso, fase 3 - F3. (taxa de ampliação esquerda 31x, direita 50x)

5 AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO

Com o intuito de verificar a aplicabilidade de alguns critérios de filtro aos solos e geotêxteis estudados recorreu - se às Figuras 2.8 e 2.9 da Revisão Bibliográfica. A Tabela 5.1 sintetiza as características da bentonita necessárias para verificação dos critérios, enquanto, a Tabela 5.2 mostra os dados referentes ao solo. A Tabela 5.3 reúne as aberturas de filtração dos geotêxteis ensaiados.

Tabela 5.1 Características da Bentonita

PROPRIEDADES	VALORES	DIÂMETRO DOS GRAÇOS (mm)	
		D ₉₅	0,035
Teor de silte	30%	D ₉₀	0,015
Teor de argila	70%	D ₈₅	0,008
Limite de liquidez	430%	D ₆₀	/
Limite de plasticidade	58%	D ₅₀	/
Índice de plasticidade	372%	D ₃₅	/
Classificação SUCS	CH	D ₃₀	/
		D ₁₀	/

/ - Não determinado

Tabela 5.2 Características da areia argilosa.

PROPRIEDADES	VALORES	DIÂMETRO DOS GRAÇOS (mm)	
Teor de areia	67,3%	D ₉₅	0,750
Teor de silte	5,2%	D ₉₀	0,550
Teor de argila	27,5%	D ₈₅	0,500
Limite de liquidez	32%	D ₆₀	0,250
Limite de plasticidade	15%	D ₅₀	0,190
Índice de plasticidade	17%	D ₃₅	0,075
Classificação SUCS	SC	D ₃₀	0,040
		D ₁₀	/

/ - Não determinado

Tabela 5.3 Aberturas de filtração dos geotêxteis estudados.

		AMOSTRAS						
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Parâmetros	unidades							
ABERT. FILTRAÇÃO (ASTM)	mm	0,053	0,053	0,053	0,061	0,120	0,130	0,140
ABERT. FILTRAÇÃO (AFNOR)	mm	0,083	0,070	0,075	0,087	0,107	0,127	0,140

Para a areia argilosa, o solo típico empregado na pesquisa, pode-se utilizar os critérios para condições de fluxo estacionário e fluxo dinâmico mostrados nas Figuras 2.8 e 2.9. Da experiência prévia com este solo, sabe-se que se trata de um solo não dispersivo. Assim, com mais de 20% de argila, um geotêxtil com abertura de filtração menor que 0,21 mm, o que ocorre em todos os geotêxteis ensaiados, satisfaria as características de retenção. O mesmo resultado com relação à retenção ocorre ao utilizar outros critérios disponíveis na literatura, como os reunidos por AGUIAR & VERTEMATTI (2004) e mostrados na Tabela 5.4. Apenas a título de ilustração testam-se alguns desses critérios pois não é possível determinar o coeficiente de uniformidade do solo.

Tabela 5.4 Alguns critérios de retenção para filtros AGUIAR & VERTEMATTI (2004)

Autor	Critério
SCHOBER e TEINDL (1979)	Para $C_u > 3$, utilizar: $O_{90} < 5 \times D_{50s}$ Para $C_u \leq 3$, utilizar: $O_{90} < C_u \times D_{50s}$
LOUDIERE e FAYOUX (1982)	Para $C_u > 4$ (solos bem graduados), utilizar: $O_{95} \leq D_{85s}$ Para $C_u \leq 4$ (solos uniformes), utilizar: $O_{95} \leq 0,8 \times D_{50s}$ Para solos coesivos: utilizar os mesmos critérios acima não sendo aceitos valores de O_{95} menores que 50 μm
HERTEEN (1982)	Em solos não coesivos: Para $C_u \geq 5$, utilizar: $O_{90} \leq D_{90s}$ e $O_{90} < 10 \times D_{50s}$, se o solo for bem graduado Para $C_u < 5$, utilizar: $O_{90} \leq D_{90s}$ e $O_{90} < 2,5 \times D_{50s}$, se o solo for mal graduado. Em solos coesivos, sob quaisquer condições: Utilizar: $O_{90} < 10D_{50s}$ e $O_{90} < D_{90s}$ e $O_{90} \leq 0,1$ mm Em condições críticas de solicitação utilizar: $O_{90} < D_{50s}$
FHWA (1995)	Inequação genérica: $AOS < B \times D_{85s}$ Onde: Em condições críticas, utilizar: $B = 1$ Em solos com $D_{50} \geq 0,075$ mm: Utilizar $B = 1$ para $U < 2$ ou $U > 8$ Utilizar $B = 0,5$ para $2 < C_u < 4$ Utilizar $B = 8/U$ para $4 < C_u < 8$ Em solos com $D_{50} < 0,075$ mm, B depende do tipo de geotêxtil: Utilizar $B = 1,8$ Para geotêxteis não-tecidos Utilizar $B = 1,0$ para geotêxteis tecidos Utilizar $AOS < 0,3$ mm para ambos tipos de geotêxteis

