

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

**COMPORTAMENTO DE FILTROS GEOTÊXTEIS EM SOLOS
INTERNAMENTE INSTÁVEIS SOB CONFINAMENTO**

DELLANE STEPHANI CARVALHO DOS SANTOS

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-398/2023

BRASÍLIA – DF: 16 DE AGOSTO DE 2023

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

**COMPORTAMENTO DE FILTROS GEOTÊXTEIS EM SOLOS
INTERNAMENTE INSTÁVEIS SOB CONFINAMENTO**

DELLANE STEPHANI CARVALHO DOS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

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

GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS, DSc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 DE AGOSTO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, DELLANE STEPHANI CARVALHO DOS

Comportamento de filtros geotêxteis em solos internamente instáveis sob confinamento. [Distrito Federal] 2023.

xxiii, 117 p.; 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|---------------------------------|--------------|
| 1. Geotêxteis não tecidos | 3. Filtração |
| 2. Solos internamente instáveis | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, D.S.C (2023). Comportamento de filtros geotêxteis em solos internamente instáveis sob confinamento. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-398/2023, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Dellane Stephani Carvalho dos Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento de filtros geotêxteis em solos internamente instáveis sob confinamento

GRAU / ANO: Mestre / 2023.

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

Dellane Stephani Carvalho dos Santos

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia.
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12.
CEP: 70910-900. Brasília/DF - Brasil.

stephanidscs@gmail.com

*“Dedico essa dissertação a minha mãe
por toda essa conquista”.*

AGRADECIMENTOS

Durante esses dois anos de muita dedicação, estudos e muito esforço para concluir a presente dissertação de mestrado, não poderia deixar de aproveitar esta oportunidade para expor e registrar que não estive sozinha e o quanto sou grata pelo precioso apoio de várias pessoas que estiveram presentes nessa minha jornada.

Em primeiro lugar, destaco minha gratidão ao meu orientador, Professor Ennio Palmeira, não só por ter me aceitado como sua orientanda, mas também pela maneira como me conduziu na realização da pesquisa. Sempre com muita paciência, praticidade e sabedoria. Agradeço a Capes pelo financiamento da pesquisa e aos fabricantes dos geossintéticos utilizados nos ensaios de laboratório.

Agradeço também a colaboração das equipes técnicas dos laboratórios onde foi realizada a pesquisa. Desejo agradecer a companhia de colegas que alegraram meu dia a dia. Agradeço todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu trabalho. Por fim, agradeço minha mãe, Keila Carvalho, por estar sempre comigo, me incentivando e acreditando em mim.

O estudo investigou o comportamento filtrante do geotêxtil não tecido com solo internamente instável sob condições de confinamento. Foram realizados ensaios de permeabilidade sob carga constante utilizando um permeâmetro equipado com um dispositivo para carregamento vertical. Os geotêxteis não tecidos tinham massa por unidade de área de 200, 400 e 600 g/m², e o solo era composto por areia com diferentes percentagens de material fino (0, 10, 20 e 40%) e as tensões verticais aplicadas foram de 0, 25 e 100 kPa. Os materiais drenantes sob o filtro geossintético foram esferas de aço de 15 mm de diâmetro, com razões entre espaçamento (s) e diâmetro da esfera (d) iguais a 1 ou 2, ou apenas a uma placa perfurada. Uma série de testes de filtração foram conduzidos sob gradientes hidráulicos de 1 e 10. Os resultados foram discutidos em termos de coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil (k_{sg}). Ao final dos ensaios, as curvas granulométricas do material na base da amostra de solo, impregnado e passante pelo filtro geotêxtil foram obtidas utilizando um granulômetro a laser. Além disso, foram obtidos os graus de impregnação dos geotêxteis para todos os ensaios após os testes de permeabilidade e foram realizados ensaios de permeabilidade no geotêxtil de 200 g/m² após ensaios de filtração. Ensaios com amostras de areia + 40% de finos com 50, 100 e 150 mm de altura foram executados a fim de avaliar se a altura do corpo de prova influenciava no comportamento filtrante no sistema solo-geotêxtil. Os afundamentos dos geotêxteis nos espaços vazios entre as esferas também foram medidos. Observou-se que as tensões verticais no topo das amostras, a elevação do gradiente hidráulico, o aumento da gramatura do geotêxtil e os ensaios com apenas a placa perfurada sob o geossintético tenderam a reduzir a permeabilidade do sistema solo-geotêxtil. O aumento do espaçamento entre as esferas diminuiu o k_{sg} e favoreceu a formação de uma camada de cegamento sobre o filtro.

The study investigated the filtering behavior of non-woven geotextiles in internally unstable soil under confinement. Permeability tests were carried out under constant head conditions using a permeameter equipped with a device for the application of vertical stresses. The non-woven geotextiles tested had masses per unit area of 200, 400 and 600 g/m², and the soil was composed of sand with different percentages of fine material (0, 10, 20 and 40%) and the applied vertical stresses were 0, 25 and 100 kPa. The drainage materials under the geosynthetic filter were steel spheres of 15 mm in diameter, with ratios between spacing (s) and sphere diameter (d) equal to 1 or 2, or just a perforated plate. A series of filtration tests was conducted under hydraulic gradients of 1 and 10. The results were discussed in terms of the permeability coefficient of the soil-geotextile system (k_{sg}). At the end of the tests, the grain size distribution curves of the material at the base of the soil sample and of the material that impregnated or passed through the geotextile filter were obtained using a laser grain size analyser. In addition, the degrees of impregnation of the geotextiles were obtained after the permeability tests and permeability tests were also performed on the 200 g/m² geotextile after filtration tests. Tests with samples of sand + 40% of fines with 50, 100 and 150 mm height were performed in order to evaluate whether the height of the specimen influenced the filter behavior. Sagging of the geotextiles in the void spaces between the spheres were also assessed. It was observed that the vertical stress at the top of the samples, the hydraulic gradient, the increase in the mass per unit area of the geotextile and the tests with only the perforated plate under the geosynthetic tended to reduce the permeability of the soil-geotextile system. Increasing the spacing between the spheres decreased k_{sg} and favoured the formation of a blinding layer on the filter surface.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	HISTÓRIA DOS GEOSSINTÉTICOS	4
2.2	TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS	5
2.2.1	GEOTÊXTEIS	7
2.3	APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	9
2.4	FILTROS CONVENCIONAIS VERSUS FILTROS GEOSSINTÉTICOS	10
2.5	FATORES QUE INFLUÊNCIAM O COMPORTAMENTO FILTRANTE DE GEOTÊXTEIS	11
2.6	EXEMPLOS DE DESEMPENHOS DE FILTROS GEOTÊXTEIS	13
2.6.1	AFUNDAMENTO DO GEOTÊXTIL NO MATERIAL DRENANTE	15
2.7	CRITÉRIOS DE FILTRO	17
2.7.1	INTRODUÇÃO	17
2.7.2	CRITÉRIO DE RETENÇÃO	19
2.7.3	CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE	21
2.7.4	SOLOS INTERNAMENTE INSTÁVEIS	22
3	ENSAIOS E MATERIAIS	26
3.1	ENSAIOS	26
3.1.1	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE	27
3.1.2	GRANULOMETRIA A LASER	33
3.1.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E ENSAIO ICP – OES	34
3.2	MATERIAIS	35
3.2.1	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO	35
3.2.2	MATERIAL DRENANTE	36
3.2.3	AREIA	37
3.2.4	AREIA MAIS SOLO FINO	38
	CAPÍTULO 4	42
4	METODOLOGIA DA PESQUISA	42

4.1	PREPARAÇÃO DO PERMEÂMETRO	42
4.2	PREPARAÇÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO	42
4.3	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA	43
4.4	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA MAIS SOLO FINO	47
4.5	PREPARAÇÃO DO ARRANJO DE ESFERAS DE AÇO	49
4.6	GRAU DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL	50
4.7	AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL	51
CAPÍTULO 5		53
5	RESULTADOS	53
5.1	AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE INTERNA DAS AMOSTRAS	53
5.2	ENSAIO DE FILTRAÇÃO EM SISTEMAS SOLO – GEOTÊXTIL	54
5.2.1	INFLUÊNCIA DA TENSÃO VERTICAL	54
5.2.2	INFLUÊNCIA DO MATERIAL DRENANTE	57
5.2.3	INFLUÊNCIA DA GRAMATURA DOS GEOTÊXTEIS	58
5.2.4	INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE ESFERAS DE AÇO	59
5.2.5	ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DO SOLO APÓS OS ENSAIOS	60
5.2.6	PERMEABILIDADE DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO	66
5.2.7	ANÁLISE DO GRAU DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL	67
5.3	INFLUÊNCIA DA ALTURA DAS AMOSTRAS	71
5.4	ANÁLISE DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE SUBJACENTE	74
CAPÍTULO 6		76
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
6.1	CONCLUSÕES	76
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de geossintéticos (modificado de ABINT, 2001)	8
Figura 2.2. Fabricação dos geotêxteis não tecidos cardados agulhados (ABINT, 2001)	9
Figura 2.3. Fabricação dos geotêxteis tecidos (ABINT, 2001)	9
Figura 2.4. Tipos de geotêxtil a) Não tecido, b) Tecido, c) Tricotado (Gourc, 2008)	10
Figura 2.5. Dreno longitudinal utilizando geotêxtil como elemento filtrante, a) Ferrovia; b) Rodovia (ABINT, 2001; Bidim, 1991)	10
Figura 2.6. Seção esquemática de muro de contenção em solo reforçado (ABINT, 2001)	11
Figura 2.7. Filtro Granular x Filtro Geotêxtil (modificado de Palmeira, 2022)	12
Figura 2.8. Mecanismos de colmatção física de um geotêxtil (modificado de Palmeira & Fannin, 2002)	14
Figura 2.9. Seção transversal do sistema solo-geotêxtil-drenagem (modificado de Wu <i>et al.</i> , 2006)	17
Figura 2.10. Solo com $C_u \leq 3$ (a); solo com $C_u > 3$ (b) (Giroud, 2010)	25
Figura 2.11. Método de descrição da forma da curva granulométrica (modificado de Kenney & Lau, 1985)	26
Figura 3.1. Esquema do ensaio de filtração	30
Figura 3.2. Permeâmetro (Tatto, 2010)	31
Figura 3.3. Sistema para colocação de solo subjacente ao filtro geotêxtil (Tatto, 2010)	32
Figura 3.4. Componentes do permeâmetro	32
Figura 3.5. Cilindro de gás nitrogênio e interface óleo-gás	32
Figura 3.6. Granulômetro a laser	36
Figura 3.7. Amostras preparadas para <i>DFR-X</i> em pó	36
Figura 3.8. Agitação das misturas	37
Figura 3.9. Geotêxteis não tecidos de 200, 400 e 600 g/m ²	38
Figura 3.10. Esferas de aço de 15 mm de diâmetro	39
Figura 3.11. Detalhe da placa perfurada: (a) vista do lado inferior; (b) vista lado superior	39

Figura 3.12. Curva granulométrica da areia	40
Figura 3.13. Curvas granulométricas dos materiais sem defloculante (<i>SD</i>)	42
Figura 3.14. Curvas granulométricas dos materiais com defloculante (<i>CD</i>)	42
Figura 4.1. Colocação do filme plástico nas face interna do permeâmetro	44
Figura 4.2. Malha de geotêxtil não tecido para recorte de quadrados de 250 x 250 mm	45
Figura 4.3. Quadrados selecionados pela gramatura	45
Figura 4.4. Geotêxtil não tecido 200 g/m ² com selante elástico, <i>s/d</i> = 1	46
Figura 4.5. Deposição da areia no permeâmetro	47
Figura 4.6. Peça de acrílico e medição da altura da amostra com paquímetro	47
Figura 4.7. Pluviação submersa (Tatto, 2010)	48
Figura 4.8. Deposição de Lama (modificado de ASTM, 2017a)	50
Figura 4.9. Espaçamento entre as esferas de aço	51
Figura 4.10. Arranjo das esferas de aço com <i>s/d</i> = 2	52
Figura 4.11. Área de impregnada no geotêxtil, a) Placa perfurada; b) <i>s/d</i> = 1; c) <i>s/d</i> = 2	53
Figura 4.12. a) Medição do afundamento do geotêxtil na folha de alumínio, e b) dispositivo para medição	53
Figura 4.13. Pontos para medição do afundamento da folha metálica nos espaços entre as esferas	54
Figura 5.1. Coordenadas para construção do gráfico de estabilidade interna	55
Figura 5.2. Verificação da estabilidade interna das amostras de areia e misturas por Kenney & Lau (1985)	56
Figura 5.3. Permeabilidade do sistema solo – geotêxtil versus tensão vertical no GNT200 e 400	58
Figura 5.4. Influência da porcentagem de finos (%) em função da tensão vertical.	59
Figura 5.5. Influência das esferas de aço (<i>s/d</i> = 1) e placa perfurada com GNT200: a) <i>i</i> = 1; b) <i>i</i> = 10	60
Figura 5.6. Influência da diferença de carga hidráulica na permeabilidade do geotêxtil (<i>k_{gnt}</i>) após ensaios de filtração em sistemas com 10, 20 e 40% de finos	69
Figura 5.7. Grau de impregnação nas amostras de areia e GNT200, <i>s/d</i> = 1	69
Figura 5.8. Grau de impregnação nas amostras de areia + 10% finos e GNT200, <i>s/d</i> = 1	70

Figura 5.9. Grau de impregnação nas amostras de areia + 20% finos e GNT200, $s/d = 1$	71
Figura 5.10. Grau de impregnação nas amostras de areia + 40% finos e GNT200, $s/d = 1$	71
Figura 5.11. Grau de impregnação em função da massa por unidade de área do geotêxtil com 25 kPa, esferas de aço e $s/d = 1$	72
Figura 5.12. Grau de impregnação nas amostras de areia + 40% finos e GNT200, 400 e 600, $s/d = 2$	72
Figura 5.13. Grau de impregnação do GNT200 sobre esferas de aço em função da altura da amostra para $i = 1$	75
Figura 5.14. Afundamento da folha de alumínio com GNT200 e aplicação de 100 kPa, a) $s/d = 1$ e b) $s/d = 2$	76
Figura C.1. Teste de repetibilidade dos ensaios de permeabilidade no sistema solo – geotêxtil	91
Figura D.1. Influência do tempo nos ensaios com esferas e $i = 1$	92
Figura F.1. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 1$, 0 kPa, $i = 1$	95
Figura F.2. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 1$, 25 kPa, $i = 1$	95
Figura F.3. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 2$, 25 kPa, $i = 1$	96
Figura F.4. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 2$, 100 kPa, $i = 1$	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores típicos de gradiente hidráulico no solo próximo ao filtro (Giroud, 2010)	19
Tabela 2.2. Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Gardoni & Palmeira, 2002)	21
Tabela 2.3. Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Gardoni & Palmeira, 2002)	23
Tabela 3.1. Ensaio com geotêxtil não tecido de 200 g/m ² e $s/d = 1$	27
Tabela 3.2. Ensaio com geotêxtil não tecido de 400 g/m ² e $s/d = 1$	27
Tabela 3.3. Ensaio com geotêxtil não tecido de 600 g/m ² e $s/d = 1$	28
Tabela 3.4. Ensaio com geotêxteis não tecidos e $s/d = 2$	28
Tabela 3.5. Ensaio para medição do afundamento do geotêxtil nas esferas de aço	28
Tabela 3.6. Componentes do ensaio de filtração	29
Tabela 3.7. Características dos geotêxteis não tecidos dados pelo fabricante ...	37
Tabela 3.8. Características granulométricas da areia	39
Tabela 3.9. Caracterização do solo fino	39
Tabela 3.10. Características dos materiais sem e com defloculante	41
Tabela 3.11. Resultados dos ensaios de <i>ICP-OES</i>	42
Tabela 5.1. Verificação da estabilidade das amostras por meio do método de Burenkova (1993)	55
Tabela 5.2. Influência da massa por unidade de área gramatura do geotêxtil com $s/d = 1$ no valor de k_{sg} (cm/s)	60
Tabela 5.3. Influência do espaçamento entre as esferas de aço com areia + 40% de finos na permeabilidade do k_{sg} , $i = 1$	61
Tabela 5.4. Diâmetros das partículas de areia do topo, meio e base, e $s/d = 1...$	61
Tabela 5.5. Diâmetros das partículas das amostras após os ensaios com GNT200 e $s/d = 1$	62
Tabela 5.6. Resultados dos ensaios após estabilização da permeabilidade no conjunto solo – geotêxtil 400 g/m ² e $s/d = 1$	64
Tabela 5.7. Resultados dos ensaios após estabilização da permeabilidade no conjunto solo – geotêxtil 600 g/m ² e $s/d = 1$	65

Tabela 5.8. Diâmetro das partículas de solo nos conjuntos solo – geotêxtil 200, 400 e 600 g/m ² e $s/d = 2$	66
Tabela 5.9. Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil não tecido de 200 g/m ² e $\Delta h = 10$ mm	67
Tabela 5.10. Coeficientes de permeabilidade da areia + 40% de finos, GNT200, $i = 1$ e $s/d = 1$	72
Tabela 5.11. Resultados de Razão entre Gradientes (GR) e k_R , com areia + 40% de finos, GNT200, $i = 1$ e $s/d = 1$	73
Tabela 5.12. Afundamentos, em média, para o grupo de pontos 2 e 3	75
Tabela A.1 – Ensaio de permeabilidade com solo – geotêxtil	86
Tabela B.1. Características das amostras dos ensaios de filtração com 200 g/m ² e $s/d = 1$	88
Tabela B.2. Características das amostras dos ensaios de filtração com 400 g/m ²	89
Tabela B.3. Características das amostras dos ensaios de filtração com 600 g/m ²	89
Tabela B.4. Características das amostras dos ensaios de filtração com 200, 400 e 600 g/m ² e $s/d = 2$	89
Tabela E.1. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT200	92
Tabela E.2. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT400	92
Tabela E.3. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT600	92
Tabela G.1. Afundamentos nas direções x e y, com esferas no $s/d = 2$, e GNT200	96
Tabela G.2. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 2$, e GNT400	96
Tabela G.3. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 2$, e GNT600	96
Tabela G.4. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 1$, e GNT200	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

A	Área da seção transversal da amostra de solo
A_i	Área impregnada (em planta) da amostra de geotêxtil
A_t	Área total da amostra de geotêxtil
A_A	Área do geotêxtil com adesivo selante
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Caulinita
$Al(OH)_3$	Gibbsita
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Nãotecidos e Tecidos Técnicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
B	$f(n, C_c, C_u, C'_u, D, I_D)$
CaO	Óxido de cálcio
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
C_u	Coefficiente de uniformidade do solo
C'_u	Coefficiente de uniformidade modificado do solo
CAIQ	Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília
CD	Com defloculante
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
D	Diâmetro dos grãos do solo base
D_c	Diâmetro crítico de sufusão
D_n	n % das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele
D_{10}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante em peso
D_{15}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passante em peso
D_{30}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
D_{50}	Diâmetro médio dos grãos
D_{50f}	Fração de partículas do solo menores que o valor de Of do geotêxtil
D_{60}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 60% passante em peso
D_{85}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passante em peso
D_{90}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 90% passante em peso
D_{95}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 95% passante em peso

D_I	Tamanho indicativo de solo de base protegido
D_G	Tamanho mínimo do solo
D_Y	Partícula do solo correspondente a “Y” por cento passando
$D'Y$	Partícula de solo correspondente a “Y” por cento passando obtida através de uma linha reta passando na parte central da curva granulométrica
d	Diâmetro das esferas de aço
DRX	Difração de Raio – X
D_s	Densidade da amostra dentro do permeâmetro
D_{sf}	Densidade da amostra de areia mais solo fino
D_{20t}	Diâmetro de 20% das partículas passante no topo da amostra
D_{20m}	Diâmetro de 20% das partículas passante no meio da amostra
D_{20b}	Diâmetro de 20% das partículas passante na base da amostra
D_{95p}	Diâmetro de 95% das partículas que atravessam o filtro geotêxtil
D_{85p}	Diâmetro de 85% das partículas que atravessam o filtro geotêxtil
D_{85b}	Diâmetro de 85% das partículas na base do filtro geotêxtil
D_{85i}	Diâmetro de 85% das partículas impregnadas no filtro geotêxtil
D_{95i}	Diâmetro de 95% das partículas impregnadas no geotêxtil
EVA	Etil Vinil Acetato
e	Índice de vazios
ei_{real}	Índice de vazios inicial da amostra considerando o Wsd_{real}
ef_{real}	Índice de vazios final da amostra considerando o Wsd_{real}
F	Porcentagem de passagem de partículas em um determinado diâmetro D
Fe_2O_3	Hematita
GCL	Geocompostos argilosos
GNT	Geotêxtil Não Tecido
$GNT200$	Geotêxtil Não Tecido na gramatura de 200 g/m ²
$GNT400$	Geotêxtil Não Tecido na gramatura de 400 g/m ²
$GNT600$	Geotêxtil Não Tecido na gramatura de 600 g/m ²
GR	Razão entre Gradientes
GR_{ASTM}	Razão entre Gradiente da ASTM D5101 (2017a)
GR_{mod}	Razão entre Gradiente Modificada
GR_{3mm}	Razão entre Gradiente proposto por Gardoni (2000)
$GH21$	GNT400 no catálogo do fabricante Ober
$GH31$	GNT600 no catálogo do fabricante Ober

g	Gramas
H	Porcentagem de passagem de partículas entre D e 4D
Hp	Altura da parte superior do permeâmetro
<i>HRB</i>	<i>Highway Research Board</i>
hn	Altura da água no piezômetro conectado em determinada porta lateral do permeâmetro
I_D	Densidade relativa
<i>IGS</i>	<i>International Geosynthetic Society</i>
ICP – OES	Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente
i	Gradiente hidráulico
i_s	Gradiente hidráulico no solo próximo ao filtro
$i_{9/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 9 e 12
$i_{7/9}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 7 e 9
$i_{10/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 10 e 12
$i_{11/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 12
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
k_f	Coefficiente de permeabilidade do filtro geotêxtil
k_s	Coefficiente de permeabilidade do solo
k_{sg}	Coefficiente de permeabilidade do sistema solo–geotêxtil
k_R	Razão entre coeficientes de permeabilidade
kn	Permeabilidade normal a um determinado meio
k_{20}	Permeabilidade na temperatura 20°C
k_t	Permeabilidade na temperatura do ensaio
$kgnt$	Permeabilidade do espécime de geotêxtil
$k_{s,3-4}$	Permeabilidade do solo entre as portas 3 e 4 do permeâmetro
$k_{s,3-5}$	Permeabilidade do solo entre as portas 3 e 5 do permeâmetro
kN	Quilonewton
kN/m	Quilonewton/metro
kPa	Quilopascal
$KAlSi_3O_8$	Microcline
L	Altura da amostra de solo
li	Altura medida com o paquímetro
M	Afundamento obtido pelo paquímetro
M_A	Massa por unidade de área do geotêxtil
MgO	Óxido de magnésio