A areia argilosa estudada tem granulometria descontínua. Assim caso se desejasse raciocinar em termos de coeficiente de uniformidade (C_u) tem-se um coeficiente muito elevado, superior a 100, já que D_{10} deve ser inferior a 0,002 mm.

Nessas condições, tem-se as seguintes constatações:

SCHOBBER e TEINDL (1979): $O_{90} < (5 \times D_{50s}) = (5 \times 0,19 \text{ mm}) = 0,95 \text{ mm}$ proporciona retenção (verificada em todos os geotêxteis ensaiados).

LOUDIERE e FAYOUX (1982): a condição $O_{95} \leq D_{85s} = 0,5 \text{ mm}$ proporciona retenção (verificada em todos os geotêxteis ensaiados).

HERTEEN (1982): sendo solo não coesivo e $C_u \geq 5$, $O_{90} \leq D_{90s}$ ou $O_{90} < 0,55 \text{ mm}$; $O_{90} < 10 \times D_{50s}$ ou $O_{90} < (10 \times 0,19) = 1,9 \text{ mm}$ (verificada em todos os geotêxteis ensaiados).

Por fim, para FHWA (1995) em condição de solicitação crítica, $AOS < 0,5 \text{ mm}$, o que é atendido para todos os geotêxteis ensaiados.

De fato, a retenção das partículas de solo ocorreu, com as partículas alojando-se na parte mais superior do geotêxtil e depositando-se sobre a sua superfície conforme mostrado nas diversas fotografias obtidas no final dos ensaios. Porém, isto trouxe um grande inconveniente relacionado a drástica redução de permeabilidade do geotêxtil, o que invalidaria sua utilização para a finalidade desejada de proteção da entrada de dispositivos de drenagem superficial.

Isso posto resta verificar se os critérios anti-colmatação estariam atendidos. De acordo com os critérios propostos na Tabela 2.2 por CHRISTOPHER & FISCHER, (1992), em aplicações críticas seriam necessários ensaios de filtração o que foi realizado neste trabalho, embora não seguindo ensaios normatizados. Para aplicações menos severas, os critérios granulométricos constantes na Tabela 2.2 não podem ser usados, pois não foi possível estabelecer D_{15s} e C_u para a areia argilosa. Assim com base nos ensaios de filtração efetuados, verifica-se que os

geotêxteis estudados não conseguem evitar a sua colmatção frente ao solo típico ensaiado. Esta questão é conhecida nas barreiras de sedimentação (*Silt fence*), uma aplicação análoga a que se pretende comprovar neste trabalho, ilustrada pelos exemplos da Figura 2.1. KOERNER (2005) mostra um possível mecanismo de funcionamento dos *silt-fence*, ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 Esquema de funcionamento de uma silt-fence (KOERNER, 2005).

Nota-se a porção inferior do geotêxtil totalmente colmatada, uma região em que a água apresenta-se turva, com sólidos em suspensão, e uma região em que a água limpa flui através da porção superior do geotêxtil. Se nas *silt-fences* isto é

plausível, para as aplicações pretendidas e ilustradas na Figura 2.1 isto é indesejável, visto que proporciona a inundação da área em que se situa a estrutura de drenagem.

Com relação aos resultados com bentonita, nenhum critério de retenção e colmatação disponível podem ser aplicados, dado tratar-se de uma argila. De qualquer maneira, cumpre salientar que a bentonita tem $D_{95} = 0,035$ mm, o que comparado às aberturas de filtração dos geotêxteis ensaiados, implica que toda a bentonita atravessaria o geotêxtil. Obviamente, esta inferência simplista não contempla os efeitos da intensa atividade de superfície das partículas desse solo, nem suas propriedades de tixotropia. Assim, estes efeitos e outras possíveis interferências, levaram a praticamente completa colmatação dos geotêxteis testados, sugerindo que quando mais fino for o solo, mais rápida e intensa será a colmatação de geotêxteis utilizados na filtração de suspensões.