<i>ml</i>	Mililitro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>M_w</i>	Massa de água
<i>M_d</i>	Massa da amostra seca
<i>M_s</i>	Massa da amostra seca dentro do permeâmetro
<i>M_{re}</i>	Massa da mistura restante
<i>msi</i>	Massa de solo impregnada
<i>mf</i>	Massa de filamentos da amostra de geotêxtil
<i>m₃</i>	Massa do geotêxtil + adesivo selante + solo impregnado
<i>m₂</i>	Massa do geotêxtil virgem + adesivo selante
<i>Na₂O</i>	Óxido de sódio
<i>n_{GT}</i>	Porosidade do geotêxtil
<i>NBR</i>	Norma Técnica
<i>O_f</i>	Abertura de filtração
<i>O₉₅</i>	Tamanho da abertura igual ao tamanho da abertura de filtração
<i>O₅₀</i>	Diâmetro do poro para o qual 50% dos poros são menores
<i>PE</i>	Polietileno
<i>PET</i>	Poliéster
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>PR</i>	Parafuso de Regulagem
<i>RT-10</i>	GNT200 no catálogo do fabricante Mexichem Bidim Ltda.
<i>s</i>	Espaçamento entre as esferas de aço
<i>seg</i>	Segundos
<i>SUCS</i>	Sistema Unificado de Classificação de Solos
<i>SP-SM</i>	Areia mal graduada com silte
<i>SD</i>	Sem defloculante
<i>SiO₂</i>	Quartzo
<i>t</i>	Tempo
<i>t_{GT}</i>	Espessura do geotêxtil
<i>tp</i>	Espessura da placa de acrílico perfurada
<i>tl</i>	Espessura da lâmina de aço
<i>TiO₂</i>	Dióxido de titânio
<i>VC</i>	Válvula que permite saída de gás
<i>V</i>	Volume de água

W_{sd}	Massa seca da amostra
W_{sd_real}	Massa seca da amostra depois de 24h na estufa
W_{fws}	Massa do frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia
W_{fwsf}	Massa do frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia final
λ	Impregnação
ψ	Permissividade
Δh	Perda de carga
μ_t	Viscosidade da água na temperatura do ensaio
μ_{20}	Viscosidade da água na temperatura 20°C
ρ_s	Massa específica dos grãos
δ_{max}	Afundamento máximo do geotêxtil

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 Critério de retenção do geotêxtil.....	18
Equação 2.2 Critério de permeabilidade geotêxtil.....	20
Equação 2.3 Permissividade	21
Equação 2.4 Método de Burenkova	24
Equação 3.1 Coeficiente de permeabilidade	30
Equação 3.2 Coeficiente de permeabilidade corrigido com a temperatura de 20°C	31
Equação 3.3 Razão entre os coeficientes de permeabilidade	31
Equação 3.4 GR_{ASTM}	31
Equação 3.5 GR_{mod}	32
Equação 3.6 GR_{3mm}	32
Equação 4.1 Cálculo da altura da amostra no permeâmetro	44
Equação 4.2 Massa seca da amostra	44
Equação 4.3 Índice de vazios da amostra	45
Equação 4.4 Densidade da amostra dentro do permeâmetro	45
Equação 4.5 Massa de água	45
Equação 4.6 Massa da amostra seca dentro do permeâmetro	45
Equação 4.7 Densidade da amostra de areia mais solo fino	47
Equação 4.8 Grau de impregnação	48
Equação 4.9 Massa de solo impregnada	48
Equação 4.10 Massa de filamentos da amostra de geotêxtil	48
Equação 4.11 Área impregnada da amostra de geotêxtil	49
Equação 4.12 Cálculo do afundamento máximo	50

1 INTRODUÇÃO

Os filtros geossintéticos são empregados há décadas em diversas atividades na engenharia geotécnica e para proteção ambiental. Nesse contexto, pesquisas sobre o comportamento filtrante e drenante de geossintéticos sob confinamento são importantes para poder ampliar seu emprego em grandes obras de engenharia (Gardoni & Palmeira, 2002).

A estabilidade hidráulica interna de um material implica na não migração de suas partículas mais finas quando submetidas a agentes perturbadores como o fluxo d'água. Caso contrário, o solo apresentará comportamento instável. Com isso, solos internamente instáveis são materiais cujas percentagens das frações fina e grossa são maiores que a da fração média (Kenney & Lau, 1985). Assim, é necessário que o projeto de filtro atenda a critérios essenciais, como o de retenção, para evitar a perda dos grãos e o desenvolvimento de uma erosão interna progressiva. Além disso, deve-se também atender ao critério de permeabilidade para impedir o surgimento de excessos de poropressão no solo, o que pode instabilizar a obra.

Nos filtros verticais convencionais, o processo executivo é mais complicado que nos filtros geotêxteis pela necessidade de construir camadas verticais de materiais não coesivos em trincheiras drenantes, por exemplo. Assim, a ideia do filtro geotêxtil é substituir a camada de transição convencional em filtros granulares e atuar como um filtro para o solo base.

Entretanto, o geotêxtil que envolve uma vala preenchida com material granular graúdo para sistema de drenagem tem difícil processo de reparação ou substituição durante o período de serviço da obra. Como resultado, a principal preocupação para um geotêxtil usado como camada de filtro é seu desempenho a longo prazo em termos de permeabilidade e prevenção de colmatção (Du *et al.*, 2022).

Os produtos sintéticos reúnem vantagens como i) possibilitar a utilização de solos inicialmente considerados inadequados para obra; ii) possuir instalação fácil, rápida e de baixo custo; iii) ocupar um menor espaço; e iv) contribuir para um menor impacto

ambiental, pois evita a exploração de regiões onde o material natural seja escasso ou seu uso é proibido por razões ambientais. Dessa forma, é possível um maior controle de qualidade junto com o aumento da produtividade na obra (menores prazos de execução) e menor impacto ambiental.

Frischknecht *et al.* (2012) reportam que um filtro geotêxtil pode reduzir em mais de 90% alguns impactos ambientais em relação a filtros granulares, tais como a acidificação, eutrofização, emissão de gases que contribuem para o aquecimento global, consumo de energia não renovável e renovável e consumo de água.

Em vista do exposto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento filtrante do conjunto geotêxtil não tecido com solos internamente instáveis sob condições de confinamento. As interações entre amostras de areia com diferentes porcentagens de solo fino e geotêxteis não tecidos com gramaturas diversas foram analisados sob diferentes gradientes hidráulicos e sob tensões verticais representativas de obras.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é analisar o comportamento filtrante de geotêxteis em solos internamente instáveis.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho dos geotêxteis quando submetidos à possibilidade de cegamento nos ensaios com misturas de areia com 0, 10, 20 e 40% de material fino;
- Obter os tamanhos dos grãos na base da amostra, impregnados e passantes pelo geotêxtil e como esses se correlacionam com a abertura de filtração do mesmo;
- Analisar a influência das tensões verticais, gradientes hidráulicos, massa por unidade de área do geotêxtil não tecido e material drenante sob o geossintético no comportamento solo-filtro; e
- Avaliar os afundamentos sofridos pelo filtro geotêxtil devido à intrusão nos vazios do material drenante subjacente.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos e uma seção de anexos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação em capítulos.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica necessária para a elaboração da pesquisa, abordando assuntos como as vantagens dos filtros geotêxteis, as principais influências para seu comportamento filtrante, os exemplos de desempenho de filtros geotêxteis, os critérios de filtro, e os aspectos relevantes sobre os solos internamente instáveis.

O Capítulo 3 apresenta os ensaios e os materiais utilizados na dissertação.

O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para preparação das amostras de areia com a técnica de pluviação submersa, e para as amostras de areia mais solo fino com a técnica de deposição de lama (ou *slurry method*, em inglês). Além da preparação do equipamento e geotêxteis para os ensaios, são apresentados os cálculos para obtenção do afundamento do geotêxtil entre elementos de material subjacente consistindo em camada de esferas de aço.

O Capítulo 5 expõe os resultados para cada análise, tais como a influência do gradiente hidráulico, material drenante sob o geotêxtil, tensão vertical, massa por unidade de área e o espaçamento entre as esferas de aço. O grau de impregnação do geotêxtil e a sua abertura de filtração também foram analisados.

No Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

Ao final da dissertação, os apêndices apresentam os dados obtidos em ensaios realizados com gráficos e tabelas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a base teórica para o desenvolvimento da dissertação em concordância com os objetivos.

2.1 HISTÓRIA DOS GEOSINTÉTICOS

A Era dos Geossintéticos começou com o progresso da indústria petroquímica ao final da Segunda Guerra Mundial. Na década de 50, a função filtrante dos geotêxteis foi notada para proteção antierosiva em obras hidráulicas em alguns países. Em 1953, na Holanda, ventos fortes e a ação das ondas provocaram o rompimento de vários diques que inundaram muitas regiões e resultou na morte de 1850 pessoas. Por esta razão, o Projeto Delta foi criado para reconstrução dos diques de proteção e utilizou 10 milhões de metros quadrados de mantas têxteis (Vertematti, 2015).

Na década de 60, os geotêxteis foram usados como elemento separador e de reforço entre materiais com características mecânicas e físicas diferentes, principalmente em obras viárias. Nessa época, a indústria europeia dos materiais têxteis se reestruturou e iniciou o uso dos geotêxteis não tecidos na Europa (ABINT, 2001).

A década de 70 foi marcada com o início da Era dos Geossintéticos no Brasil, com a primeira aplicação de geotêxtil não tecido em 1971. Um exemplo de obra de drenagem nessa década foi a da Rodovia dos Bandeirantes, que une dois pólos econômicos, São Paulo-SP e Campinas-SP. A rodovia foi construída em 1978 e utilizou cerca de um milhão de metros quadrados de geotêxtil em ambas as pistas em toda drenagem profunda. Com o desgaste sofrido ao longo dos anos por conta do intenso tráfego, a via passou por reparo em 1991 empregando elemento filtrante geotêxtil entre o dreno e a camada drenante o que consumiu, aproximadamente, cerca de 374.000 m² (Bidim, 1991).

Na mesma década, a aplicação dos geossintéticos ampliou-se incluindo obras de grandes aterros e sistemas filtrantes de barragens, como Frauenau Dam, na Alemanha, e da Hans Stridjon Dam, na África do Sul. Além disso, o produto sintético apareceu em camadas

múltiplas de taludes e muros de contenção, e como elemento prolongador da vida útil de recapeamento asfáltico e superestruturas ferroviárias. Em 1997, Jean Pierre Giroud criou e propôs os termos “geotêxtil” e “geomembrana” na *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, na França (ABINT, 2001; Vertematti, 2015).

Na década de 80, apareceram diferentes métodos de dimensionamento e foi criada a *International Geosynthetic Society* (IGS). Nesse período foram promovidos eventos importantes como *II International Conference on Geotextiles* (Las Vegas, 1982) e *III International Conference on Geotextiles*, em Viena (1986) (Vertematti, 2015).

Na década de 90, surgiu a combinação de diferentes geossintéticos que diversificavam o uso desses produtos sintéticos para novas aplicações. Importantes eventos aconteceram como a *VI International Conference on Geosynthetics*, em Atlanta, 1998, e o Seminário Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia, em Brasília (1992) (Vertematti, 2015).

Nos anos 2000 foi lançada a primeira edição do Manual Brasileiro de Geossintéticos. A participação de trabalhos técnicos apresentados em congressos e seminários aumentou, assim como a participação de brasileiros nos eventos internacionais (Vertematti, 2015).

2.2 TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS

A Figura 2.1 ilustra alguns tipos de geossintéticos. Segundo a *International Geosynthetic Society* (2009), os tipos de geossintéticos são:

- Geotêxteis: são mantas contínuas de fibras ou filamentos, tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados. As mantas são flexíveis e permeáveis;
- Geogrelhas: são materiais geossintéticos com forma de grelha, composta por elementos com função predominante de resistência à tração;
- Georredes: são materiais com aparência semelhante à das grelhas formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante, possuindo alta porosidade ao longo do plano;
- Geomembranas: são mantas bidimensionais contínuas e flexíveis, constituídas de um ou mais materiais sintéticos, apresentando baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores.

- Geocompostos: são geossintéticos formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos como, por exemplo: geotêxtil-georrede; geotêxtil-geogrelha; geotêxtil-geomembrana ou geocomposto argiloso (*GCL*). Geocompostos drenantes pré-fabricados são constituídos por um núcleo plástico drenante (geoespaçador ou georrede) envolto por um filtro geotêxtil.
- Geotubos: são tubos poliméricos, perfurados ou não, usados para drenagem de líquidos ou gases (incluindo coleta de chorume ou gases em aplicações de aterros sanitários, por exemplo). Em alguns casos, o tubo perfurado pode ser envolvido por um filtro geotêxtil.
- Geocélulas: são arranjos tridimensionais relativamente espessos, constituídos por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto. Em alguns casos, faixas de 0,5 a 1m de largura de geogrelhas podem ser ligadas por hastes poliméricas verticais para formar geocélulas mais altas.
- Geoexpandido: são blocos ou placas, produzidos por meio da expansão de espuma de poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade, sendo usado para isolamento térmico, como um material leve em substituição a aterros de solo ou como uma camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre estruturas.
- Geocompostos argilosos (*GCL's*) são geocompostos fabricados com uma camada de bentonita geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligadas à uma geomembrana ou à uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os *GCL's* geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso para aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento. Quando hidratados, eles atuam efetivamente como barreira para líquidos ou gases e são comumente usados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas.



Figura 2.1. Tipos de geossintéticos (modificado de ABINT, 2001)

2.2.1 GEOTÊXTEIS

O geotêxtil é um geossintético confeccionado com material têxtil plano, permeável e polimérico (sintético ou natural), e é classificado como tecido, não tecido ou tricotado. Eles se diferenciam pelo arranjo dos filamentos. Os polímeros mais comumente utilizados na fabricação de geotêxteis são o poliéster (PET), o polipropileno (PP) e o polietileno (PE), e são menos propensos à decomposição biológica e processos químicos (Vertematti, 2015).

Nos geotêxteis não tecidos (GNT), os filamentos contínuos ou as fibras cortadas são distribuídos de forma aleatória por meio de processos mecânicos (agulhagem), térmicos (calandragem) ou químicos (resinagem) e são geralmente muito permeáveis e deformáveis (ABNT, 2021). Devido a aleatoriedade dos filamentos, é importante descobrir a sua curva de distribuição de poros em aplicações de filtração.

A manta é formada por fibras ou filamentos por meio da via seca, úmida ou fundida. Na via seca tem-se o processo de carda ou cardagem, cujas fibras concedidas em fardos são paralelizadas por cilindros recobertos de dentes penteadores que formam os véus, os quais são dobrados formando as mantas. A consolidação do véu acontece por intensa agulhagem mecânica, processo térmico ou químico, gerando o produto (ABINT, 2001). A Figura 2.2 apresenta o processo por cardagem e agulhagem.

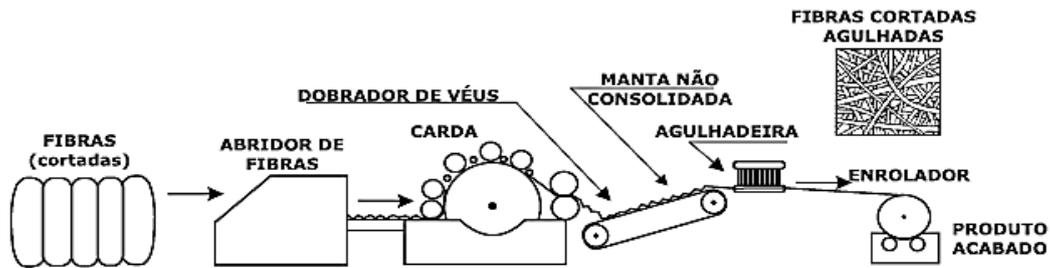


Figura 2.2. Fabricação dos geotêxteis não tecidos cardados agulhados (ABINT, 2001)

Por outro lado, os geotêxteis tecidos possuem forma ordenada de lançamento dos filamentos com entrelaçamento, normalmente em ângulo reto (ABNT, 2021). Eles podem ser empregados como reforço permanente para muros de contenção e taludes reforçados, ou reforço de aterros sobre solos mole. Esses materiais são fabricados em teares que tramam os fios ou laminetes em duas direções perpendiculares entre si: a trama perpendicular à direção de fabricação e o urdume, a própria direção de fabricação (ABINT, 2001). A Figura 2.3 mostra a fabricação dos geotêxteis tecidos.

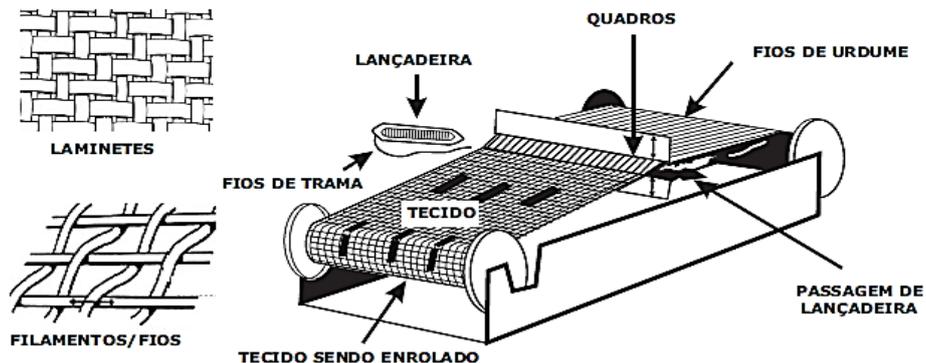


Figura 2.3. Fabricação dos geotêxteis tecidos (ABINT, 2001)

O geotêxtil tricotado é feito pelo entrelaçamento de um ou vários fios, filamentos ou outros elementos (ABNT, 2021). A Figura 2.4 ilustra o geotêxtil tecido, não tecido e tricotado.

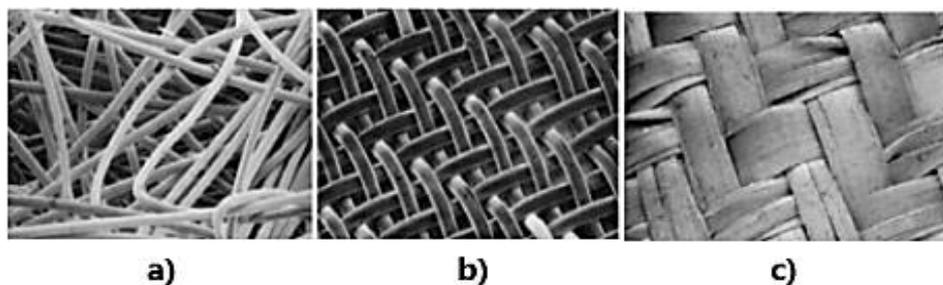


Figura 2.4. Tipos de geotêxtil a) Não tecido, b) Tecido, c) Tricotado (Gourc, 2008)

Os geotêxteis não tecido e tecido podem ser empregados como filtros. Contudo, o primeiro possui uma maior estabilidade em suas dimensões de aberturas; é menos susceptível a danos mecânicos; e tende a menores danos no funcionamento do filtro no campo (Palmeira, 2018).

2.3 APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Segundo a *International Geosynthetic Society* (2009), os geossintéticos podem ser usados em drenagem, filtração, proteção, reforço, barreira, separação, contenção, controle de erosão superficial e camada de atrito.

Na função de drenagem, os geossintéticos podem ser empregados em trincheiras drenantes em obras viárias e em obras de aterro sobre solo mole, e como drenos verticais para acelerar o processo de adensamento de uma camada de solo mole, por exemplo. A Figura 2.5 mostra a preparação de um dreno longitudinal usando o geotêxtil como filtro em obras viárias.



Figura 2.5. Dreno longitudinal utilizando geotêxtil como elemento filtrante, a) Ferrovia; b) Rodovia (ABINT, 2001; Bidim, 1991).

Na função de reforço, as camadas de geossintético podem ser posicionadas para estabilizar o aterro de uma estrutura de contenção, como ilustrado na Figura 2.6. Em obras de infraestrutura, a geogrelha pode ser inserida na base do pavimento a fim de diminuir a espessura da camada de base, e, conseqüentemente, trazendo uma redução de custos, material e aumento da vida útil do pavimento reforçado (Palmeira, 2022). Outros

exemplos seriam como reforço de estradas não pavimentadas, aterros sobre solos moles e taludes íngremes.

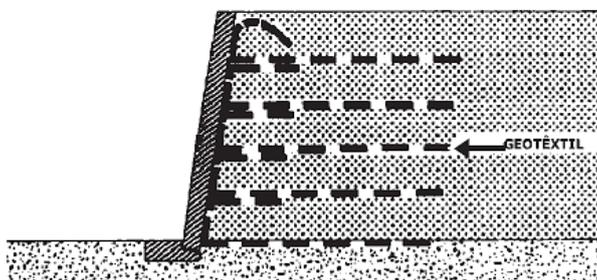


Figura 2.6. Seção esquemática de muro de contenção em solo reforçado (ABINT, 2001).

Outras aplicações de geossintéticos são como elementos de barreira em obras de proteção ambiental (aterros sanitários, por exemplo), canais, barragens etc. Ainda na área de proteção ambiental, geossintéticos podem ser utilizados para evitar processos erosivos.

2.4 FILTROS CONVENCIONAIS VERSUS FILTROS GEOSSINTÉTICOS

Em trincheiras drenantes e filtros verticais, é necessária a construção de camadas verticais de areia nas laterais do dreno, cuja execução necessita de cuidados especiais. Essas camadas separam o material drenante do solo base. O propósito do filtro geotêxtil é substituir a camada de transição convencional em filtros granulares e atuar como um filtro para o solo base, conforme ilustra a Figura 2.7.