6 CONCLUSÃO E PERSPETIVAS

1. As correlações encontradas entre as propriedades e as características do geossintético mostraram que um aumento da espessura de um geotêxtil se vê refletido, diretamente, no aumento do valor da gramatura e da transmissividade. No entanto, estas propriedades se associaram inversamente com a abertura aparente de filtração, a permissividade e a abertura de filtração até gramaturas da ordem de 400 g/m^2 . A partir dessa gramatura, não se notou uma variação significativa das aberturas de filtração ou da permissividade. Ressalte-se, entretanto, que para as maiores gramaturas ensaiadas, acima de 385 g/m^2 , assumiu-se que a abertura aparente de filtração obtida como método da ASTM foi de $0,053 \text{ mm}$, pois este foi o menor diâmetro disponível para as esferas de vidro usadas no ensaio, resultando que esta abertura deve ser inferior ao valor citado

2. As aberturas de filtração obtidas pelo método da ASTM e pelo método da AFNOR tendem a variar da mesma forma com a espessura ou a gramatura do geotêxtil, porém os valores obtidos usando o método da norma francesa (AFNOR) são aproximadamente 30% maiores que os valores da abertura aparente fornecidos pelo método da ASTM.

3. A areia fina argilosa, solo típico da região de São Carlos, apresenta em sua composição mais de 20% de argila e índice de plasticidade de 15%, sendo um solo não dispersivo. Em geral, os critérios disponíveis na literatura e testados neste trabalho mostram que todos os geotêxteis ensaiados cumprem adequadamente a função de retenção, o que efetivamente se observou nos ensaios. Entretanto, a retenção apenas não garante a manutenção da permeabilidade do geotêxtil. Esta, se viu gravemente afetada, em todos os ensaios, por conta da colmatação do geotêxtil provocada, principalmente, pela deposição de partículas na superfície do geotêxtil. Assim, acontece uma diminuição progressiva do volume de água percolado e o tempo necessário para o desenvolvimento da colmatação mostrou-se afetado pela

concentração da mistura água-solo e também pela gramatura e da abertura de filtração. Independente dessas considerações, o tempo para colmatação foi relativamente pequeno, inferior a 200s, em todos os ensaios efetuados.

4. A bentonita apresenta D_{95} inferior à abertura de filtração de todos os geotêxteis testados. Seria de se esperar que suas partículas atravessassem os geotêxteis, porém isto não ocorreu e as partículas se depositaram no interior da porção superior e sobre a sua superfície do geotêxtil, vindo a colmatá-lo. Interações de superfície da partícula de bentonita e fenômenos de tixotropia podem estar entre as causas do ocorrido.

5. Tanto para a bentonita, quanto para a areia argilosa utilizada nos ensaios, notou-se que, independentemente da percentagem de material argiloso presente, é a fração argilosa a principal responsável por gerar o processo que leva à obstrução dos vazios. Esta ocorre, inicialmente, com a colmatação interna na metade superior do geotêxtil, seguida da deposição de partículas sobre a superfície até o quase completo cegamento do geotêxtil. A rapidez com que o geotêxtil atinge o estado de colmatação depende de maneira significativa da concentração da mistura água-solo.

6. Os geotêxteis utilizados nesta pesquisa apresentam características semelhantes aos encontrados comercialmente. Portanto, o comportamento desfavorável que acontece quando partículas de argila suspensas atravessam a sua estrutura causando entupimento dos poros, sugere que geotêxteis com características próximas dos estudados terão um desempenho insatisfatório, quanto à permeabilidade, quando utilizados como filtro de águas, conduzindo partículas em suspensão nas concentrações ensaiadas. Assim, na eventualidade de sua utilização, deve-se prever uma ascensão do nível de água a montante, como ocorre usualmente nas barreiras de sedimentos ou *silt fences*.