Além disso, pode acontecer da areia com granulometria adequada e livre de impurezas só ser encontrada em locais mais distantes da obra, o que a encarece. Logo, uma opção seria “lavar” e “compor” um material ao misturar diferentes areias para obter a granulometria apropriada (Bidim, 1991). Desta forma, o filtro geotêxtil não tecido é uma solução atrativa por ser um elemento contínuo (não granular), de fácil instalação e que pode ser especificado para funcionar de forma eficiente como filtro.

Entre as vantagens dos filtros sintéticos incluem-se a facilidade de transporte e instalação, seu uso exclui a necessidade de cuidados especiais na aplicação, possui uma elevada permeabilidade (na ordem de 10^{-1} cm/s), são produtos contínuos e características constantes e seu emprego otimiza o tempo de execução da obra (Palmeira, 2022).

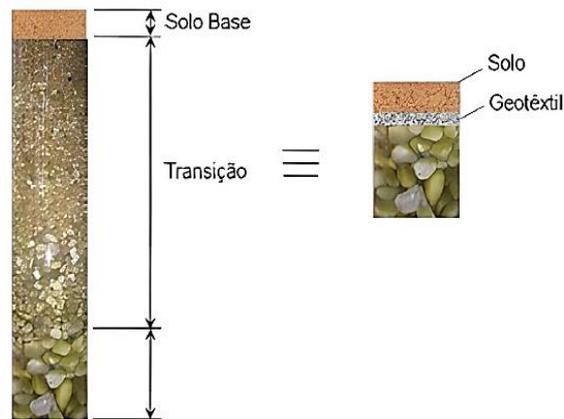


Figura 2.7. Filtro Granular x Filtro Geotêxtil (modificado de Palmeira, 2022).

2.5 FATORES QUE INFLUÊNCIAM O COMPORTAMENTO FILTRANTE DE GEOTÊXTEIS

Alguns dos fatores que influenciam no comportamento filtrante de geotêxteis são a compressão e a impregnação por partículas de solo. A impregnação pode ocorrer pela intrusão de partículas nos vazios do geossintético e partículas aderidas aos seus filamentos que bloqueiam o fluxo do líquido.

A compressão de um geotêxtil não tecido afeta a sua abertura de filtração e, conseqüentemente, o seu coeficiente de permeabilidade normal (k_n). Em um geotêxtil não tecido específico, o aumento da tensão vertical favorece uma diminuição da sua porosidade (n_{GT}), espessura (t_{GT}) e abertura de filtração (O_f). A influência da compressão na diminuição da abertura dos poros do geotêxtil não tecido não é considerada pelos critérios de projeto de filtro geotêxtil (Cazzuffi *et al.*, 2015). Comumente, são usados ensaios sem pressão para a definição da abertura de filtração de um geotêxtil, e o dimensionamento do filtro geotêxtil é geralmente feito apenas comparando-se diâmetros dos grãos de solo com a sua abertura de filtração sem o efeito do confinamento (Palmeira & Fannin, 2002).

A intrusão de partículas de solo não coesivo nos vazios do geotêxtil não tecido pode ocorrer, por exemplo, durante o espalhamento do solo sobre o geotêxtil ou a sua compactação, pois a vibração pode fazer as partículas penetrarem nos vazios do geossintético. Assim, quando o fluxo de água começa, o filtro não estará limpo. Essas situações de campo podem provocar uma obstrução parcial dos poros do geotêxtil

tornando-o menos permeável, dependendo do seu nível de impregnação (λ). Além disso, a capacidade de retenção do filtro geotêxtil aumenta com a presença de partículas de solo aprisionadas nos seus vazios, e, assim, as condições para sua colmatação se alteram em relação ao geotêxtil no estado virgem (Palmeira & Fannin, 2002).

Como observado por Palmeira & Fannin (2002) pode acontecer do geotêxtil sob pressão e impregnado tenha uma permeabilidade maior ao longo do plano do que o geotêxtil virgem sob a mesma tensão vertical, pois o geotêxtil limpo comprime mais. A propriedade hidráulica de transmissividade (permeabilidade ao longo do geossintético) reflete esse fenômeno e pode não ser tão prejudicada pela impregnação.

Um filtro geotêxtil pode ser submetido a diferentes mecanismos de colmatação, e alguns desses mecanismos estão esquematizados na Figura 2.8. O cegamento (*blinding*, em inglês) ocorre quando partículas do próprio solo-base são levadas pela água e se acumulam sobre o geotêxtil, formando uma camada de baixa permeabilidade. Assim, o geotêxtil pode estar internamente limpo, mas essa camada de solo fino pode comprometer o desempenho do sistema. O mecanismo de cegamento é típico em solos internamente instáveis (Palmeira & Fannin, 2002).

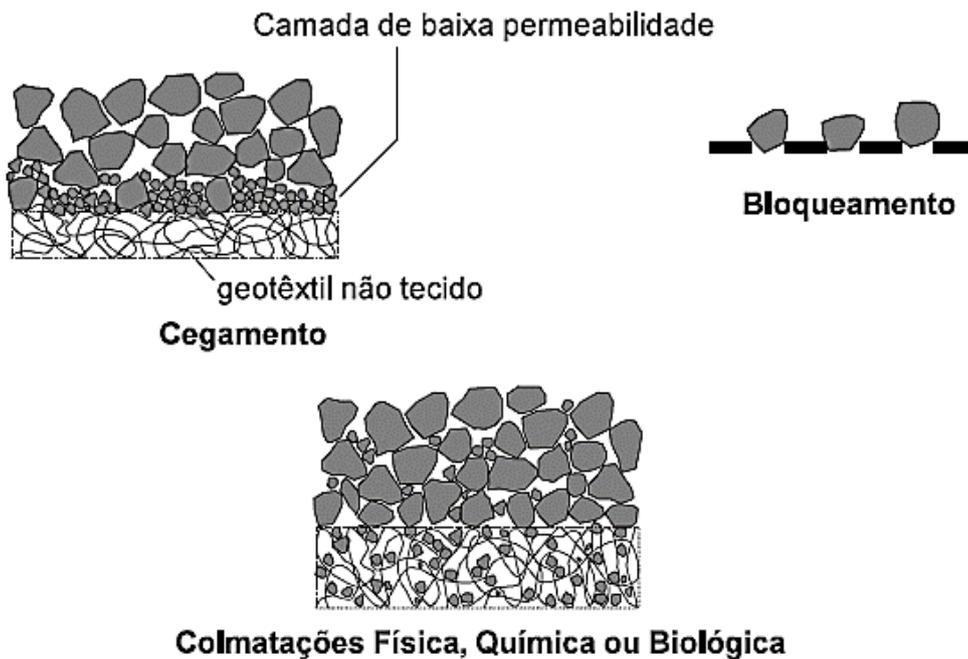


Figura 2.8. Mecanismos de colmatação física de um geotêxtil (modificado de Palmeira & Fannin, 2002).

O bloqueamento (*blocking*, em inglês) ocorre quando os grãos ocupam os poros por onde a água deveria passar. Isso pode ocorrer em geotêxteis do tipo tecido, onde a água passa por pontos discretos. Para um geotêxtil não tecido, é improvável a ocorrência de bloqueamento, pois há várias formas, dimensões e elevado número de poros na superfície do geotêxtil, tornando estatisticamente muito improvável a ocorrência de bloqueamento (Palmeira & Fannin, 2002).

A colmatção física ocorre quando muitos grãos do solo base penetram e se acumulam nos vazios do geotêxtil, dificultando a passagem da água. Na colmatção química, a precipitação de substâncias químicas pode colmatar o filtro geossintético. Já na colmatção biológica, a proliferação de bactérias pode comprometer a passagem de líquido através do material sintético (Palmeira & Fannin, 2002).

2.6 EXEMPLOS DE DESEMPENHOS DE FILTROS GEOTÊXTEIS

Du *et al.* (2022) analisaram a permeabilidade de um silte argiloso em combinação com geotêxteis não tecidos de 125, 200, 300 e 400 g/m² sob tensões de 0, 5, 10, 15 e 25 kPa, e gradiente hidráulico de 1. A amostra de 200 g/m² começou com permeabilidade de $2,28 \times 10^{-9}$ m/s, sem tensão vertical, e diminuiu até $1,11 \times 10^{-9}$ m/s sob 25 kPa. Considerando o geotêxtil de 400 g/m², esse apresentou permeabilidade de $2,44 \times 10^{-9}$ m/s, com 0 kPa, e $4,64 \times 10^{-10}$ m/s, sob 25 kPa. Assim, a tensão vertical de 25 kPa reduziu a permeabilidade do sistema. Além disso, a pesquisa concluiu que um geotêxtil não tecido espesso com um pequeno tamanho de abertura de filtração exibiu desempenho de filtração ruim, embora atendendo ao critério de retenção do solo.

Khan *et al.* (2021) prepararam quatro amostras de submetidas a carregamento estático: i) areia média ou, ii) areia média com 10% de cinzas de combustíveis pulverizados, iii) areia fina e iv) areia fina com 10% de cinzas de combustíveis pulverizados. Os filtros geotêxteis não tecidos nomeados A e C tinham 120 e 237 g/m², respectivamente. Os ensaios com areia média mais geotêxteis A e C resultaram em permeabilidades maiores ($5,14 \times 10^{-5}$ m/s e $4,29 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente) quando comparadas com a do solo ($4,29 \times 10^{-5}$ m/s e $3,33 \times 10^{-5}$ m/s). Isso significa que a interface solo-geotêxtil foi mais permeável que o solo original. Além disso, os valores de Razão entre Gradiente (*GR*, do inglês *Gradient Ratio*) nesses experimentos foram menores que 1. Assim, pode ter ocorrido erosão de

algumas partículas finas próximas à interface geotêxtil sem que elas obstruíssem significativamente o filtro.

Brito (2020) ensaiou, em equipamento de Razão entre Gradientes, amostras de areia média. Os ensaios foram realizados com e sem geotêxtil não tecido (GNT), cujas gramaturas foram de 200 e 300 g/m², submetidos a tensões verticais de 0, 50, 100 e 200 kPa no equipamento desenvolvido por Gardoni (2000). A permeabilidade da areia foi da ordem de 10⁻³ cm/s e houve uma pequena redução com o aumento de tensão. Isso foi explicado pelo aumento da compactidade relativa do material. Com o geotêxtil GNT200, a permeabilidade do sistema manteve-se na ordem de grandeza 10⁻³ cm/s para qualquer tensão. Porém, com GNT300 a permeabilidade diminuiu para 10⁻⁴ cm/s. Ou seja, o aumento da massa por unidade de área ocasionou uma redução no coeficiente de permeabilidade do sistema.

A influência do confinamento no comportamento filtrante de geotêxteis não tecidos foi comprovada no trabalho de Melo (2018). Nesse estudo foram aplicadas tensões verticais de 0, 10, 100, 400 e 1000 kPa em geotêxteis não tecidos com massas por unidade de área de 200, 300 e 510 g/m² e utilizou-se o ensaio de Ponto de Bolha. O filtro sintético de 200 g/m², sob tensão vertical de 100 kPa, apresentou uma abertura de filtração (O_{95}) de 0,140 mm, o que foi próxima à abertura obtida no ensaio sem confinamento para o outro geotêxtil de maior massa por unidade de área, com 300 g/m². Concluiu-se, de forma geral, que as tensões iniciais de confinamento, entre 10 e 100 kPa, geraram maiores diminuições no tamanho da abertura de filtração e nas pressões acima de 400 kPa as taxas de redução foram menores.

Segundo Conforme Hong & Wu (2011), a avaliação do cegamento e do bloqueamento pode ser feita no ensaio de Razão entre Gradientes (*GR*). Nos ensaios desses autores, o solo foi classificado como areia mal graduada com silte (*SP-SM*), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. Conforme os autores, o conjunto solo - geotêxtil, cuja massa por unidade de área do geotêxtil era de 210 g/m², teve seu coeficiente de permeabilidade alterado ao começar com 1,14 x 10⁻⁵ m/s no gradiente hidráulico (*i*) de 1, e diminuído para 0,49 x 10⁻⁵ m/s com *i* igual a 10. O mesmo aconteceu no sistema solo - geotêxtil de massa por unidade de área de 337 g/m², e valores iguais de gradientes

hidráulicos, variando de $1,33 \times 10^{-5}$ m/s para $1,26 \times 10^{-5}$ m/s. Portanto, o aumento do gradiente hidráulico também reduziu o valor do coeficiente de permeabilidade do sistema.

Wu *et al.* (2006) investigaram amostras de solos com D_{50} de 0,5 mm, índice de vazios máximo de 0,638 e índice de vazios mínimo de 0,395. Os resultados experimentais pelo ensaio de *GR* revelaram que a vazão final para o sistema solo–geotêxtil (250 g/m² e 450 g/m²), com esferas de aço subjacentes ao filtro, aumentou à medida que crescia a razão de área aberta (30, 50, 64, 82 e 100%) do geotêxtil, tanto no gradiente hidráulico de 1 quanto no gradiente de 5. No geotêxtil com 450 g/m², área aberta de 30% e gradiente hidráulico 1 foi considerado o pior caso porque as vazões finais foram 50% dos valores iniciais. O gradiente de 5 proporcionou uma diminuição do valor da vazão final de forma retardada em relação à vazão inicial. Assim, o *GR* aumentou com a redução da área aberta, a presença das esferas de aço subjacentes ao filtro favoreceu o potencial de colmatação e o gradiente hidráulico maior ($i = 5$) reduziu o entupimento ao se comparar com o gradiente de 1. Por outro lado, os ensaios usando esferas de aço de diâmetros 14,2, 15,85 e 31,8 mm, mas todas com a mesma área aberta de 68% e para gradientes hidráulicos 1 e 5, apresentaram pequenas variações nas condições de fluxo. Portanto, concluiu-se que o potencial de entupimento do conjunto solo-geotêxtil foi influenciado principalmente pela área aberta para passagem de água e não pelo tamanho das esferas de aço. Da mesma forma, nos ensaios com a presença apenas da placa perfurada o valor de *GR* foi aumentando à medida que o espaço de fluxo livre na placa diminuía.

Gardoni *et al.* (2000) concluíram que mesmo com tensões normais elevadas (acima de 200 kPa), a porosidade e a permeabilidade de um geotêxtil não tecido podem ser maiores que os valores de solos arenosos típicos. O coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil (k_n) pode ser reduzido cerca de 10 vezes na faixa de pressões entre 0 e 200 kPa. Os autores observaram também que a equação de Giroud (1996) foi satisfatoriamente acurada para previsão da permeabilidade do geotêxtil.

2.6.1 AFUNDAMENTO DO GEOTÊXTEL NO MATERIAL DRENANTE

É comum geotêxteis trabalharem como filtro sobre agregados graúdos. Com o propósito de simular em laboratório as diferentes condições de contorno, a Figura 2.9 ilustra a placa perfurada a jusante do geossintético para representar um bloco de concreto em uma

aplicação de controle de erosão, enquanto as esferas de aço são colocadas sob o filtro sintético para imitar o agregado de drenagem que tem contato irregular com o geotêxtil (Wu *et al.*, 2006).

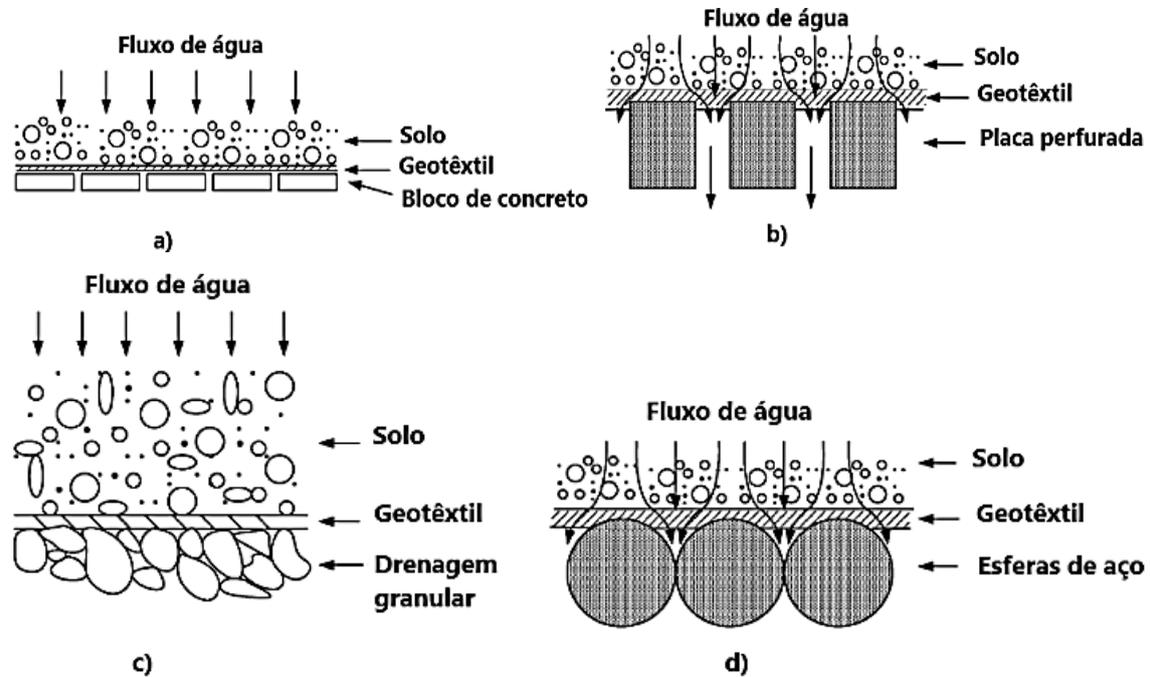


Figura 2.9. Seção transversal do sistema solo-geotêxtil-drenagem (modificado de Wu *et al.*, 2006).

Palmeira *et al.* (2012) analisaram a capacidade de retenção do geotêxtil não tecido de 200 g/m² com um material drenante subjacente de esferas de aço de 18 mm de diâmetro. Os furos provenientes do agulhamento do geotêxtil influenciaram a passagem de partículas maiores pelo filtro sob baixas tensões verticais. Além disso, a diminuição do vazio onde o geotêxtil cedeu devido às esferas de aço, com espaçamento nulo entre si, provocou a obtenção de um diâmetro de partícula passante de 0,037 mm em um dos ensaios, nos quais se aplicou tensão vertical de 2.000 kPa. Esse diâmetro foi muito menor que o diâmetro máximo dos grãos do solo base. Esses pesquisadores também destacaram que para a situação do geotêxtil não tecido de 200 g/m², esferas de aço de 18 mm e tensões normais acima de 20 kPa houve partículas passantes de diâmetro até 2 vezes maiores que o diâmetro de constrição obtido no teste de Ponto de Bolha.

Tatto (2010) observou uma redução da vazão com a presença das esferas de aço ($d = 18$ mm) ao comparar com o ensaio usando placa perfurada subjacente ao geotêxtil. A autora mostrou que na tensão vertical de 50 kPa, o afundamento do geotêxtil nas esferas de aço

de diâmetro 18 mm foi maior com a diminuição da massa por unidade de área e aumento do espaçamento entre as esferas.

2.7 CRITÉRIOS DE FILTRO

2.7.1 INTRODUÇÃO

No projeto de filtro é importante considerar corretamente as condições de contorno e as características mecânicas, hidráulicas e geométricas. As condições de contorno são as condições de fluxo (unidirecional ou bidirecional, e gradientes hidráulicos), contato solo-filtro geotêxtil (contínuo ou não), emprego da tensão vertical efetiva e tensão de cisalhamento. Uma situação crítica é se o contato solo-filtro não for contínuo, pois poderá ocorrer a migração dos grãos na interface solo-geotêxtil e essa falta de contato faz com que o solo seja submetido a tensões efetivas verticais iguais a zero, permitindo que as partículas do solo se movam livremente (Cazzuffi *et al.*, 2015).

Além disso, a avaliação da criticidade da aplicação do filtro depende da condição de acesso para manutenção e das consequências em caso de falha do geossintético como, por exemplo, no emprego de filtro sintético em barragens (Cazzuffi *et al.*, 2015).

Giroud (2010) listou alguns valores típicos de gradientes hidráulicos para o trecho de solo próximo aos filtros. Os números são geralmente menores que 2. A Tabela 2.1 mostra o tipo de aplicação do filtro e o gradiente hidráulico sugerido.

Tabela 2.1. Valores típicos de gradiente hidráulico no solo próximo ao filtro (Giroud, 2010).

Aplicação	Gradiente hidráulico
Trincheira de desidratação	≤ 1
Drenagem de parede vertical	1,5
Drenagem de beira de estrada	≤ 1
Proteção de vias navegáveis	≤ 1
Camada de drenagem do aterro	1,5
Dreno de barragem	2
Dreno atrás do núcleo de argila da barragem	3 para > 10

Os testes de laboratório iniciais em Mecânica dos Solos estudaram um filtro granular uniformemente graduado em situação de fluxo unidirecional e o seu comportamento em contato com solo base, geralmente também uniformemente graduado. Dessa forma, o critério de retenção e permeabilidade do solo-base proposto por Terzaghi, e depois relatados por Terzaghi e Peck (1948), puderam ser comprovados. Lafleur *et al.* (1989), ampliaram esse tipo de estudo aos solos internamente instáveis (Palmeira & Fannin, 2002).

Christopher & Fischer (1992) numeraram três princípios para um filtro eficiente, começando com a necessidade de o maior poro do filtro geotêxtil ser menor que um diâmetro característico dos grãos de solo. Assim, o solo não atravessa o geotêxtil e se evita o processo de erosão interna progressiva ou “*piping*”. A maioria das aberturas do filtro devem ser suficientemente maiores que as menores partículas do solo, modo que parte do solo consiga passar sem causar a colmatação e o cegamento. Devem existir muitas aberturas no geotêxtil para manter um fluxo adequado caso aconteça obstrução de poros ao longo da vida útil.

Caso haja a possibilidade de cegamento do geotêxtil, o projetista precisará escolher entre especificar um geotêxtil suficientemente aberto para permitir a passagem de partículas menores do solo ou um geotêxtil com menores poros para reter essas partículas. Uma maior abertura pode proporcionar o surgimento de “*piping*” do solo base, causando grandes deformações e colapso, enquanto um geotêxtil menos aberto poderá reter as partículas e provocar o cegamento e diminuição severa na taxa de fluxo, com aumento da poropressão na região próxima ao filtro geotêxtil.

O geotêxtil não é único responsável por exercer a filtração, dividindo essa função com o solo adjacente a ele. Du *et al.* (2022) explicam que logo acima do geotêxtil acontece um mecanismo de formação da “camada autofiltrante”, ou camada de filtro natural ou pré-filtro. As partículas finas atravessam o filtro geossintético e, com isso, é formada uma fina camada com arcos de partículas de solo na superfície do geotêxtil. Essa “camada autofiltrante” quase não existe em solos coesivos.

2.7.2 CRITÉRIO DE RETENÇÃO

O critério de retenção visa garantir uma retenção satisfatória dos grãos de solo. Ele previne que as partículas de solo sejam levadas pelo fluxo de água, o que geraria um processo de lavagem (ou sufusão) ou uma erosão interna progressiva (“piping”) (Palmeira, 2018). Segundo Kenney & Lau (1985), o carreamento de finos pela água torna o material mais poroso e menos eficiente como meio filtrante.

Nos solos internamente estáveis algumas partículas constituem um esqueleto contínuo que detém grãos um pouco menores do que as partículas do esqueleto. Estas partículas menores aprisionam outras menores ainda e consecutivamente. Então, utilizando um geossintético com abertura de filtração igual ao do esqueleto de solo, todos os grãos que compõe o esqueleto serão retidos. Com isso o objetivo do critério de retenção não é reter todas as partículas do solo base, podendo elas migrarem para dentro ou atravessar o filtro sintético ao mesmo tempo em que o solo continua estável (Cazzuffi *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2021).

O critério de retenção estabelece que a abertura de filtração do geotêxtil tem que ser menor que um número “B” vezes o diâmetro característico das partículas do solo base, como na Equação 2.1.

$$\frac{O_f}{D} < B \quad (2.1)$$

Onde: O_f = medida de abertura de filtração ou de poros do geotêxtil;

D = medida de tamanho de grãos do material protegido (D_{90} , D_{85} , por exemplo);

$B = f(n, C_c, C_u, C'_u, D, I_D)$ e pode depender da porosidade (n) do geotêxtil, do coeficiente de curvatura do solo em contato com o geotêxtil (C_c), coeficiente de uniformidade (C_u) do geotêxtil, coeficiente de uniformidade modificado (C'_u), diâmetro dos grãos do solo base (D), densidade relativa (I_D).

A Tabela 2.2 reúne alguns critérios de dimensionamento de filtros geotêxteis que podem ser encontrados na literatura.

Tabela 2.2. Critérios de retenção para filtros geotêxteis (Gardoni & Palmeira, 2002).

Fonte	Critério	Aplicação
Giroud (1982)	$O_{95}/D_{50} < C'_u$	$I_D < 35\%$, $1 < C'_u < 3$
	$O_{95}/D_{50} < 9/ C'_u$	$I_D < 35\%$, $C'_u > 3$
	$O_{95}/D_{50} < 1,5 C'_u$	$35\% < I_D < 65\%$, $1 < C'_u < 3$
	$O_{95}/D_{50} < 13,5/ C'_u$	$35\% < I_D < 65\%$, $C'_u > 3$
	$O_{95}/D_{50} < 2 C'_u$	$I_D > 65\%$, $1 < C'_u < 3$
	$O_{95}/D_{50} < 18/ C'_u$	$I_D > 65\%$, $C'_u > 3$ Assume migração de finos do solo para C_u elevado
FHWA – Christopher & Holtz (1985)	$O_{95}/D_{85} \leq 1 - 2$	Dependendo do tipo de solo e C_u .
	$O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou	Fluxo dinâmico, pulsante e cíclico, se o solo pode mover para o filtro geotêxtil
	$O_{50}/D_{85} \leq 0,5$	
CFGG (1986) – French Committee on Geotextiles and Geomembranes	$O_f/D_{85} \leq 0,38 - 1,25$	Dependendo do tipo de solo, condições hidráulicas, compactação e condições de aplicação
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 0,8$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, dependendo do C_u do solo
	$O_{95}/D_{15} \leq 1,8 - 7,0$	
	$O_{50}/D_{50} \leq 0,8 - 2,0$	
Fannin et al. (1994) - UBC	$O_f/D_{85} < 1,5$ e $O_f/D_{50} < 1,8$	Não-tecidos, $1 < C_u < 2$
	$O_f/D_{85} < 0,2$, $O_f/D_{50} < 2,0$,	Não-tecidos, $3 < C_u < 7$
	$O_f/D_{50f} < 2,5$ e $O_f/D_{15} < 4,0$	
Lafleur (1999)	$O_f/D_I < 1$ $1 < O_f/D_I < 5$	Solos estáveis ($C_u \leq 6$ e $D_I = D_{85}$ neste caso), solos com $C_u > 6$, mas linearmente graduados ($D_I = D_{50}$, neste caso), mal graduado ($C_u > 6$) solos internamente estáveis ($D_I = D_G$) e solos com $C_u > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e internamente estáveis ($D_I = D_{30}$) Solos instáveis: $D_I = D_{30}$ para solo mal graduado internamente instável com curva granulométrica côncava para cima (rico de migração de finos). Critério desenvolvido para solos sem coesão

Notas: O_x = abertura de filtração do geotêxtil correspondente a “X” tamanho de partícula baseado no peneiramento seco de esferas de vidro, O_f = abertura de filtração baseada no peneiramento hidrodinâmico, D_I = tamanho indicativo de solo de base protegido, D_G =

tamanho mínimo do solo, D_Y = partícula do solo correspondente a “Y” por cento passando, C_u = coeficiente de uniformidade do solo = D_{60}/D_{10} , C'_u = coeficiente linear de uniformidade do solo = $(D'_{100}/D'_{10})^{0.5}$, D'_Y = partícula de solo correspondente a “Y” por cento passando obtida através de uma linha reta passando na parte central da curva granulométrica, I_D = densidade relativa, t_{GT} = espessura do geotêxtil, C_c = coeficiente de curvatura do solo = $(D_{30})^2/(D_{60}.D_{10})$, D_{50f} = fração de partículas do solo menores que o valor de O_f do geotêxtil, n_{GT} = porosidade do geotêxtil.

2.7.3 CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE

No critério de permeabilidade, o filtro deve ser mais permeável que o solo base. Segundo Giroud (2010), o critério de permeabilidade para geotêxtil inclui dois requisitos, um de poropressão e um de vazão. O primeiro significa que a presença do filtro pode vir a aumentar a poropressão no solo a montante dele, mas o aumento deve ser pequeno ou zero em comparação ao sistema sem filtro. O requisito de vazão consiste na capacidade do filtro não reduzir a vazão em relação ao sistema sem filtro.

A condição para que não ocorra um aumento de poropressão está expressa na Equação 2.2, onde k_f = permeabilidade do filtro geotêxtil, k_s = permeabilidade do solo e i_s = gradiente hidráulico no solo próximo ao filtro (Giroud, 2010).

$$k_f \geq i_s k_s \quad (2.2)$$

O gradiente hidráulico do solo mais perto do geotêxtil é que decide qual dos dois requisitos, poropressão ou vazão, deve ser o mais rigoroso.

A tendência dos diferentes critérios de projeto é projetar o filtro geotêxtil de modo que a permeabilidade do geotêxtil seja maior (entre 1 à 100 vezes) que a do solo de base. Sob condições de fluxo de sentido único, a seleção do filtro geotêxtil pode ser desenvolvida utilizando os critérios de permeabilidade disponíveis na literatura (Palmeira, 2020).

A permissividade (ψ) é uma grandeza hidráulica definida como o coeficiente de permeabilidade normal a um determinado meio (k_n) dividido pela espessura desse meio (t_{GT}). Essa propriedade traduz a dificuldade ou facilidade de um determinado meio ou material ser atravessado por um líquido e é expressa pela Equação 2.3. A Tabela 2.3

informa diferentes critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis presentes na literatura.

$$\psi = \frac{k_f}{t_{GT}} \quad (2.3)$$

Tabela 2.3. Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Gardoni & Palmeira, 2002).

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

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

2.7.4 SOLOS INTERNAMENTE INSTÁVEIS

Solos internamente instáveis são aqueles em que partículas da sua fração mais fina podem ser carregadas pelas forças de percolação. Esses solos são denominados de internamente instáveis e o critério de retenção precisa de alteração colocando um limite superior para a abertura de filtração (para solos estáveis) e um valor limite inferior (para solos internamente instáveis). Esses solos têm potencial de erosão das partículas mais finas, deixando a fração mais grossa menos eficaz na proteção de materiais adjacentes da erosão (Wan & Fell, 2008; Cazzuffi *et al.*, 2015). Além do mais, os solos internamente instáveis estão sujeitos a se auto-colmatarem, ou seja, bloquear os seus próprios vazios de maneira a dificultar, ou até impedir, a passagem do fluido percolante (Lafleur *et al.*, 1989).

A retenção do esqueleto de solo é essencial para se reter um solo internamente estável. A estabilidade interna depende da distribuição granulométrica do solo, que é caracterizada pelo coeficiente de uniformidade (C_u). Quando um solo tem um C_u aproximadamente 3, as partículas estão fortemente interligadas e o material possui uma estabilidade interna máxima (Giroud, 2010).

A Figura. 2.10 representa um solo com um coeficiente de uniformidade menor ou igual a 3, onde as partículas mais grosseiras formam um esqueleto contínuo que aprisiona todas as outras partículas. Se o solo apresentar um C_u maior que 3, as partículas mais grossas geralmente não estão em contato umas com as outras. Como resultado, eles não formam um esqueleto contínuo que prende outras partículas. Desta forma, solos com coeficiente de uniformidade maior que 3 ficam com suas partículas maiores “flutuando” na matriz formada pelas demais partículas. Neste caso, as partículas maiores não contribuem para a estabilidade interna (Giroud, 2010).

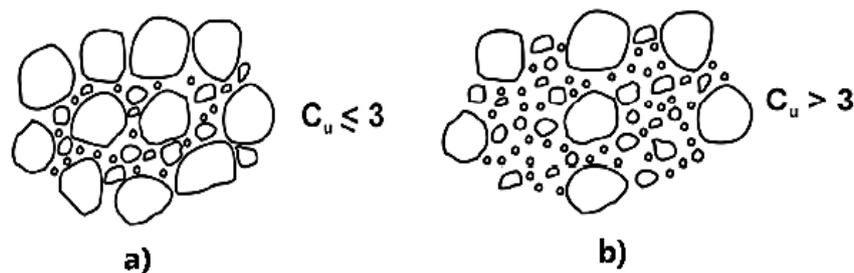


Figura 2.10. Solo com $C_u \leq 3$ (a); solo com $C_u > 3$ (b) (Giroud, 2010).

Os solos internamente instáveis podem ser identificados por métodos semi-empíricos, teóricos, experimentais e gráficos. Entre os critérios mais usados estão os métodos de Kézdi (1979), Kenney e Lau (1985, 1986) e Burenkova (1993). Eles se basearam em diferentes hipóteses e ensaios (Cazzuffi *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2021).

2.7.4.1 MÉTODO DE KENNEY & LAU

O método de Kenney & Lau (1985) analisa o potencial de instabilidade interna com base na curva granulométrica. Os autores consideraram três condições para que as partículas soltas se movessem e o material fosse considerado de graduação instável:

- a) O material granular compactado possui uma estrutura primária de partículas que suporta as tensões impostas. Essas partículas podem ser consideradas fixas em posição;
- b) Dentro dos poros do tecido primário deve haver partículas soltas que podem ser movidas por forças como o fluxo de água;
- c) Os tamanhos das constrições na rede de poros devem ser maiores do que algumas das partículas soltas, dando a essas partículas a possibilidade de serem carregadas.

Esse método utiliza uma curva $F - H$ traçada para avaliar a possibilidade do solo ser internamente instável. Na Figura 2.11, o gráfico “a” apresenta a curva granulométrica de F versus D , onde F é a porcentagem de passagem de partículas em um determinado diâmetro D e H é a porcentagem de passagem de partículas entre D e $4D$. O valor de D inicial é escolhido de forma arbitrária e os dados de H e F estão plotados no gráfico “b” até formar uma curva $H \times F$ (Kenney & Lau, 1985).

Nos solos bem graduados, para qualquer porcentagem de $F \leq 20\%$, se o valor mínimo de H/F for menor que 1, a instabilidade interna é esperada. Nos solos de gradação uniforme, o F deve ser menor ou igual a 30% (Khan *et al.*, 2021).

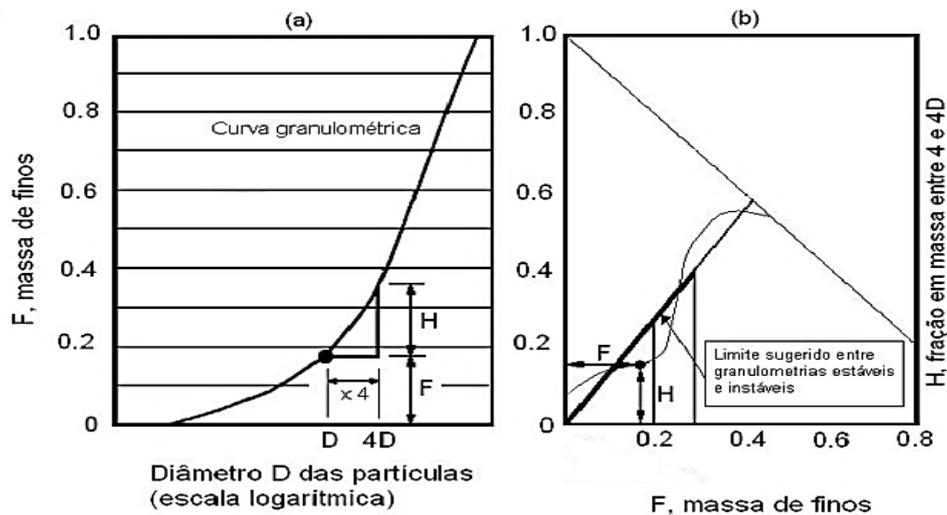


Figura 2.11. Método de descrição da forma da curva granulométrica (modificado de Kenney & Lau, 1985)

A escolha do valor do intervalo de quatro vezes o valor de D foi função do tamanho das constrições predominantes na rede de vazios de um filtro granular, a qual é

aproximadamente igual a um quarto do tamanho da menor partícula constituinte do solo. Isso significa que a partícula de tamanho D pode passar através das restrições de um solo formado por partículas de tamanho $4D$ ou maior, e para prevenir esse carreamento as restrições teriam que ser bloqueadas por partículas maiores que D . O valor H , porcentagem de massa de solo entre os diâmetros D e $4D$, corresponde ao material cujas restrições são suficientemente pequenas para prevenir a passagem de partículas com diâmetro igual a D (Muñoz, 2005).

Quando os pontos projetados formando uma curva se encontrarem abaixo do limite sugerido entre granulometrias estáveis e instáveis significa que o material é instável; se a curva aparecer acima do limite sugerido, o material é estável.

2.7.4.2 MÉTODO DE BURENKOVA

Burenkova (1993) propôs um critério para medir a estabilidade interna de solos não coesivos, utilizando dois fatores condicionais de uniformidade para descrever a heterogeneidade dos solos: $h1 = D_{90}/D_{60}$ e $h2 = D_{90}/D_{15}$. A razão D_{90}/D_{60} representa a inclinação da parte grosseira do gráfico de distribuição de tamanho de partícula, enquanto D_{90}/D_{15} mede a largura da gradação (Khan *et al.* 2021). De acordo com o critério, um solo é considerado não-sufusivo (internamente estável) se satisfizer a Equação 2.4:

$$0,76 \cdot \log (h2) + 1 \leq h1 \leq 1,86 \cdot \log (h2) + 1 \quad (2.4)$$

3 ENSAIOS E MATERIAIS

3.1 ENSAIOS

Os ensaios de permeabilidade realizados nesta pesquisa estão apresentados nas Tabelas 3.1 a 3.4, e os para medição do afundamento do solo no geotêxtil nas esferas de aço estão na Tabela 3.5. As amostras nos ensaios de permeabilidade nestas tabelas possuíam altura de 50 mm e através do método de controle de massa e volume foi obtida a densidade de 1,5 pretendida para as amostras dentro do permeâmetro. Os gradientes hidráulicos utilizados nesta pesquisa foram iguais a 1 e 10. O valor de 10 foi também utilizado para favorecer o fenômeno de sufusão em solos internamente instáveis. Além disso, valores dessa ordem de grandeza podem ser encontrados em certas regiões do corpo de barragens de terra e em sistemas de proteção de taludes costeiros (Giroud, 1996). Os ensaios foram de filtração sob carga constante, granulometria a laser, difração de Raio – X e ICP – OES, e afundamento do geotêxtil nos vazios entre as esferas de aço (Capítulo 4).

Tabela 3.1. Ensaios com geotêxtil não tecido de 200 g/m² e $s/d = 1$.

Tensões verticais (kPa)	0 e 25	0 e 25	0	25	100	0	25	100
Solo fino (%)	0%	10%		20%			40%	
Geotêxtil (g/m²)				200				
Esferas de aço	X	X	X	X	X	X	X	X
Placa perfurada	X	X	X	X			X	
Espaçamento entre esferas				1				
Gradiente hidráulico				1 e 10				

Tabela 3.2. Ensaios com geotêxtil não tecido de 400 g/m² e $s/d = 1$.

Tensões verticais (kPa)	25 kPa	
Solo fino (%)	20%	40%
Geotêxtil (g/m²)	400	
Esferas de aço	X	
Espaçamento entre esferas	1	
Gradiente hidráulico	1 e 10	1

Tabela 3.3. Ensaio com geotêxtil não tecido de 600 g/m² e $s/d = 1$.

Tensões verticais (kPa)	25 kPa	
Solo fino (%)	20%	40%
Geotêxtil (g/m²)	600	
Esferas de aço	X	
Espaçamento entre esferas	1	
Gradiente hidráulico	1	1 e 10

Tabela 3.4. Ensaio com geotêxteis não tecidos e $s/d = 2$.

Geotêxtil (g/m²)	200	400	600
Solo fino (%)	40%		
Tensões verticais (kPa)	0 e 25	0 e 100	100
Esferas de aço	X		
Espaçamento entre esferas	2		
Gradiente hidráulico	1		

Tabela 3.5. Ensaio para medição do afundamento do geotêxtil nas esferas de aço.

Geotêxtil (g/m²)	200	400	600
Tensões verticais (kPa)	25 e 100		
Espaçamento entre esferas	1 e 2		

3.1.1 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE

Um diagrama esquemático do ensaio está apresentado na Figura 3.1 e os nomes dos componentes do sistema estão na Tabela 3.6. Primeiro, uma bomba de aquário bombeia a água destilada armazenada no reservatório principal (A) para o reservatório de distribuição (B), que envia a água para o permeâmetro (C). Uma condição de fluxo unidirecional através do solo e do geotêxtil foi mantida durante os testes usando uma perda de carga hidráulica total que era ajustada por meio do reservatório para controle do gradiente hidráulico (D), de 1 e 10. As leituras do nível d'água eram obtidas do painel de piezômetros (E).

A tensão vertical foi aplicada na amostra por meio do sistema óleo-gás. O gás nitrogênio (F) era conduzido para uma interface (G) preenchida com óleo hidráulico e, em seguida,

o óleo era enviado para o cilindro hidráulico (H) com uma célula de carga de capacidade máxima de 20 kN (I) acoplada. A força empregada foi observada por meio da leitora (J).

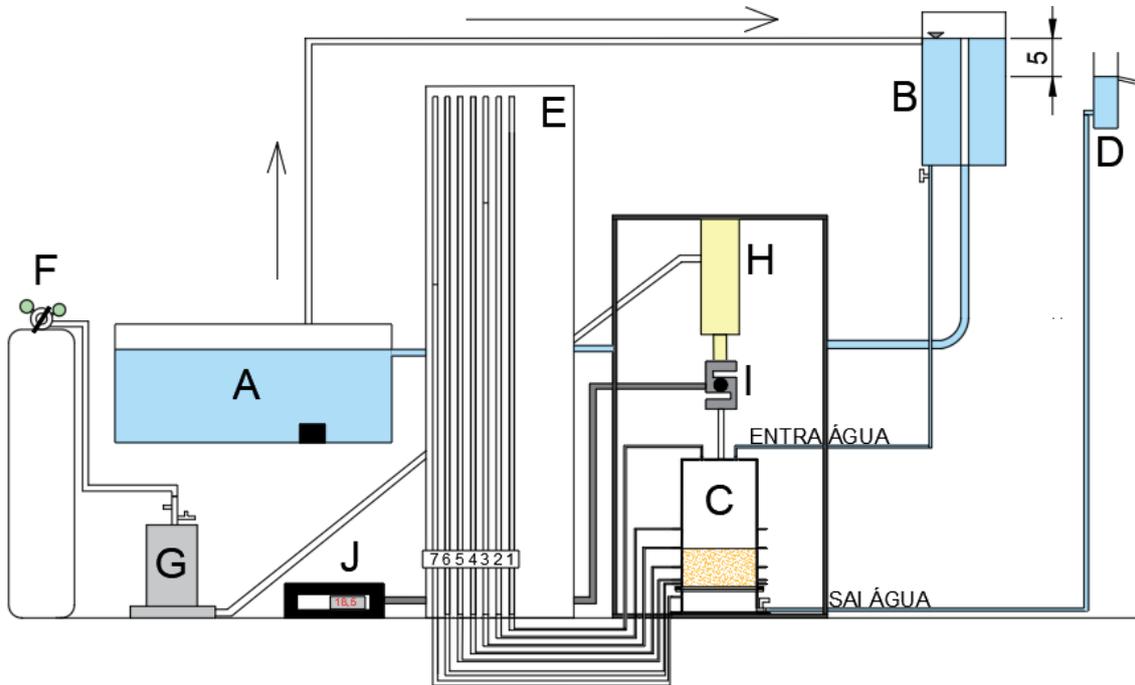


Figura 3.1. Esquema do ensaio de filtração

Tabela 3.6. Componentes do ensaio de filtração.