7. Dadas as características granulométricas da bentonita e da areia fina argilosa, não foi possível testar qualquer critério anti-colmatação dentre os que o autor pode encontrar na literatura. Assim, a filtração de suspensões de solo com

geotêxteis demanda estudos adicionais e o desenvolvimento de novos produtos com características mais adequadas para esse propósito, bem como critérios anti-colmatação apropriados. Os resultados, relativamente melhores, encontrados pelos geotêxteis de maior abertura de filtração podem ser um indicador do caminho a trilhar para esses desenvolvimentos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2005). **NBR 15229**: Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da abertura de filtração característica. Rio de Janeiro.
- ABNT (2005). **NBR 15226**: Geossintéticos – Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 14p.
- ABNT (2005). **NBR 15225**: Geossintéticos - Determinação da capacidade de fluxo no plano. Rio de Janeiro.
- ABNT (2005). **NBR 15223**: Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento. Rio de Janeiro.
- ABNT (2003). **NBR 12568**: Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 2p.
- ABNT (2003). **NBR 12553**: Geossintéticos terminologia. Rio de Janeiro.
- ABNT (1995). **NBR 13359**: Geotêxteis – Determinação da resistência ao punçamento estático – Ensaio com pistão tipo CBR. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1995). **NBR 6502**: Rochas e Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1994). **NBR 13134**: Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada de emendas – Ensaio de tração de faixa larga. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1993) **NBR 12824**: Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada– Ensaio de tração de faixa larga. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1992). **NBR 12593**: Amostragem e preparação de corpos de prova de geotêxteis. Rio de Janeiro.
- ABNT (1992). **NBR 12569**: Geotêxteis – Determinação da espessura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP.
- ABNT (1984). **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro.
- ABNT (1984). **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.
- ABNT (1984). **NBR 6508**: Solo – Determinação da Massa Específica dos Sólidos. Rio de Janeiro.

- AFNOR (1983). **NF G38087** Recommandations générales pour la réception et la mise en oeuvre des géotextiles Normes françaises d'essai. Comité Français des Géotextiles et Geomembranes. França.
- AGUIAR & VERTEMATTI (2004) Propriedades, ensaios e normas **VERTEMATTI**. Manual Brasileiro de Geosintéticos ed. Edgar Blucher. 2004 pp.175-198.
- ASTM (2008). **D3786** Standard Test Method for Bursting Strength of Textile Fabrics-Diaphragm Bursting Strength Testes Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2000). **D 5084** Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (1999). **D4751** Standard test for determining apparent opening size of a geotextile. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (1991). **D4533** Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- BEIRIGO, E.A. (2005). Comportamento filtro-drenante de geotêxteis em Barragens de rejeitos de mineração. Dissertação de mestrado-Universidade de Brasília.
- BUENO B.S. e VILAR O. (2004) Propriedades, ensaios e normas **VERTEMATTI**. Manual Brasileiro de Geosintéticos ed. Edgar Blucher. 2004 pp.27-62
- CARROLL, R. G. (1983). **Geotextile filter criteria**. *Transportation Research Record*, 916, 46-53.
- CAULHOUN, C.C (1972). **Development of design criteria and acceptance of specifications for plastic filter cloth**. Technical report 5-72-7, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- CHEN, R.H., HO, C.C., HSU, C.Y., (2008). **The effect of soil fine content on the filtration characteristics of geotextile under cyclic flows**. *Geosynthetics International* 15 (2), 95–106.
- CHRISTOPHER, B.R. & FISCHER, G.R. (1992). **Geotextile filtration principles, practices and problems**. *Geotextiles and Geomembranes*, v.11, n.4-6, p.337-353.
- CHRISTOPHER, B.R. & HOLTZ, R.D (1989). **Geotextile construction and design guidelines**. HI-89-050, prepared for federal Highway Administration, Washington, DC.
- CHRISTOPHER, B.R. & HOLTZ, R.D (1985). **Geotextile engineering manual**. Report No FHWA-TS-86/203, US Federal Highway Administration, Washington, DC.