A	Reservatório principal com água destilada	F	Cilindro com gás nitrogênio
B	Reservatório de distribuição	G	Interface óleo – gás
C	Permeâmetro de carga constante	H	Cilindro hidráulico
D	Reservatório para controle de gradiente hidráulico	I	Célula de carga com capacidade de 20 kN
E	Painel de piezômetros	J	Leitora

A água destilada foi deixada fluir através do sistema solo-geotêxtil, enquanto a compressão normal ia sendo aplicada até os resultados se tornarem estáveis. Finalizado o ensaio, amostras de solo imediatamente acima do filtro geotêxtil e as partículas passantes pelo filtro depositadas no compartimento inferior do permeâmetro eram coletadas. Além disso, logo após o fim do ensaio, os espécimes de geotêxteis eram submersos em água destilada e posicionados na vertical para que o excesso de solo acima do filtro fosse removido e, em seguida, os geossintéticos eram encaminhados para estufa à 105°C por 24h. Após esse tempo, o geotêxtil era pesado para avaliar o grau de impregnação por partículas de solo. A seguir, as amostras de solo da base da amostra, o material passante

pelo filtro e as partículas de solo aprisionadas no geotêxtil foram ensaiadas no granulômetro à laser.

O cilindro utilizado nos ensaios foi confeccionado para a pesquisa de doutorado de Gardoni (2000). Esse equipamento possui 12 portas laterais conectadas ao painel de piezômetros para leitura dos gradientes hidráulicos. Duas placas perfuradas, sendo que a placa superior é responsável pela aplicação de tensão vertical durante o ensaio e a inferior pela sustentação do solo-geotêxtil-dreno, o que permite a passagem de partículas de solo que ficam depositados no compartimento inferior do permeâmetro. O detalhe do permeâmetro aparece na Figura 3.2.

A colocação das esferas de aço sob o geotêxtil visou simular a presença de material graúdo subjacente ao filtro e está esquematizada na Figura 3.3, cujos pinos de sustentação metálicos têm 21 e 36 mm de altura para os ensaios com e sem material drenante, respectivamente. Isso permite a colocação de material abaixo do geotêxtil. A Figura 3.4 mostra os componentes do cilindro para os ensaios de filtração.

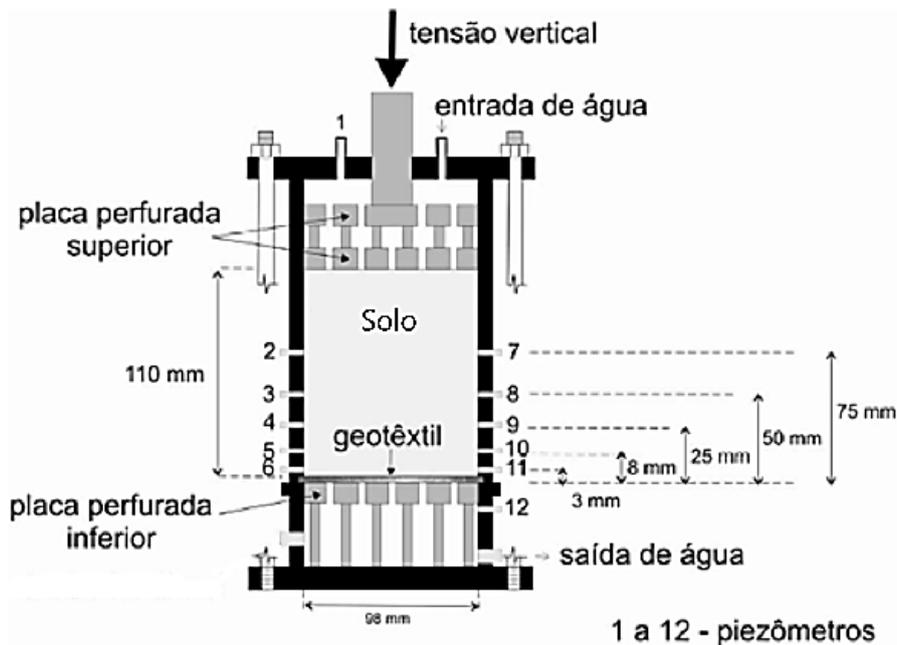


Figura 3.2. Permeâmetro (Tatto, 2010)

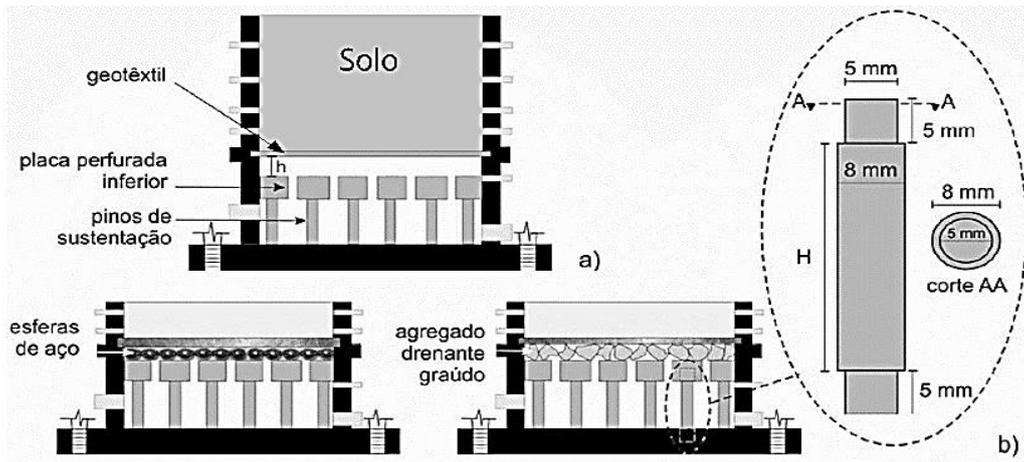


Figura 3.3. Sistema para colocação de solo subjacente ao filtro geotêxtil (Tatto, 2010)



Figura 3.4. Componentes do permeâmetro

A pressão no topo da amostra foi aplicada por meio de um sistema óleo-gás ligado a cilindros de nitrogênio. Válvulas reguladoras de pressão permitiam o ajuste da pressão desejada a ser aplicada no sistema solo-geotêxtil (Fig. 3.1).

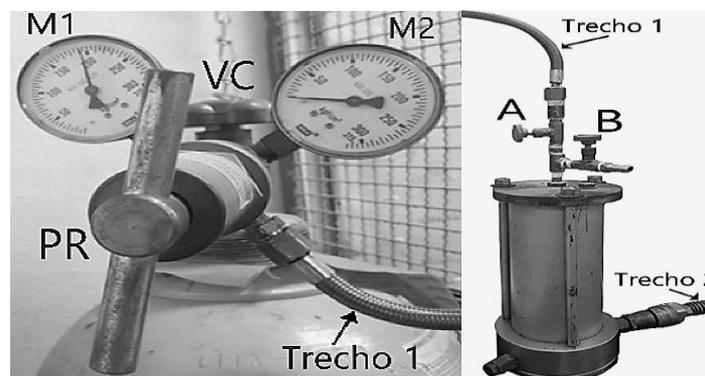


Figura 3.5. Cilindro de gás nitrogênio e interface óleo-gás

Os passos seguidos no manuseio do sistema óleo-gás foram os seguintes:

- a) Verificação se o parafuso de regulagem (PR, Fig. 3.5) estava fechado, ou seja, se estava todo girado no sentido anti-horário, pois o PR é que controla a quantidade de gás que seria liberado para o trecho 1;
- b) A válvula VC, que permite a saída de gás, deveria estar fechada;
- c) Manutenção da válvula A aberta e a válvula B fechada.

Para começar a aplicação da tensão vertical:

- a) Abertura parcialmente de VC e seguida do giro de PR, no sentido horário, até a descida do pistão do cilindro hidráulico e a detecção (pela leitora) da aplicação de força. Importante: girar muito lentamente, pois o valor lido na leitora não seria imediato;
- b) Caso o valor na leitora for superior ao desejado, controlá-lo por meio da válvula B (Fig. 3.5) aberta para a saída do gás e a redução do valor. Em seguida, fechamento da válvula B e giro de PR no sentido anti-horário;
- c) A partir deste ponto, o controle da força foi por meio de PR.

3.1.1.1 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

A lei de Darcy foi usada para calcular o coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil, conforme mostrado na Equação (3.1):

$$k_{sg} = \frac{V \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t} \quad (3.1)$$

Onde: k_{sg} = coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil;

V = volume de água;

L = altura da amostra de solo;

Δh = perda de carga;

A = área da seção transversal da amostra de solo;

t = tempo.

A Equação 3.2 corrige o resultado da permeabilidade do sistema de acordo com a temperatura:

$$k_{20} = k_t \frac{\mu_t}{\mu_{20}} \quad (3.2)$$

Onde: k_{20} = permeabilidade na temperatura 20°C;

k_t = permeabilidade na temperatura do ensaio;

μ_t = viscosidade da água na temperatura do ensaio;

μ_{20} = viscosidade da água na temperatura 20°C.

Com o valor do coeficiente de permeabilidade do solo entre duas portas (k_s) do permeâmetro (Fig. 3.2) dividido pelo coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil (k_{sg}), é possível obter a razão entre coeficientes de permeabilidade (k_R) pela Equação 3.3 (Palmeira & Fannin, 2002; Du *et al.*, 2022):

$$k_R = \frac{k_s}{k_{sg}} \quad (3.3)$$

3.1.1.2 RAZÃO ENTRE GRADIENTE (GR)

O teste de Razão entre Gradiente (GR) é frequentemente usado para avaliar o potencial de obstrução de sistemas solo-geotêxtil. No ensaio GR, um permeâmetro de parede rígida acomoda uma amostra cilíndrica de 100 mm de altura colocada sobre um geotêxtil (ASTM, 2017a). O GR_{ASTM} , com referência aos locais das portas laterais do permeâmetro 7, 9 e 12 (consulte a Fig. 3.2), pode ser definido pela Equação 3.4:

$$GR_{ASTM} = \frac{i_{9/12}}{i_{7/9}} \quad (3.4)$$

Onde: $i_{9/12}$: gradiente hidráulico entre os piezômetros 9 e 12;

$i_{7/9}$: gradiente hidráulico entre os piezômetros 7 e 9.

Fannin *et al.* (1994) adotaram a Razão entre Gradiente Modificada (GR_{mod}) considerando uma amostra de solo próxima ao filtro geotêxtil, conforme a Equação 3.5, com o objetivo de avaliar melhor o mecanismo de colmatção do geossintético

$$GR_{mod} = \frac{i_{10/12}}{i_{7/9}} \quad (3.5)$$

Onde: $i_{10/12}$: gradiente hidráulico entre os piezômetros 10 e 12 na Figura 3.2.

Gardoni (2000) propôs uma nova definição para Razão entre Gradiente ao considerar o gradiente hidráulico na região mais próxima ao filtro. É denominada GR_{3mm} e está expressa na Equação 3.6. Segundo a autora, os valores obtidos de GR_{3mm} podem ser bem maiores do que os propostos pela ASTM e por Fannin *et al.* (1994).

$$GR_{3mm} = \frac{i_{11/12}}{i_{7/9}} \quad (3.6)$$

Onde: $i_{11/12}$: gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 12 na Figura 3.2.

O valor obtido de GR informa que (Palmeira & Fannin, 2002):

- 1) $GR < 1$: informa que a água está perdendo menos carga hidráulica em um determinado trecho da amostra de solo, ou seja, a água está atravessando essa região com facilidade o que pode ser indicativo de erosão interna;
- 2) $GR = 1$: ocorre uma perda de carga uniforme através do sistema solo – filtro;
- 3) $GR > 1$: é indicativo de obstrução logo acima do filtro geossintético. A água está percolando com maior dificuldade pelo trecho da amostra de solo, o que proporciona um aumento no gradiente hidráulico nessa região.

Por esta razão, o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (1977) propôs que o GR de sistemas compósitos solo-geotêxtil deveria ser menor que 3 para evitar o potencial de obstrução catastrófica.

3.1.2 GRANULOMETRIA A LASER

Para a determinação da granulometria dos solos utilizou-se um analisador de partículas a laser da marca Bettersizer ST (Fig. 3.6), do Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Esse equipamento mede tamanho de partículas no intervalo de 0,0001 até 1 mm, possui sistema óptico de lentes duplas e desvio padrão inferior a 1%.



Figura 3.6. Granulômetro a laser.

3.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E ENSAIO ICP – OES

Os ensaios de Difração de Raios-X (DRX) de pó e ensaio de Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP – OES) foram realizados no Laboratório de Difração de Raios-X e no Laboratório de Geoquímica, respectivamente, no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

Segundo a Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (CAIQ), a Difração de Raios-X utiliza o equipamento difratômetro para amostras pulverizadas contendo tubo de raios X de cobre e monocromador de grafite. A técnica de DRX permite identificar e quantificar diferentes fases presentes em uma amostra pulverizada. A amostra precisa estar homogeneizada e na forma de pó finamente disperso, de forma que preencha completamente a cavidade do compartimento porta-amostra e fique rente ao plano superior do porta – amostra, como mostrado na Figura 3.7.

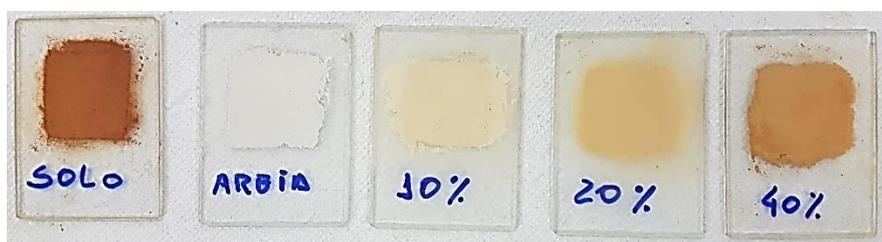


Figura 3.7. Amostras preparadas para DFR-X em pó.

A técnica Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*, em inglês), ou ICP-OES, mede a radiação eletromagnética emitida por átomos ou íons excitados pelo plasma nas regiões do espectro visível e ultravioleta. O objetivo é determinar os elementos que

compõe a amostra junto com a intensidade da radiação respectiva por meio de um comprimento de onda específico. Isso permite a quantificação dos elementos químicos (CSA, 2020). A amostra é examinada como uma solução e é submetida ao processo de nebulização. Em seguida, é mandada para vaporização, atomização, ionização e excitação (transição de um estado de menor energia para um de maior energia) na fonte de plasma para assim fornecer os espectros de emissão (CSA, 2020).

Foi necessário preparar as amostras antes de passar no equipamento de ICP – OES. Primeiramente, colocou-se 0,5 gramas de cada mistura (areia, areia + solo fino, e solo fino) em diferentes cadinhos de metal e homogeneizou-se cada material com 0,17 gramas de metaborato de lítio por 1 minuto. Além disso, um cadinho de metal contendo apenas metaborato de lítio foi preparado para ser a mistura de referência. Depois, inseriu-se os seis cadinhos no forno até se atingir a temperatura de 950°C e assim permaneceu por 30 minutos. Em seguida, eles foram retirados do forno, colocados num béquer junto com uma barra magnética e 60 ml de ácido clorídrico. Todos os recipientes foram submetidos à agitação por 20 min. Terminado o processo de agitação, as misturas foram transferidas para diferentes balões volumétricos com o auxílio de um funil de vidro e preenchidos com água milli-q até a marca de referência. Desta forma, as amostras foram preparadas para o ensaio. A Figura 3.8 apresenta o processo de agitação das misturas.



Figura 3.8. Agitação das misturas.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 GEOTÊXTIL NÃO TECIDO

Os geotêxteis não tecidos (GNT), de poliéster e agulhados, selecionados tinham massa por unidade de área de 200, 400 e 600 g/m² e seus códigos usados nesta pesquisa foram

GNT200, GNT400 e GNT600, respectivamente, e são apresentados na Figura 3.9. Os GNTs ficavam armazenados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. A Tabela 3.7 apresenta as propriedades físicas e hidráulicas dos geotêxteis informadas nos catálogos dos fabricantes. O GNT200 foi fabricado pela Mexichem Bidim Ltda. e corresponde a nomenclatura RT-10 no catálogo. O GNT400 e GNT600 foram fabricados pela Ober e suas nomenclaturas no catálogo são GH21 e GH31, respectivamente.

Os tamanhos das aberturas de filtração (O_{95}), por meio do ensaio de Ponto de Bolha dos geotêxteis não tecidos foram obtidos de outras pesquisas. O GNT200 tem 0,154 mm (Melo, 2018), o GNT400 tem 0,105 mm e o GNT600 tem 0,091 (Melo, 2023).

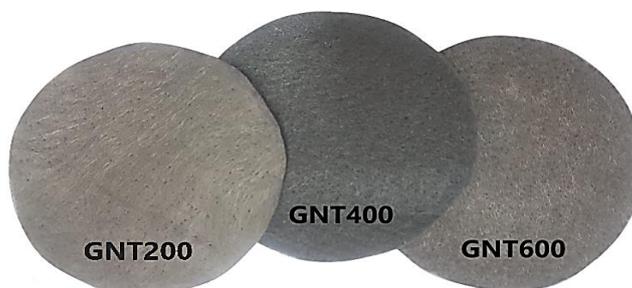


Figura 3.9. Geotêxteis não tecidos de 200, 400 e 600 g/m².

Tabela 3.7. Características dos geotêxteis não tecidos dados pelo fabricante.

Nome	Material	M_A (g/m ²)	t_{GT} (mm)	O_{95} (mm)	k_n (cm/s)	ψ (s ⁻¹)
GNT200	PET	200	1,9	0,1	0,30	2
GNT400	PET	400	3,3	0,063	0,38	1,15
GNT600	PET	600	4,2	0,03	0,34	0,8

Notas: M_A = massa por unidade de área do geotêxtil; t_{GT} = espessura do geotêxtil sob tensão normal de 2 kPa; O_{95} = tamanho da abertura igual ao tamanho da abertura de filtração; k_n = permeabilidade do geotêxtil normal ao seu plano; ψ = permissividade do geotêxtil.

3.2.2 MATERIAL DRENANTE

As esferas de aço (Fig. 3.10) possuem um diâmetro de 15 mm. Para sua colocação, foram preparados moldes com material de Etil Vinil Acetato (borracha EVA), garantindo que o espaçamento (s) dividido pelo diâmetro (d) da esfera fosse igual a 1 ou 2 ($s/d = 1$ ou 2).



Figura 3.10. Esferas de aço de 15 mm de diâmetro.

A placa perfurada usada tem 7238 mm² de área, 96 mm de diâmetro, com 112 orifícios de 2,8 mm de diâmetro. A Figura 3.11 mostra a parte inferior da placa perfurada com as aberturas para os encaixes dos pinos de sustentação e o lado superior com as aberturas para passagem de água.

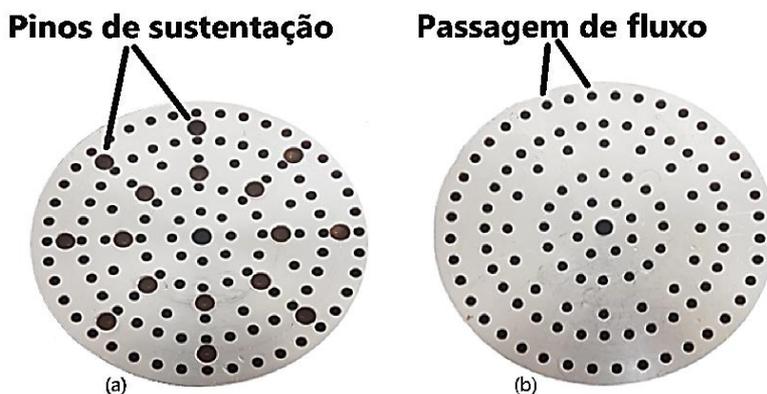


Figura 3.11. Detalhe da placa perfurada: (a) vista do lado inferior; (b) vista lado superior.

3.2.3 AREIA

A areia utilizada é quartzosa, não uniforme, de granulometria fina a média e com classificação *SP* pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2017b). A massa específica dos grãos foi 2,7 g/cm³. A Figura 3.12 mostra a granulometria da areia sem e com defloculante (*SD* e *CD*) e a Tabela 3.8 apresenta os dados obtidos da curva granulométrica da areia.

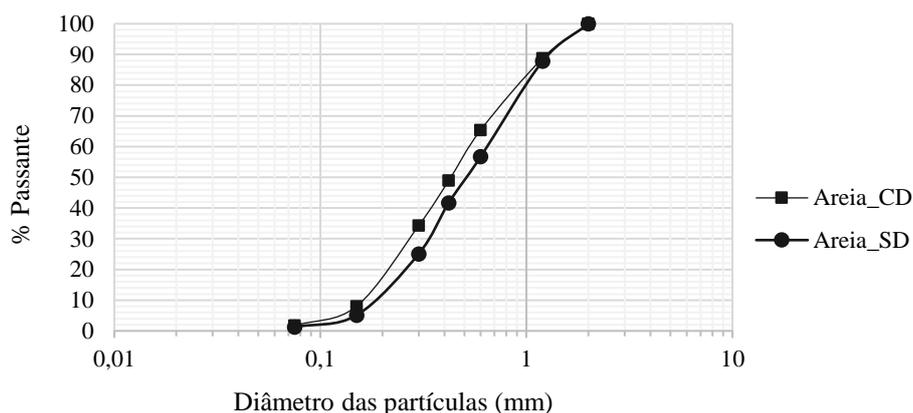


Figura 3.12. Curva granulométrica da areia.

Tabela 3.8. Características granulométricas da areia.

Sem defloculante (SD)							
D_{10} (mm)	D_{15} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	D_{95} (mm)	C_u	C_c
0,185	0,22	0,34	0,51	0,64	1,55	3,4	1
Com defloculante (CD)							
0,162	0,185	0,27	0,43	0,53	1,55	3,2	0,8

Notas: D_n = n % das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele, D_{50} = diâmetro médios dos grãos, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ = coeficiente de uniformidade, $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ = coeficiente de curvatura.

3.2.4 AREIA MAIS SOLO FINO

O solo fino utilizado foi coletado do antigo campo experimental de fundações da Universidade de Brasília (UnB) e estudado em outras pesquisas (Lopes, 2019; Ayala, 2020; Pérez Collantes, 2022). A Tabela 3.9 reúne as características desse solo obtidas dos trabalhos anteriores. No presente estudo foram preparados corpos de prova de areia com acréscimo de diferentes porcentagens desse solo fino (0, 10, 20 e 40%). O solo fino foi classificado como *CL* pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, *SUCS*, (ASTM, 2017b).

Tabela 3.9. Caracterização do solo fino.