- COLMANETE, J.P. (2000). **Comportamento de filtros geotêxteis em sistemas de drenagem para resíduos sólidos municipais**.126f., Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2000.
- FARIAS, R.D.J.D.C. (2005). **Utilização de geossintéticos em sistemas de controle de erosões**.188f., Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- FARIAS, R. J. C. (1999). **Utilização de Geossintéticos no Controle de Erosões**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-056A/99, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 120 p
- FAURE, Y.H.; BAUDOUIN, A.; PIERSON, P.; PLÉ, O. (2006). A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids. *Geotextiles and Geomembranes*, v.24, n.1, p.11-20.
- F.H.W.A (1995) **Geosynthetic Desing and Construction Guidelines**. National Highway Institute. Virginia, USA. Pp 460
- FISHER, G. R., CHRISTOPHER , B.R. & HOLTZ , R.D. (1990). **Filter criteria based on pore size distribution**. *In proceedings of the fourth international conference on Geotextiles*. The Hague, The Netherlands , Vol. I. pp 289-94.
- GARDONI, M.G. (1995). Avaliação da aplicabilidade de ensaios de laboratório e critérios de filtros para a utilização de geotêxteis em solos de DF. Dissertação (Mestrado em Geotécnica), Universidade de Brasília, Brasília. DF, 1995.
- GIROUD, J.P. (2010). **Development of criteria for geotextile and granular filters**. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010.
- GIROUD, J.P. (2005). **Quantification of geosynthetic behavior**. *Geosynthetics International*, v.12, n.1 Compendex, p.2-27.
- GIROUD, J.P. (2004) **Criteria for Granular and Geotextile Filters**, IGS News, Vol. 20, No. 3, pp. 12-14.
- GIROUD, J.P. (1982) **Filter criteria for geotextiles**, *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, IFAI, 1982, Las Vegas, NV, USA, Vol. 1, August 1982, pp. 103-108.
- HALIBURTON, T.A., LAWMASTER, J. & MCGUFFEY, V.E. (1982). **Use of engineering fabric in transportation related applications** . FHWA Training Manual-FHWA contract No DTRH-80-C-0094.
- HALIBURTON, T.A. & WOOD, P.D (1982). **Evaluation of the US Army Corps of Engineers gradient radio test for geotextile performance**. *In Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*. Las Vegas, Vol. I. International Fabrics Association International. St Paul, MN, pp 97-102.

- HEERTEN (1982) **Dimensioning the filtration properties of geotextiles considering long-term conditions**. In Proceedings of second international conference on Geotextiles, Las Vegas, NV, Volume I. Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN, pp. 115-20.
- HUTTEN, I.M. (2007). **Handbook of Non-Woven Filter Media**. Elsevier Science & Technology Books.pp 473.
- IGS (2012). **International Geosynthetics Society** Disponível em <<http://www.geosyntheticssociety.org/Resources.aspx>> Acesso em agosto de 2012.
- JUNQUEIRA, F.; SILVA, A.; PALMEIRA E. (2006) Performance of drainage systems incorporating geosynthetics and their effect on leachate properties. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2006) 311–324.
- KALINOVICH, I.; RUTTER, A.; ROWE R. K.; McWATTERS R.; POLAND S. J. (2008). **The application of geotextile and granular filters for PCB remediation**. *Geosynthetics International*, v.15, n3.Compendex, p.173-183.
- KOERNER, R.M. (2005). **Designing with geosynthetics**, 5th Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 796 pp.
- KOERNER, R.M; KOERNER, G.R (1995) **Leachate Clogging Assessment of Geotextile and Soil Landfill Filters**. National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency EPA/600/SR-95/141 Cincinnati, OH.
- KOERNER, G.R.; KOERNER, R.M. (1992). Leachate flow rate behavior through geotextile and soil filters and possible remediation methods. *Geotextiles and Geomembranes*. v.11, n.4-6, p.401-430.
- KOERNER, R. M. (1990). **Designing with Geosynthetics**, 2nd ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs. NJ.
- LASTOW, O., PODGORSKI, A. (1998) **Single Fiber Collection Efficiency** (Chapter 3), *Advances in Aerosol Filtration*, Editor Spurny, K., Lewis Publishers, p. 24.
- LE COQ, (1996). **Mise en oeuvre et modélisation de médias filtrants à base de fibres minérales pour la filtration des huiles en avionique**. Thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique de Grenoble, Ecole Franc-aise de Papeterie et Industries Graphiques de Grenoble, 280p (in French).
- LEE, S.; BOURDEAU, P.L. (2006). **Filter Performance and Design for Highway Drains**. In: P. e-Pubs (Editor), Joint Transportation Research Program. Purdue University, West Lafayette, Indiana.