	Lopes (2019)	Ayala (2020)	Pérez Collantes (2022)
Profundidade (m)	-	2 – 3	1
Classificação HRB (SD)	A – 7 – 6	A – 2 – 6	-

Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,7	2,71	2,72
Umidade (%)	19,65	19	20
Limite de Liquidez (%)	42	35	40
Limite de Plasticidade (%)	27	23	29
Índice de Plasticidade (%)	15	12	11
D₉₅ (mm) (SD)	0,9	0,45	0,6
D₉₅ (mm) (CD)	0,25	0,35	0,5

Notas: *SD* = Sem defloculante; *CD* = Com defloculante; *HRB* = *Highway Research Board*.

Foram realizados ensaios com areia e areia mais 10%, 20% ou 40% de material fino, com o objetivo de criar amostras com comportamento internamente instável. A Figura 3.13 apresenta as curvas granulométricas das misturas obtidas por sedimentação e peneiramento sem uso de defloculante (*SD*) e a Figura 3.14 com defloculante (*CU*). Além disso, nas figuras estão indicados os limites das aberturas de filtração (O_{95}) nos geotêxteis não tecidos de 200, 400 e 600 g/m².

A Tabela 3.10 resume as características dos materiais utilizados nesta pesquisa. Observa-se que as misturas são não uniformes e possuem coeficiente de uniformidade (C_u) elevados, o que podem indicar solos internamente instáveis. Os coeficientes de curvatura (C_c) dos materiais informam que as misturas são mal graduadas.

As massas específicas dos grãos das misturas foram obtidas pelo equipamento Penta-picnômetro, do Laboratório de Geotecnia da UnB, cujos resultados foram 2,675, 2,676, e 2,678 g/cm³, respectivamente, para 10%, 20% e 40% de porcentagem de solo fino.

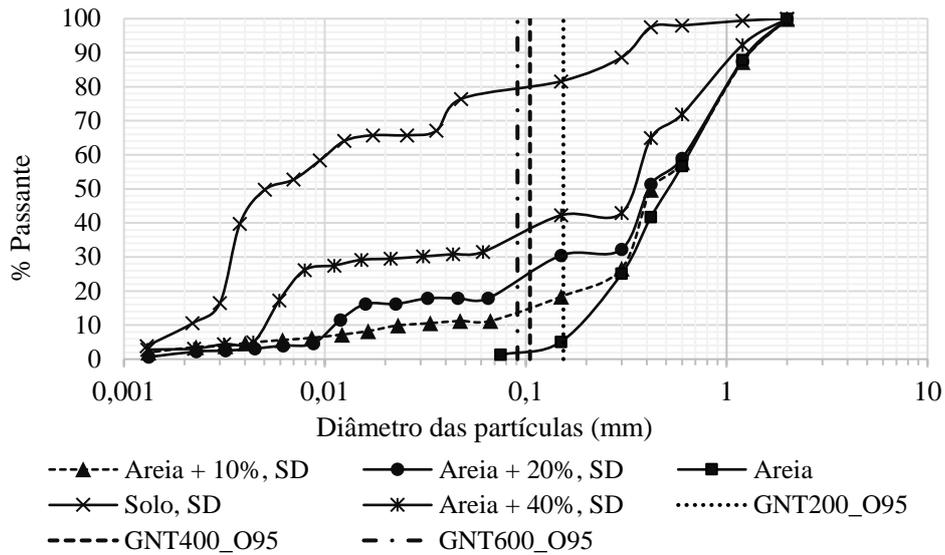


Figura 3.13. Curvas granulométricas dos materiais sem defloculante (SD).

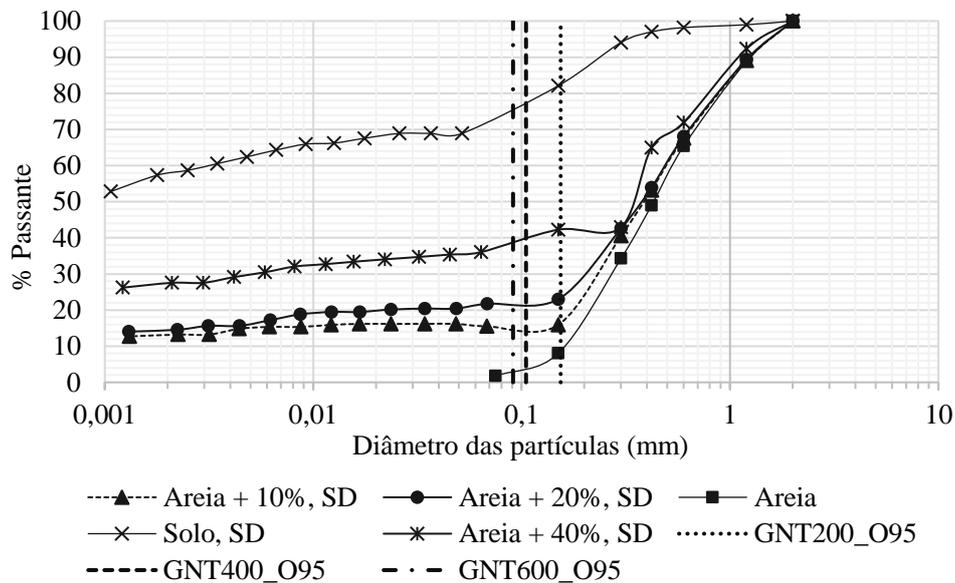


Figura 3.14. Curvas granulométricas dos materiais com defloculante (CD).

Tabela 3.10. Características dos materiais sem e com defloculante

Sem defloculante (SD)							
	C_u	C_c	D_{60}	D_{10}	D_{15}	D_{50}	D_{95}
Areia+10%	25,2	6,91	0,63	0,025	0,11	0,42	1,63
Areia+20%	55,86	3,06	0,62	0,0111	0,0144	0,41	1,6
Areia+40%	84,37	0,40	0,405	0,0048	0,0056	0,345	1,37
Solo fino	4,76	0,6	0,01	0,0021	0,0029	0,0051	0,38
Com defloculante (CD)							
Areia+10%	-	-	0,49	-	0,0045	0,38	1,55
Areia+20%	-	-	0,49	-	0,0026	0,37	1,55
Areia+40%	-	-	0,385	-	-	0,345	1,37
Solo fino	-	-	0,0032	-	-	-	0,32

A pesquisa analisou a mineralogia dos cinco materiais (areia, areia mais 10%, 20%, 40% de finos, e solo fino) por meio do ensaio de Difração de Raio-X, realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. A amostra de areia, areia + 10% ou 20% solo fino apresentaram predominância de quartzo (SiO_2) e microcline (KAlSi_3O_8), apenas aumentando um pouco a presença desses minerais à medida que a porcentagem de material fino aumentou. A areia + 40% de solo fino detectou, além de SiO_2 e KAlSi_3O_8 , caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). O solo do antigo campo experimental da UnB mostrou maior presença de quartzo, seguida por gibbsita, caulinita e hematita (Fe_2O_3), em ordem decrescente. Além disso, foi realizado o ensaio de ICP-OES para detecção dos elementos químicos das amostras, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Resultados dos ensaios de ICP-OES.

	Areia	Areia + 10%	Areia + 20%	Areia + 40%	Solo fino
Al₂O₃ (%)	1,97	3,94	8,32	14,57	19,94
CaO (%)	0,77	0,59	0,57	0,69	0,39
Fe₂O₃ (%)	0,64	1,57	3,27	5,72	9,04
MgO (%)	0,13	0,12	0,14	0,14	0,12
Na₂O (%)	0,24	0,17	0,16	0,09	0,19
SiO₂ (%)	100,96	89,04	94,16	75,58	43,05
TiO₂ (%)	0,13	0,32	0,56	0,83	0,94

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1 PREPARAÇÃO DO PERMEÂMETRO

Antes da preparação da amostra, a parede interna do permeâmetro foi revestida com vaselina sob um filme plástico, exceto nas aberturas das portas laterais do cilindro. O objetivo foi reduzir o atrito lateral solo-parede. Além disso, foram inseridos filamentos de geotêxtil nas saídas (parte externa) das portas do cilindro para impedir que partículas de solo saíssem. Esses filamentos eram trocados a cada ensaio para evitar que a colmatação influenciasse nos resultados seguintes. A Figura 4.1 mostra a colocação do filme plástico com o auxílio de uma haste metálica.

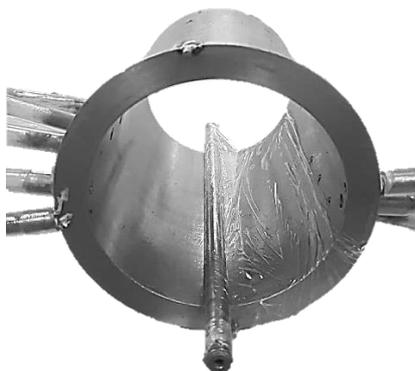


Figura 4.1. Colocação do filme plástico na face interna do permeâmetro.

4.2 PREPARAÇÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO

A preparação da amostra de geotêxtil foi conforme a NBR ISO 9862 (ABNT, 2013) e os espécimes escolhidos ou apresentavam massa por unidade de área iguais ou com menor variação ($\pm 10\%$). Conforme Melo (2018), a variabilidade da massa por unidade de área gramatura foi suficiente para garantir a aleatoriedade da escolha dos espécimes. A Figura 4.2 mostra o geotêxtil de 600 g/m^2 para recorte. O procedimento para obtenção dos espécimes foi o seguinte:

1. Foram descartadas as duas primeiras voltas do rolo do geotêxtil por ficarem mais expostas a danos, poeira, rugas etc.;

2. Cortou-se a manta nas dimensões 2,10m x 1,50m;
3. Deixou-se o geotêxtil sobre uma superfície plana e limpa no qual permaneceu descansando por 24 horas;
4. A faixa longitudinal foi separada em quadrados de 250 x 250 mm;
5. Cada quadrado foi pesado e selecionadas as massas por unidade de área mais próximas (Fig. 4.3); e
6. Foram retirados cinco círculos de área 7238 mm² de cada quadrado e anotadas suas massa por unidade de área.



Figura 4.2. Malha de geotêxtil não tecido para recorte de quadrados de 250 x 250 mm.



Figura 4.3. Quadrados selecionados pela gramatura.

4.3 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA

A preparação da amostra de areia foi feita pela técnica de pluviação submersa, indicada para solos uniformes, gerando, segundo Vaid & Negusse (1988), amostras saturadas e

homogêneas na densidade pretendida e simulando o processo de deposição natural. Esses autores também informam que essa técnica consegue densidades relativamente baixas independente da altura de queda do material. Para obtenção de densidades maiores, pode-se aplicar vibração depois da pluviação. O procedimento seguido, descrito por Shi (1993) e Totto (2010), foi o seguinte:

- a) O geotêxtil foi submerso em água destilada durante 1 hora de fervura para a saturação. A saturação em água destilada é importante para evitar que bolhas de ar ficassem nos poros dos geotêxteis, o que poderia atrapalhar a passagem de partículas do solo e causar um falso entupimento;
- b) Utilizou-se uma amostra de 702 g de areia em um frasco de Erlenmeyer com 1000 ml de água destilada para ferver por 1 hora com o propósito de saturar e eliminar o ar aprisionado;
- c) Finalizada a saturação da areia e do geotêxtil, esperou-se o frasco esfriar até à temperatura ambiente e pesou-se o conjunto frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia + 1000 ml de água destilada (Wfws);
- d) O permeâmetro foi colocado totalmente submerso em água destilada e o geotêxtil saturado foi inserido na base do cilindro;
- e) Nos ensaios com as esferas de aço, um selante flexível de poliuretano foi passado nas bordas do geotêxtil (Fig. 4.4), acompanhando o formato do molde de borracha EVA, para garantir que a água passasse apenas nos vazios entre as esferas. Nos experimentos com o emprego apenas da placa perfurada, não foi utilizado o selante elástico;



Figura 4.4. Geotêxtil não tecido 200 g/m² com selante elástico, $s/d = 1$.

- f) Iniciou-se a deposição da areia colocando-se o tubo de descarga sob a superfície da água dentro do permeâmetro, conforme mostra a Figura 4.5, e esse processo demorou cerca de 15 minutos;



Figura 4.5. Deposição da areia no permeâmetro.

- g) A altura da amostra (50 mm) foi medida usando um paquímetro e uma peça de acrílico (espessura de 4 mm) formada por uma base circular e haste (Fig. 4.6);



Figura 4.6. Peça de acrílico e medição da altura da amostra com paquímetro.

- h) Caso ultrapassada a altura desejada da amostra, usava-se o processo de sifonagem e o excesso de material era levado à estufa para medir sua massa seca. Após a sifonagem, o permeâmetro era retirado da água;
- i) Com a amostra restante no frasco, preenchia-se com água destilada até o volume anterior à deposição da areia e mediou-se a massa do conjunto frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia restante dentro do frasco (W_{fwsf});
- j) Ao final do ensaio, o geotêxtil não tecido impregnado era levado à estufa à 105°C por 24 horas. Após a secagem, era pesado para o cálculo do grau de impregnação do geotêxtil. A Figura 4.7 ilustra o passo a passo do processo de pluviação submersa.

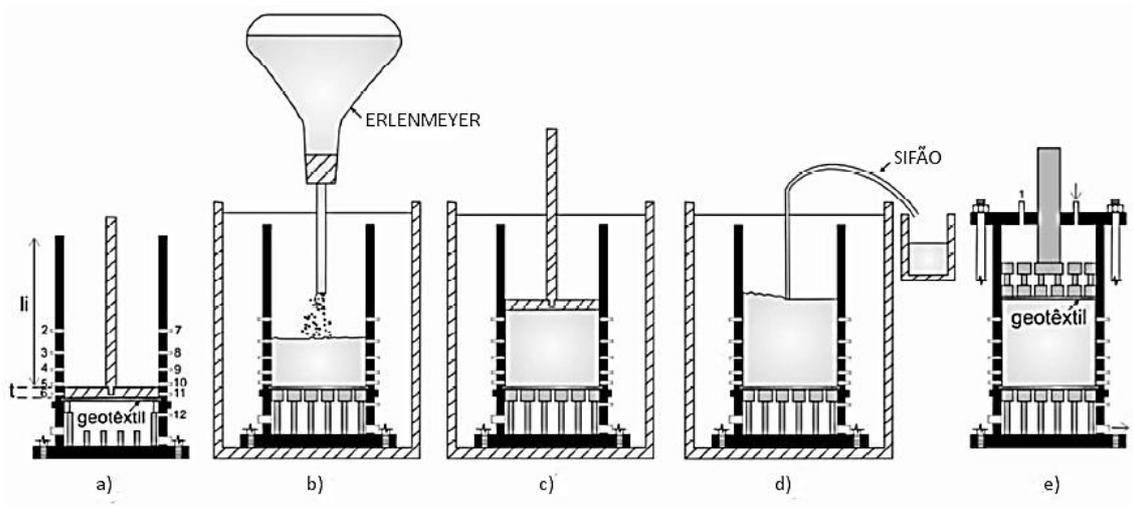


Figura 4.7. Pluviação submersa (Tatto, 2010).

O cálculo da altura (L) da amostra de areia era realizado por:

$$L = Hp - li - tp \quad (4.1)$$

Onde: L = altura da amostra;

Hp = altura da parte superior do permeâmetro (18,8 cm);

li = altura medida com o paquímetro;

tp = espessura da placa de acrílico perfurada (0,4 cm)

Com os pesos de $Wfws$ e $Wfwsf$ calculava-se a massa seca, índice de vazios e densidade da amostra. Calculou-se a massa seca por meio da Equação 4.2, na qual foi também utilizada por Bessa da Luz (2004) e Tatto (2010).

$$Wsd = \frac{\rho_s}{(\rho_s - 1)} * (Wfws - Wfwsf) \quad (4.2)$$

Onde: Wsd = massa seca da amostra;

ρ_s = massa específica dos grãos;

$Wfws$ = massa do frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia

$Wfwsf$ = massa do frasco + rolha de borracha + tubo de descarga flexível + areia final

O índice de vazios da amostra foi calculado pela Equação 4.3:

$$e = \frac{\rho_s * A * L}{W_{sd}} - 1 \quad (4.3)$$

Onde: e = índice de vazios;

ρ_s = massa específica dos grãos;

A = área da seção transversal do permeâmetro (72,38 cm²);

L = altura da amostra;

W_{sd} = massa seca da amostra de areia.

A densidade da amostra dentro do permeâmetro (D_s) foi considerada conforme a Equação 4.4:

$$D_s = \frac{W_{sd}}{A * L} \quad (4.4)$$

4.4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA MAIS SOLO FINO

Para os ensaios com mistura de areia com finos (0, 10%, 20% e 40% em massa), a técnica de preparação da amostra utilizada foi a de deposição de lama ou “*slurry method*”, para confecção de amostras homogêneas. Kuerbis & Vaid (1988) descreveram esse método e explicaram que a pluviação submersa com solos bem graduados tendem a segregar e organizar o solo em camadas com tamanhos de grãos crescendo com a profundidade.

O passo a passo do método executado adaptou o procedimento da ASTM D5101 (2017a) e está descrito abaixo.

- a) Colocou-se 702 (Md) gramas da mistura formada por areia mais a porcentagem de solo fino desejada para ferver em água destilada por 1 hora e 30 minutos para saturação. A areia e o solo fino apresentavam em torno de 0,25% e 2% de umidade natural respectivamente. O tempo de fervura foi determinado por testes prévios;
- b) O geotêxtil foi saturado ao permanecer submerso em água destilada por 1 hora de fervura;
- c) O permeâmetro foi inundado até o nível d’água indicado na Figura 4.8 antes de se colocar o solo dentro do cilindro;

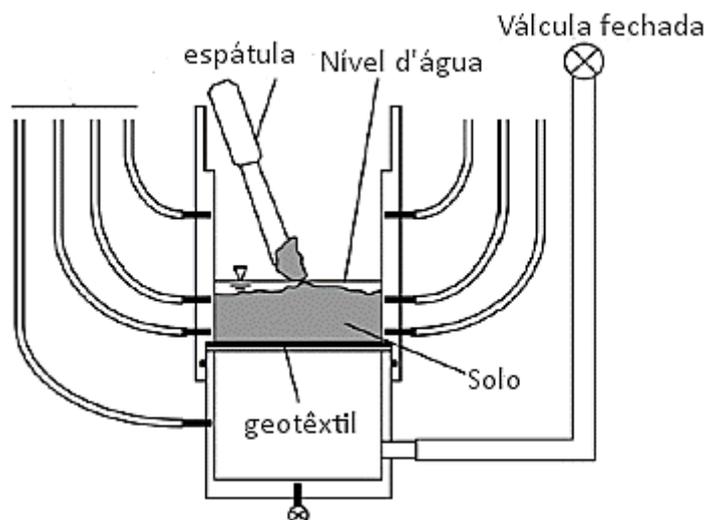


Figura 4.8. Deposição de Lama (modificado de ASTM, 2017a).

- d) Finalizada a saturação, a mistura foi pesada e, com o auxílio de uma espátula, começou-se a depositar pequenas quantidades da pasta no permeâmetro e sem nivelar a superfície do solo;
- e) À medida que o material era inserido no cilindro, a mistura restante ia sendo pesada para controle da densidade;
- f) Manteve-se entre 2 e 5 mm de água acima da pasta de solo dentro do permeâmetro e da lama do recipiente durante toda preparação da amostra para evitar a perda de saturação;
- g) Após a colocação do material necessário e com auxílio de algumas batidas nas laterais do permeâmetro com um martelo de borracha para alcançar a densidade pretendida, levou-se o solo remanescente à estufa por 24 horas e obteve-se a massa seca restante a fim de comparação com o cálculo realizado durante a preparação da amostra;
- h) A Equação 4.5 mostra o cálculo para a quantidade de água e a Equação 4.6 apresenta o cálculo para a amostra seca inserida no permeâmetro;

$$M_w = (M_{sat} - M_r) - M_d \quad (4.5)$$

$$M_s = \frac{(\rho_s * ((M_{sat} - M_r) - M_{re})) - M_w}{\rho_s - 1} \quad (4.6)$$

Onde: M_w = massa de água;

M_{sat} = massa da mistura saturada;

M_r = massa do recipiente usado para saturação;

M_d = massa da amostra seca;

M_s = massa da amostra seca dentro do permeâmetro;

M_{re} = massa da mistura restante;

ρ_s = massa específica dos grãos.

i) A densidade da amostra de areia mais solo fino (D_{sf}) foi obtida por:

$$D_{sf} = \frac{M_s}{A * L} \quad (4.7)$$

Onde: A = área do permeâmetro (7238 mm²);

L = altura da amostra.

4.5 PREPARAÇÃO DO ARRANJO DE ESFERAS DE AÇO

O número máximo de esferas de aço com 15 mm de diâmetro foi colocado sobre a placa perfurada de modo que assegurasse o valor do espaçamento (s) dividido pelo diâmetro da esfera (d) iguais a 1 e 2 (Fig. 4.9). Foram utilizadas 24 esferas no caso $s/d = 1$, enquanto para $s/d = 2$ foram 7 esferas.

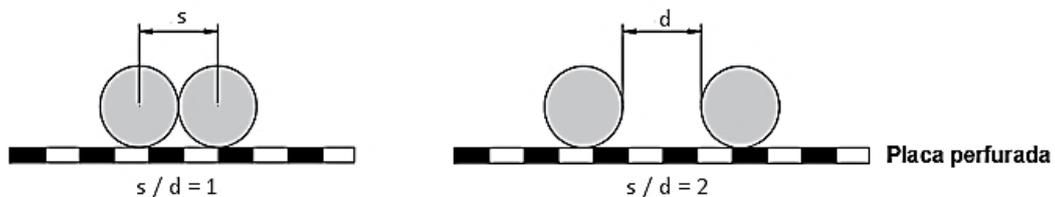


Figura 4.9. Espaçamento entre as esferas de aço.

Para garantir o arranjo das esferas, foram feitos moldes de Etil Vinil Acetato (borracha EVA) para a situação $s/d = 1$ ou 2 (Fig. 4.10). Cola epóxi foi aplicada na base das esferas de aço para assegurar suas posições sobre a placa perfurada no caso do espaçamento de $s/d = 2$. As alturas das fôrmas eram iguais ao diâmetro das esferas para não influenciar no cálculo da altura da amostra de solo e evitar o afundamento do geotêxtil nas laterais do material drenante.



Figura 4.10. Arranjo das esferas de aço com $s/d = 2$.

4.6 GRAU DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL

O grau de impregnação (λ) do geotêxtil é definido como a massa de solo impregnada dividida pela massa dos filamentos do geotêxtil (Eq. 4.8), ou seja:

$$\lambda = \frac{msi}{mf} \quad (4.8)$$

Onde: λ = grau de impregnação;

msi = massa de solo impregnada;

mf = massa de filamentos da amostra de geotêxtil.

Percebe-se a necessidade de calcular a massa de solo impregnada (msi), empregando a Equação 4.9, e a massa de filamentos do geotêxtil de acordo com a área impregnada do filtro (Eq. 4.10). Essa área impregnada muda conforme o espaçamento entre as esferas de aço ($s/d = 1$ ou 2), como ilustrado na Figura 4.11.

$$msi = m3 - m2 \quad (4.9)$$

$$mf = M_A \cdot A_i \quad (4.10)$$

Onde: $m3$ = massa do geotêxtil + adesivo selante + solo impregnado;

$m2$ = massa do geotêxtil virgem + adesivo selante;

M_A = massa por unidade de área do geotêxtil; e

A_i = área impregnada (em planta) da amostra de geotêxtil.

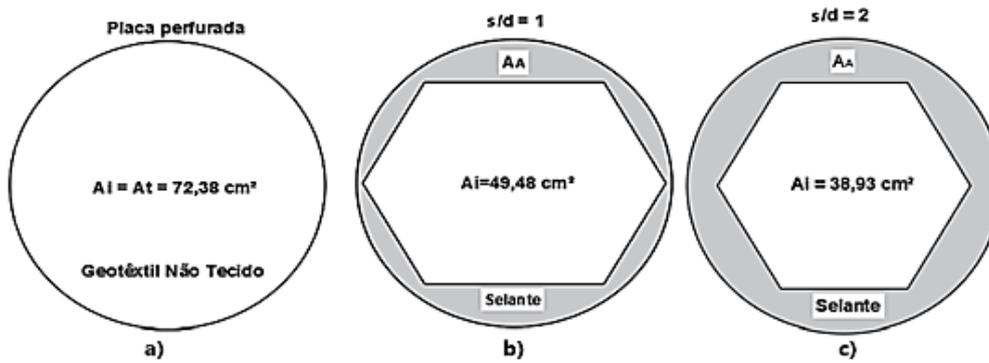


Figura 4.11. Áreas de impregnação no geotêxtil, a) Placa perfurada; b) $s/d = 1$; c) $s/d = 2$.

O cálculo da área impregnação da amostra de geotêxtil foi realizado com a Equação 4.11.

$$A_i = A_t - A_A \quad (4.11)$$

Onde: A_i = área impregnação da amostra de geotêxtil;

A_t = área total da amostra de geotêxtil (7238 mm²); e

A_A = área do geotêxtil com adesivo selante.

4.7 AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTEL

O afundamento do geotêxteis não tecido de 200, 400 e 600 g/m² entre as esferas de aço de 15 mm de diâmetro foi obtido posicionando uma folha de papel alumínio entre as esferas e o geossintético. A folha de papel alumínio foi colada com um pouco de cola branca nas esferas para garantir a fixação da folha. O tempo de aplicação para cada uma das tensões verticais de 25 e 100 kPa durou 2 horas. Após esse tempo, o afundamento foi medido utilizando um dispositivo formado por quatro lâminas de aço de espessura 0,4 mm para apoiar o paquímetro digital, conforme mostrado na Figura 4.12.

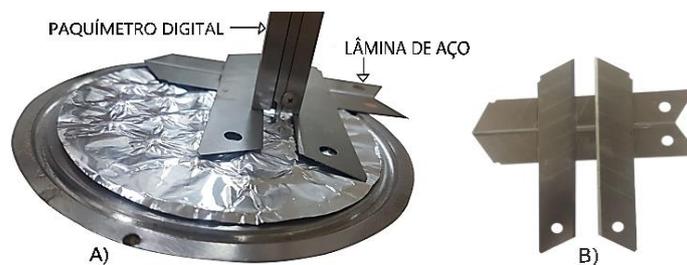


Figura 4.12. a) Medição do afundamento do geotêxtil na folha de alumínio, e b) dispositivo para medição.

O cálculo do afundamento máximo (δ_{max}) foi obtido por meio da Equação 4.12.

$$\delta_{max} = M - tl \quad (4.12)$$

Onde: δ_{max} = afundamento máximo do geotêxtil;

M = afundamento obtido pelo paquímetro;

tl = espessura da lâmina de aço (0,4 mm)

A Figura 4.13 indica os pontos medidos entre os arranjos das esferas de aço para o espaçamento dividido pelo diâmetro das esferas igual a 1 e 2. As medições foram separadas em três grupos, conforme as semelhanças nas condições de contorno das esferas. Os pontos destacados em vermelho são as medições dos afundamentos máximos ($\delta_{máx}$) posicionados no encontro das medianas do triângulo formado a cada três esferas, e configura o grupo 1; o grupo 2 representa os pontos na cor cinza; e o grupo 3 seleciona os pontos na cor preta.

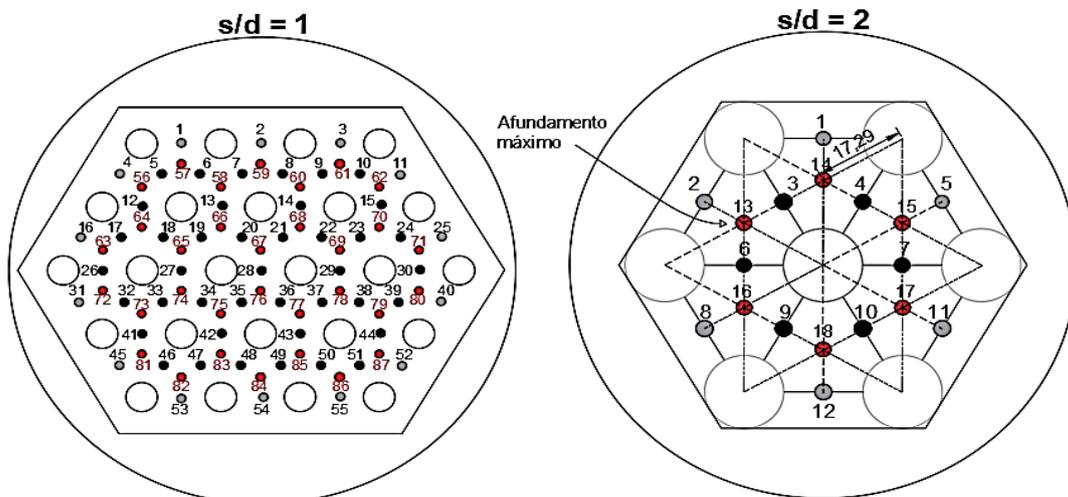


Figura 4.13. Pontos para medição do afundamento da folha metálica nos espaços entre as esferas

5 RESULTADOS

5.1 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE INTERNA DAS AMOSTRAS

A Figura 5.1 apresenta a construção dos gráficos para avaliação da estabilidade interna das amostras de solo, conforme o método de Kenney & Lau (1985). A Figura 5.2 mostra as curvas formadas através das coordenadas obtidas das curvas granulométricas das amostras de areia e misturas, sem o uso de defloculante. De acordo com o método de Kenney & Lau (1985), a amostra de areia é internamente estável e as amostras de solo podem ser consideradas como internamente instáveis.

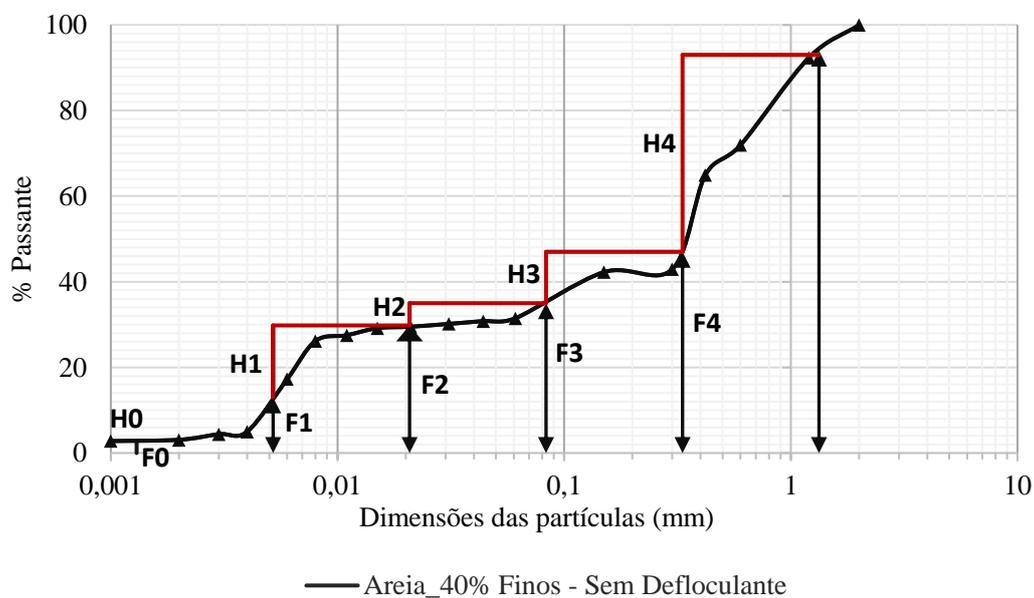


Figura 5.1. Coordenadas para construção do gráfico de estabilidade interna.

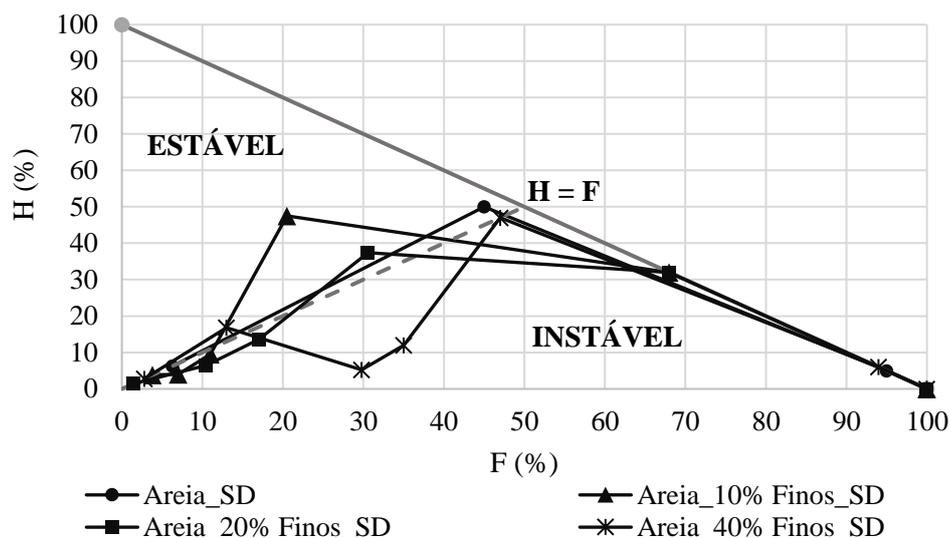


Figura 5.2. Verificação da estabilidade interna das amostras de areia e misturas por Kenney & Lau (1985).

A Tabela 5.1 mostra os resultados para as amostras ao aplicar o método de Burenkova (1993). Nota-se que o método de Burenkova (1993) admite a mistura areia + 10% de finos como internamente estável.

Tabela 5.1. Verificação da estabilidade das amostras por meio do método de Burenkova (1993).

	$0,76 \cdot \log(h_2) + 1$	\leq	h_1	\leq	$1,86 \cdot \log(h_2) + 1$	
Areia	1,671	\leq	2,097	\leq	2,643	Estável
Areia + 10% Finos	1,815	\leq	2,063	\leq	2,995	Estável
Areia + 20% Finos	2,486	\leq	2,097	\leq	4,637	Instável
Areia + 40% Finos	2,743	\leq	2,716	\leq	5,565	Instável

5.2 ENSAIO DE FILTRAÇÃO EM SISTEMAS SOLO – GEOTÊXTIL

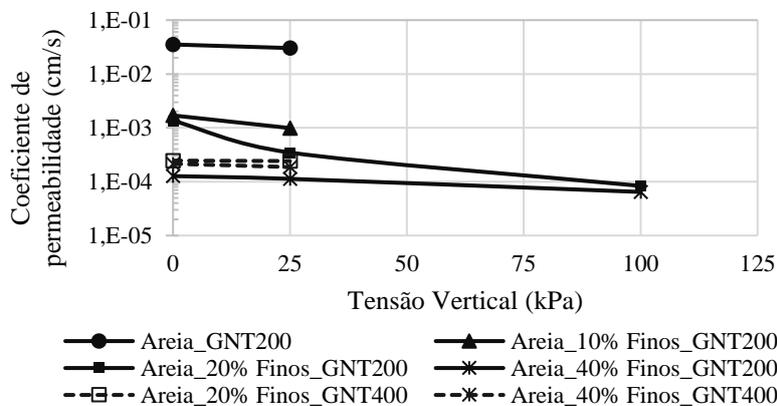
Para confirmar que os ensaios de permeabilidade foram confiáveis, repetições foram realizadas com amostras de solo mais GNT200 e 400. Esses testes estão apresentados no Apêndice C e apresentaram boa concordância.

5.2.1 INFLUÊNCIA DA TENSÃO VERTICAL

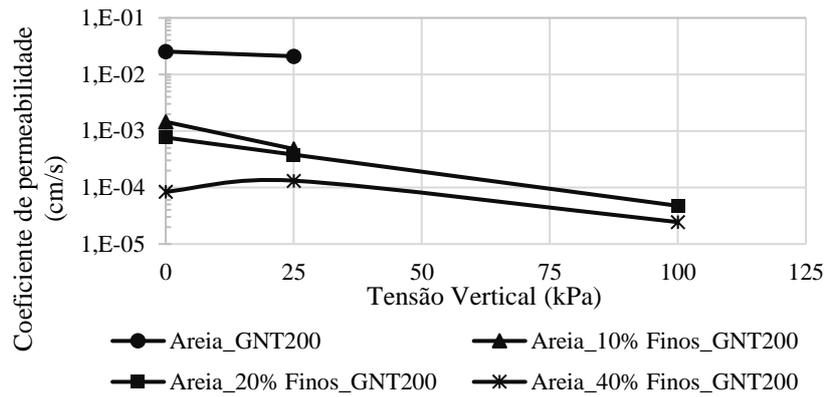
A Figura 5.3 apresenta os coeficientes de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil não tecido (k_{sg}) de 200 g/m² em função da tensão vertical e utilizando as esferas de aço com s/d igual a 1. A permeabilidade do conjunto solo – geotêxtil reduziu-se com o incremento da tensão vertical de 0, 25 e 100 kPa nas amostras de areia, e misturas para ambos os gradientes hidráulicos de 1 e 10. Essa tendência está em concordância com pesquisas realizadas por Du *et al.* (2022), Brito (2020) e Tatto (2010), por exemplo.

Resultados mostraram que a permeabilidade da areia no ensaio com GNT200 foi relativamente constante ($\cong 3 \times 10^{-2}$ cm/s), mesmo com a tensão aplicada no topo da amostra. Isso foi semelhante em ambos os gradientes hidráulicos e pode ser devido ao fato da areia ter sido classificada como internamente estável.

A tensão vertical de 25 kPa mostrou uma maior influência nos ensaios das misturas com 10% e 20% de finos. No caso de 20% de finos, no gradiente hidráulico (i) de 1, a permeabilidade do sistema solo-filtro mudou de $1,36 \times 10^{-3}$ cm/s (0 kPa) para $1,27 \times 10^{-4}$ cm/s (25 kPa), enquanto com $i = 10$ a diminuição aconteceu de $7,65 \times 10^{-4}$ cm/s para $8,43 \times 10^{-5}$ cm/s. O emprego de 100 kPa também provocou uma diminuição de permeabilidade nos testes com as misturas com 20% ou 40% de finos. Porém, observou-se que no ensaio com 40% de finos a aplicação da tensão vertical de 25 kPa proporcionou um ligeiro aumento no comportamento filtrante, ao comparar com 0 kPa, para o gradiente hidráulico de 10. No geral, o aumento do gradiente hidráulico de 1 para 10 ocasionou um declínio na permeabilidade dos sistemas solos-geotêxteis, como também foi observado por Hong & Wu (2011).



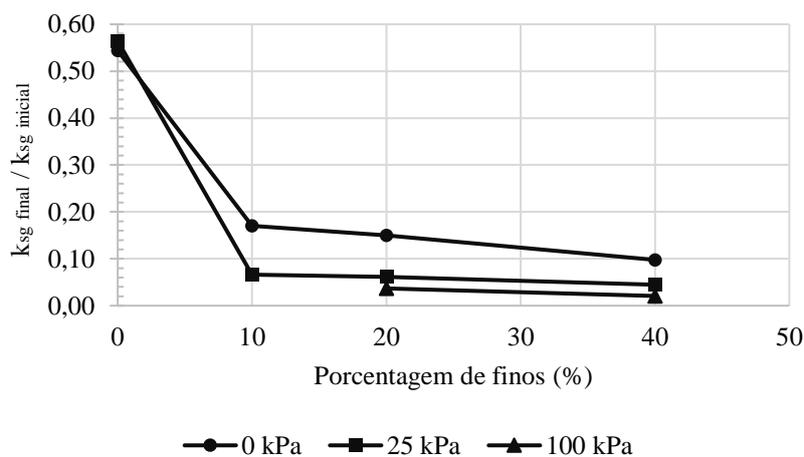
(a) $s/d = 1$, $i = 1$



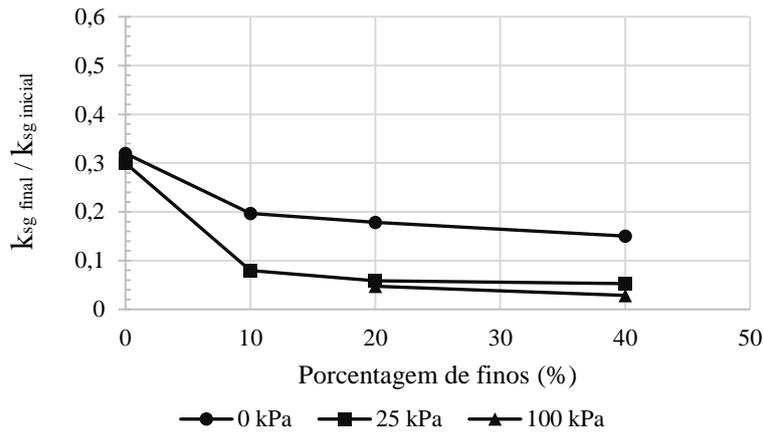
(b) $s/d = 1$, $i = 10$

Figura 5.3. Permeabilidade do sistema solo-geotêxtil versus tensão vertical no GNT200 e 400.

A Figura 5.4 mostra a influência do aumento da porcentagem de finos nas amostras de areia nos ensaios com gradientes hidráulicos de 1 e 10 (Apêndice D), com geotêxtil de 200 g/m². Nos ensaios com ausência de tensão vertical aplicada e gradiente hidráulico de 1, a presença do solo fino teve muita influência na redução da relação $k_{sg\text{final}}/k_{sg\text{inicial}}$, variando de 0,54 no ensaio com amostra apenas de areia, e diminuindo para menos de 0,1 no ensaio com areia + 40% de material fino. Com gradiente hidráulico de 10, a diferença foi menor entre o teste de areia e areia + 40% de finos. Para ambos os gradientes hidráulicos, no emprego de 25 ou 100 kPa o aumento da quantidade de finos de 10% para 40% interferiu menos no comportamento filtrante dos sistemas.



(a) GNT200_ $s/d = 1$, $i = 1$



(a) GNT200_ $s/d = 1$ $i = 10$

Figura 5.4. Influência da porcentagem de finos (%) em função da tensão vertical.

5.2.2 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DRENANTE

A Figura 5.5 exibe as permeabilidades dos sistemas solo-geotêxtil não tecido de 200 g/m² com o propósito de comparar a influência do material drenante sob o filtro e submetido ao gradiente hidráulico igual a 1 ou 10. Notou-se que nos ensaios apenas com areia, sem tensão vertical aplicada e esferas de aço, o coeficiente de permeabilidade normal (k_{sg}) foi $3,53 \times 10^{-2}$ cm/s. No ensaio apenas com a placa perfurada, o k_{sg} diminuiu para $1,5 \times 10^{-2}$ cm/s. A redução na permeabilidade do sistema foi notada para todas as porcentagens de solo fino nas misturas. Por exemplo, com 10% de finos, primeiro o coeficiente de permeabilidade ficou em $1,7 \times 10^{-3}$ cm/s com a presença das esferas de aço. Na situação apenas com a placa perfurada, o k_{sg} diminuiu para $1,26 \times 10^{-3}$ cm/s. O mesmo comportamento foi observado para a tensão vertical de 25 kPa.

Em resumo, a placa perfurada reduziu um pouco a permeabilidade de todos os sistemas ensaiados em relação aos com as esferas de aço de 15 mm, considerando $s/d = 1$. A mesma tendência foi notada para o gradiente hidráulico de 10. Além disso, o aumento do gradiente hidráulico diminuiu um pouco o coeficiente de permeabilidade de todos os sistemas (com esferas de aço ou placa perfurada), como ilustra a Figura 5.5b. Apesar da pesquisa de Tatto (2010) concluir no geral que as esferas de aço reduziam a vazão em comparação à placa perfurada, um dos resultados indicou comportamento inverso, embora ainda dentro da mesma ordem de grandeza.