- LEITE et al (2008) Caracterização estrutural de argilas bentoníticas nacional e importada: antes e após o processo de organofilização para utilização como nanocargas. *Cerâmica* 54 (2008) 303-308.
- LOUDIERE & FAYOUX (1982) **Filtration and Drainage with Geotextiles-Testes and requirements.** Proceedings of the II International Conference on Geotextiles. Las Vegas EUA 1982.
- LUETTICH, S.M.; GIROUD, J.P.; BACHUS, R.C. (1992). **Geotextile filter desing guide.** *Geotextiles and Geomembranes*, v.11, p.355-370.
- MARTINS, P.D.M. (2006). **Utilização de tubos geoêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração**, Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica São José dos Campos, 2006.
- MULLIGAN C. N.; DAVARPANAH N.; FUKUE M.; INOUE T. (2009) Filtration of contaminated suspended solids for the treatment of surface water. *Chemosphere* 74 (2009) 779–786.
- MURTY, A. V. S. R.; MATHUR S.; CHANDRA D.; RAO N. (1994). **Selection of geotextile filters wrapped around pipes in pavement edge drains.** *Geotextiles and Geomembranes*, v.13, n.8, p.519-529.
- NAREJO & KOERNER (1992). **A Dynamic Filtration Test for Geotextile Filters.** *Geotextiles and Geomembranes* 11, (1992) 395-400.
- PALMEIRA, E.M.; BEIRIGO, E.A. & GARDONI, M.G. (2010). **Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications.** *Geotextiles and Geomembranes*, v.28, n.2, p.136-148.
- PALMEIRA E. M.; REMIGIO A. F. N.; RAMOS M. L. G.; BERNARDES R.S. (2008). **A study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow.** *Geotextiles and Geomembranes* 26 (2008) 205–219.
- PALMEIRA, E.M.; FANNIN, R.J. (2002). **Soil-Geotextile Compatibility Keynote Lectures.** In: International Conference on Geotextiles, 7th., Geomembranes and Related Products, Nice, França. Pp. 853-864.
- PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M.G.; BESSA DA LUZ. (2005). **Soil–geotextile filter interaction under high stress levels in the gradient ratio test.** *Geosynthetics International* v.12, n.4, 162–175.
- PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M.G.A. (2000). **Geotextiles in filtration: a state of the art review and remainig challenges**, International Symposium on Geosyntetics an Geotechnical and Geoenviromental Engineering. Association with GeoEng2000, Melbourne, pp. 85-.
- RANKILOR, P.R. (1985). **The specification and use of geotextile fin drains.** *Geotextiles and Geomembranes*, v.2, n.2, p.129-149.

- SANSONE, L.J.; KOERNER, R.M. (1992). **Fine fraction filtration test to assess geotextile filter performance**. Geotextiles and Geomembranes, v.11, n.4-6, p.371-393.
- SATO, M.; YOSHIDA, T.; FUTAKI, M. (1986). **Drainage performance of geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes, v.4, n.3-4, p.223-240.
- SAXENA, S.K.; HSU, T.S. (1986). **Permeability of geotextile-included railroad bed under repeated load**. Geotextiles and Geomembranes, v.4, n.Compendex, p.31-51.
- SCHOBBER.W. & TEINDL, H. (1979). **Filter criteria for geotextiles**. In Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol. 2. Pp. 123-9.
- SHUCJMANN, O.S. (2010). **Estudo da viabilidade técnica de utilização de geotêxteis não-tecidos para filtração da água da chuva**, (Monografia) Engenharia ambiental, Universidade de São Paulo São Carlos 2010.
- SILVEIRA, C. (2005). **Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis**, tese mestrado Engenharia de estrutura aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2005.
- VERTEMATTI J.C. (2004). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. Editorial Edgard Blücher, 1ed, São Paulo, Brasil: 413 p.
- VIDAL, M.D. (1990). **Geotêxtil: Propriedades e ensaios**. In: M.T.G. Bidim (Editor).
- VIVIANI, E. (1992). **Estudo experimental da curva de distribuição de vazios nos geotêxteis não-tecidos**, Dissertação (Mestrado em Transportes), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992
- WILLIAMS, N.D.; ANWAR ABOUZAKHM, M. (1989). **Evaluation of geotextile/soil filtration characteristics using the hydraulic conductivity ratio analysis**. Geotextiles and Geomembranes, v.8, n.1, p.1-26.
- WILLIAMS, N.D.; LUNA, J. (1987). **Selection of geotextiles for use with synthetic drainage products**. Geotextiles and Geomembranes, v.5, n.1, p.45-61.
- WU C.; HONG Y.; YAN Y.; CHANG B. (2006). **Soil-nonwoven geotextile filtration behavior under contact with drainage materials**. Geotextiles and Geomembranes, v.24, p.1-10.
- XIAO, M.A.; REDDI, L.N. (2000). 1984, **Advances in Transportation and Geoenviromental Systems Using Geosynthetics**, Proceeding Geo-Denver 2000, pp. 176-185.

YAMAN, C., MARTIN, J. P. & KORKUT, E. (2006). **Effects of wastewater filtration on geotextile permeability**. Geosynthetics International, 13, No. 3, 87–97.