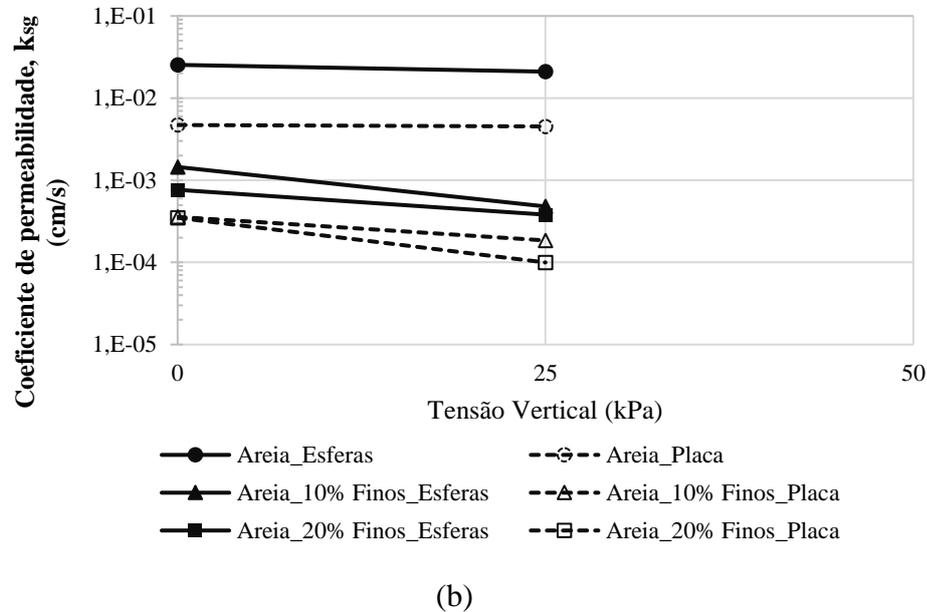
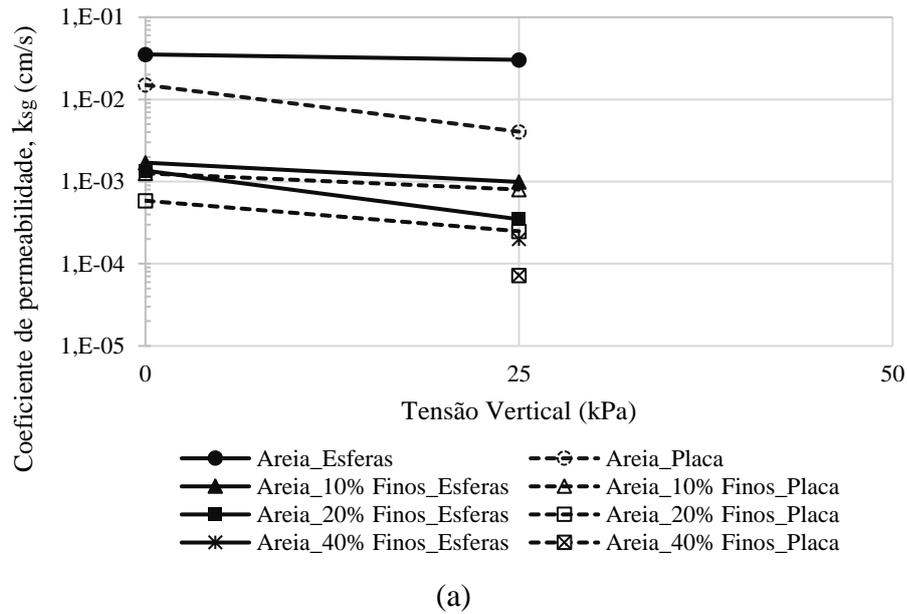


Figura 5.5. Influência das esferas de aço ($s/d = 1$) e placa perfurada com GNT200: a) $i = 1$; b) $i = 10$.

5.2.3 INFLUÊNCIA DA MASSA POR UNIDADE DE ÁREA DOS GEOTÊXTEIS

A Tabela 5.2 mostra que o aumento da massa por unidade de área proporcionou uma queda na permeabilidade do conjunto areia + 20% ou 40% de finos para o gradiente hidráulico de 1, com tensão vertical de 0 ou 25 kPa e $s/d = 1$. Por exemplo, cenário sem tensão vertical aplicada, no ensaio com 20% de finos e utilizando o GNT200, o k_{sg} começou com $1,36 \times 10^{-3}$ cm/s. Ao trocar o geotêxtil para GNT400, houve uma redução para $2,46 \times 10^{-4}$ cm/s. Com a aplicação da tensão normal de 25 kPa, a permeabilidade

desse sistema diminuiu. Nas amostras de areia + 40% de finos, também ocorreu uma redução da permeabilidade do sistema com o aumento da massa por unidade de área, porém a ordem de grandeza de 10^{-4} cm/s foi mantida.

Segundo Du *et al.* (2022), a razão para o aumento da gramatura provocar uma redução na permeabilidade do solo-filtro geossintético é devido aos poros curvos e contínuos no geotêxtil não tecido que formam seu canal de filtração. Além disso, a espessura do geotêxtil é uma importante propriedade que influencia o tamanho do canal de fluxo do geotêxtil.

O aumento do gradiente hidráulico de 1 para 10 propiciou uma diminuição no coeficiente de permeabilidade em uma ordem de grandeza para GNT200 e GNT600, de 10^{-4} para 10^{-5} cm/s. Todos os ensaios também apresentaram coeficientes de permeabilidade inferiores ao variar somente o aumento da quantidade de solo fino presente na amostra. No geral, as reduções nas permeabilidades dos sistemas solo - geotêxtil em função do aumento da massa por unidade de área dos geossintéticos não foram significantes.

Tabela 5.2. Influência da massa por unidade de área gramatura do geotêxtil com $s/d = 1$ no valor de k_{sg} (cm/s).

	Gradiente hidráulico (i)	Solo fino (%)	Tensão vertical (kPa)	
			0	25
GNT200	1	20%	$1,36 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-4}$
		40%	$1,27 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-4}$
	10	20%	-	$8,70 \times 10^{-5}$
		40%	-	$3,81 \times 10^{-5}$
GNT400	1	20%	$2,46 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-4}$
		40%	$2,15 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-4}$
	10	20%	-	$2,03 \times 10^{-5}$
				-
GNT600	1	20%	-	$2,31 \times 10^{-4}$
		40%	-	$1,10 \times 10^{-4}$
	10		-	$2,14 \times 10^{-5}$
				-

5.2.4 INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE ESFERAS DE AÇO

O espaçamento entre as esferas de aço (s/d) igual a 2 diminuiu o coeficiente de permeabilidade do conjunto solo-geotêxtil (k_{sg}) nos ensaios utilizando a porcentagem de 40% de finos (Tab. 5.3). No ensaio sem a aplicação da tensão vertical, com o geotêxtil não tecido de 200 g/m² e $s/d = 1$ ocorreu um ligeiro aumento na permeabilidade quando comparada com $s/d = 2$. Porém, o emprego das tensões verticais de 25 e 100 kPa fez reduzir um pouco a permeabilidade junto com o aumento do espaçamento entre as esferas. Além disso, é possível observar como a massa por unidade de área também afetou o desempenho do sistema, diminuindo a permeabilidade do mesmo com o aumento da massa por unidade de área do geotêxtil.

Tabela 5.3. Influência do espaçamento entre as esferas de aço com areia + 40% de finos na permeabilidade do k_{sg} , $i = 1$.

s / d	Tensão vertical (kPa)	GNT200	GNT400	GNT600
		40%		
		k_{sg}	k_{sg}	k_{sg}
1	0	1,27 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻⁴	-
	25	1,13 x 10 ⁻⁴	1,87 x 10 ⁻⁴	1,10 x 10 ⁻⁴
	100	6,32 x 10 ⁻⁵	-	-
2	0	2,18 x 10 ⁻⁴	1,99 x 10 ⁻⁴	1,05 x 10 ⁻⁴
	25	1,00 x 10 ⁻⁴	-	-
	100	5,86 x 10 ⁻⁵	3,76 x 10 ⁻⁵	3,24 x 10 ⁻⁵

5.2.5 ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DO SOLO APÓS OS ENSAIOS

A areia utilizada nos ensaios foi uma areia não uniforme e bem graduada. Apesar do método de pluviação submersa ser indicado para areias uniformes, Kuerbis & Vaid (1988) explicaram que a pluviação submersa com solos bem graduados tendem a segregar e organizar o solo em camadas com tamanhos de grãos crescendo com a profundidade. A Tabela 5.4 apresenta os resultados das amostras de areia retiradas do topo, meio e base do corpo de prova de solo em referência aos diâmetros de 85% passante das partículas no topo da amostra de solo (D_{85t}), 85% passante das partículas no meio da amostra (D_{85m}) e 85% passante dos grãos na base da amostra de solo (D_{85b}). O D_{85} foi escolhido por ser um dos principais diâmetros usados nos critérios de retenção de geotêxtil (Tab. 2.2). Os diâmetros das partículas na Tabela 5.4 mostraram que não houve diferenças significantes ao longo da altura da amostra de areia.

Tabela 5.4. Diâmetros das partículas de areia do topo, meio e base, e $s/d = 1$.

Solo	Material drenante	i	Tensão Normal (kPa)	D_{85t}	D_{85m}	D_{85b}
Areia	Esferas	1	0	0,39	0,49	0,38
	Placa		0	0,35	0,38	0,37
	Esferas		25	0,4	0,4	0,39
	Placa		25	0,39	0,41	0,39
	Esferas	10	0	0,38	0,38	0,38
	Placa		0	0,41	0,4	0,39
	Esferas		25	0,37	0,375	0,36
	Placa		25	0,39	0,38	0,38

Notas: D_{85t} = diâmetro de 85% passante no topo da amostra; D_{85m} = diâmetro de 85% passante no meio da amostra; D_{85b} = diâmetro de 85% passante na base da amostra.

Os resultados obtidos pelo granulômetro a laser estão listados na Tabela 5.5 com a utilização do geotêxtil não tecido de 200 g/m² e $s/d = 1$. Os resultados estão em função dos diâmetros dos grãos que passaram ou foram retidos dentro do geotêxtil. Para os sistemas solo-geotêxtil (k_{sg}) formados apenas por amostras de areia, não foram possíveis as coletas dos materiais passantes pelo filtro, tendo em vista a pequena proporção de finos contidos na matriz do solo, impossibilitando a análise granulométrica do material neste caso.

Tabela 5.5. Diâmetros das partículas das amostras após os ensaios com GNT200 e $s/d = 1$.

Solo	Geotêxtil	Material drenante	i	Tensão Normal (kPa)	O_{95} (mm)	D_{85b} (0-8mm)	D_{85p} (mm)	O_{95}/D_{85p}	D_{85i}
Areia + 10%	GNT200	Esferas	1	0	0,154	0,37	0,195	0,789	0,26
		Placa		0	0,154	0,379	0,18	0,905	0,26
		Esferas		25	0,154	0,38	0,145	1,1	0,33
		Placa		25	0,154	0,39	0,3	0,513	0,25
		Esferas	10	0	0,154	0,36	0,14	1,1	0,29
		Placa		0	0,154	0,38	0,17	0,855	0,25
		Esferas		25	0,154	0,37	0,14	1,062	0,24
		Placa		25	0,154	0,38	0,22	0,7	0,23
Areia + 20%	GNT200	Esferas	1	0	0,154	0,31	0,123	1,203	0,30
		Placa		0	0,154	0,35	0,13	1,185	0,27
		Esferas	10	25	0,154	0,38	0,14	1,1	0,30
		Esferas		100	0,154	0,36	0,15	1,027	0,28
		Placa		25	0,154	0,4	0,145	1,062	0,22
		Esferas		0	0,154	0,36	0,093	1,656	0,215

		Placa	0	0,154	0,37	0,115	1,339	0,21	
		Esferas	10	25	0,154	0,34	0,09	1,711	0,26
		Esferas		100	0,154	0,35	0,089	1,730	0,35
		Placa		25	0,154	0,38	0,132	1,167	0,205
		Esferas		0	0,154	0,25	0,17	0,906	0,24
		Esferas	1	25	0,154	0,27	0,085	1,812	0,20
		Esferas		100	0,154	0,325	0,04	3,85	0,235
		Placa		25	0,154	0,255	0,128	1,203	0,20
Areia + 40%	GNT200	Esferas		0	0,154	0,27	0,15	1,027	0,32
		Esferas	10	25	0,154	0,25	0,094	1,638	0,235
		Esferas		100	0,154	0,23	0,034	4,464	0,21

Notas: O_{95} = abertura de filtração; D_{85b} = diâmetro de 85% passante na base da amostra de solo; D_{85p} = diâmetro de 85% passante das partículas que atravessaram o filtro geotêxtil; D_{85i} = diâmetro de 85% passante das partículas impregnadas no geotêxtil.

Nos ensaios de areia + 10% de finos, os dados na interface solo-geotêxtil não foram muito influenciados pelas condições de apoio sob o filtro (placa perfurada ou esferas de aço), tensão vertical ou gradiente hidráulico. Assim, o D_{85b} permaneceu, em média, igual a 0,37 mm (Tab. 5.5). Porém, em ambos os gradientes hidráulicos, a placa perfurada tendeu a aumentar o valor de D_{85p} . A elevação da diferença de carga hidráulica de 1 para 10 fez partículas de menores diâmetros passarem pelo geotêxtil e ficarem impregnadas no filtro. Isso é consequência de uma maior movimentação dos finos em direção à maior força de percolação. Além disso, a tensão vertical de 25 kPa contribuiu para uma base da amostra de solo levemente mais graúda.

Com 20% de finos e livre de tensão vertical, a placa perfurada influenciou no aumento do D_{85b} na base da amostra de solo ao se comparar com as esferas de aço, para ambos os gradientes hidráulicos. Além disso, foi observado que a placa perfurada possibilitou o aumento de D_{85p} ao se confrontar com os resultados obtidos nos ensaios com as esferas.

Sob tensão vertical de 25 ou 100 kPa, a mudança do gradiente hidráulico de 1 para 10 fez os valores de D_{85b} e D_{85p} diminuírem nos ensaios com as esferas de aço, favorecendo a formação de camada de cegamento sobre o filtro. Com $i = 1$, a compressão vertical de 25 kPa aumentou o D_{85b} de 0,31 mm (0 kPa) para 0,4 mm (25 kPa), enquanto sob 100 kPa ele diminuiu para 0,36 mm. Assim, a compressão normal de 25 kPa resultou em uma base da amostra mais graúda.

No gradiente hidráulico de 10, ocorreu comportamento contrário. A compressão normal de 100 kPa fez crescer o tamanho de partículas impregnadas, de 0,26 mm (25 kPa) para 0,35 mm (100 kPa).

Para a porcentagem de finos de 40% e gradiente hidráulico de 1, o aumento da tensão vertical fez crescer ligeiramente o D_{85b} de 0,25 mm (0 kPa) para 0,27 mm (25 kPa) e, sob de 100 kPa, para 0,325 mm. O aumento da tensão vertical, sob o gradiente hidráulico de 1, favoreceu a perda de finos através do geotêxtil, enquanto o aumento da compressão normal no topo do sistema e gradiente hidráulico igual a 10 ajudou na formação da camada de cegamento acima do filtro. Ao mesmo tempo, com $i = 10$, partículas mais finas foram encontradas impregnadas no geotêxtil e uma maior fração de grãos finos conseguiu atravessar o filtro com o aumento da compressão vertical.

Em geral, o diâmetro de 85% passante das partículas que atravessaram o GNT200 foi 0,9 vezes o valor de O_{95} daquele geotêxtil (0,154 mm). Observaram-se grãos impregnados da ordem de 1,6 vezes maiores que o O_{95} .

A Tabela 5.6 reúne os dados para o geotêxtil não tecido de 400 g/m² e esferas de aço com $s/d = 1$. A tensão vertical de 25 kPa fez aumentar o D_{85b} , o que mostra perda de finos na base da amostra, além desse confinamento do solo ter reduzido D_{85p} e D_{85i} . Essas diferenças nos diâmetros das partículas foram observadas nos ensaios com + 20 ou + 40% de finos e gradiente hidráulico de 1. O aumento do gradiente hidráulico de 1 para 10 no ensaio com + 20% de finos fez com que grãos um pouco maiores atravessassem o filtro geotêxtil.

Tabela 5.6. Resultados dos ensaios após estabilização da permeabilidade no conjunto solo – geotêxtil 400 g/m² e $s/d = 1$.

Solo	Geotêxtil	Material drenante	i	Tensão Normal (kPa)	O_{95} (mm)	D_{85b} (0-8mm)	D_{85p} (mm)	O_{95}/D_{85p}	D_{85i}
Areia + 20%	GNT400	Esferas	1	0	0,105	0,306	0,11	0,954	0,38
				25		0,36	0,08	1,311	0,24
				10		25	0,38	0,088	1,193
Areia				0	0,027	0,041	2,560	0,26	

				25	0,105	0,265	0,025	4,2	0,19
+ 40%	GNT400	Esferas	1						

Percebe-se que o GNT400 deixou o material na interface solo-geotêxtil levemente mais fino por reduzir o D_{85b} quando comparado com o observado para GNT200 (Tab. 5.5). Isso aconteceu tanto para o conjunto com + 20% como + 40% de finos, nas condições impostas pelo gradiente hidráulico de 1 e tensão vertical de 0 ou 25 kPa. Assim, o GNT400 proporcionou um acúmulo um pouco maior de finos acima do filtro em relação ao GNT200 sob compressão vertical de 25 kPa. Além disso, o GNT400 resultou em menores partículas passantes pelo geotêxtil ao se comparar com o GNT200 (Tab. 5.5), para ambos os gradientes hidráulicos e tensões verticais de 0 e 25 kPa. Em geral, o diâmetro de 85% passante das partículas que atravessaram o GNT400 foi 0,65 vezes o O_{95} (0,105 mm) desse geotêxtil. Os grãos impregnados foram da ordem de 2,5 vezes o O_{95} (0,105 mm).

A Tabela 5.7 apresenta os resultados para o geotêxtil GNT600. Os valores de D_{85b} no ensaio de areia mais 20% de finos mostraram que o aumento da gramatura de GNT400 para GNT600 não resultou em mudanças significativas para o gradiente hidráulico de 1 e tensão vertical de 25 kPa. Com o GNT600 e amostra de areia mais 40% de finos, a elevação do gradiente hidráulico contribuiu para uma redução de D_{85b} e D_{85p} .

Em geral, o diâmetro correspondente a 85% passando das partículas que atravessaram o GNT600 foi 1,3 vezes o O_{95} (0,091 mm) do geotêxtil. Os grãos impregnados foram 2,3 vezes o O_{95} (0,091 mm). De forma semelhante ao observado para os geotêxteis GNT200, GNT400 e GNT600, Palmeira *et al.* (2012), utilizaram o geotêxtil não tecido de 200 g/m², esferas de aço de 18 mm e tensões normais acima de 20 kPa, e identificaram partículas passantes pelo filtro de diâmetro até 2 vezes maiores que o diâmetro de constrição obtido no teste de Ponto de Bolha.

Tabela 5.7. Resultados dos ensaios após estabilização da permeabilidade no conjunto solo-geotêxtil 600 g/m² e $s/d = 1$.

Solo	Geotêxtil	Material	i	Tensão Normal (kPa)	O_{95} (mm)	D_{85b} (0-8mm) Base	D_{85p} (mm) (SU)	O_{95}/D_{85p}	D_{85i}
Areia									
+ 20%	GNT600	Esferas	1	25	0,091	0,36	0,165	0,551	0,20

Areia		1	25		0,28	0,13	0,7	0,22
+ GNT600	Esferas			0,091				
40%		10	25		0,26	0,035	2,6	0,21

A Tabela 5.8 revela os dados dos ensaios com 40% de finos nas três gramaturas, gradiente hidráulico de 1 e espaçamento de $s/d = 2$. O aumento da tensão vertical proporcionou uma diminuição dos diâmetros das partículas na base da amostra para os três geotêxteis analisados. Assim, o aumento do espaçamento entre as esferas de aço e sob confinamento de 0, 25 e 100 kPa favoreceu algum acúmulo de finos logo acima do filtro.

Tabela 5.8. Diâmetro das partículas de solo nos conjuntos solo-geotêxtil 200, 400 e 600 g/m² e $s/d = 2$.

Solo	Geotêxtil	Material drenante	i	Tensão Normal (kPa)	O ₉₅ (mm)	D _{85b} (0-8mm) Base	D _{85p} (mm) (SU)	O ₉₅ /D _{85p}	D _{85i}
Areia + 40%	GNT200	Esferas	1	0	0,154	0,27	0,1	1,54	0,36
				25		0,045	0,113	1,363	0,34
				100		0,024	0,093	1,656	0,31
	GNT400	Esferas	1	0	0,105	0,24	0,135	0,777	0,35
				100		0,23	0,102	1,029	0,30
				0		0,091	0,185	0,11	0,827
100	0,025	0,105	0,866	0,29					

Ao analisar apenas a influência do espaçamento entre as esferas, para GNT200 (Tab. 5.5) foi observado um D_{85b} maior com $s/d = 2$ (0,27 mm) que com $s/d = 1$ (0,25 mm) na situação sem aplicação de tensão vertical e $i = 1$. Ao se aplicar as tensões verticais de 25 kPa e 100 kPa, o D_{85b} dos ensaios com $s/d = 2$ diminuiu em relação aos testes com $s/d = 1$.

A aplicação da tensão vertical de 100 kPa fez reduzir os valores de D_{85p} para os três geotêxteis não tecidos ensaiados, quando comparado com a tensão vertical de 0 kPa, e no espaçamento $s/d = 2$. Além disso, para GNT200 o aumento do espaçamento entre as esferas de 1 para 2, sob as tensões verticais de 25 e 100 kPa, favoreceu a passagem de grãos de maiores diâmetros quando comparados com o observado nos ensaios sem compressão normal.

Com o geotêxtil não tecido de 200 g/m², o sistema composto por areia mais 40% de finos teve o diâmetro das partículas retidas (D_{85i}) no GNT200 da ordem de 1,4 vezes maior que

o O_{95} (0,154 mm) para o posicionamento das esferas de $s/d = 1$; enquanto para $s/d = 2$ o D_{85i} foi, em média, 2,2 vezes o valor de O_{95} . Para o geotêxtil de 400 g/m² e $s/d = 1$, a amostra de solo com 40% de finos apresentou tamanhos de grãos da ordem de 2,1 vezes maiores que sua abertura de filtração, e para $s/d = 2$, o D_{85i} foi 3,1 vezes o O_{95} (0,105 mm). Para GNT600 as partículas encontradas foram de 2,3 vezes maiores que o O_{95} com $s/d = 1$; enquanto para $s/d = 2$, o D_{85i} foi 2,7 vezes maior que o O_{95} (0,091 mm).

O aumento do espaçamento entre as esferas proporcionou o aparecimento de partículas de maiores tamanhos impregnadas nos geotêxteis. Bessa da Luz (2004) também encontrou microesferas de vidro retidas no geotêxtil de 600 g/m² com diâmetros maiores que a abertura de filtração do geossintético nos ensaios de Razão entre Gradiente.

5.2.6 PERMEABILIDADE DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO

O estudo avaliou também a permeabilidade do geotêxtil não tecido impregnado após a finalização do ensaio com solo-geotêxtil de 200 g/m². Logo após o fim do ensaio, a amostra de solo de 5 cm foi retirada de sobre o filtro geossintético para realização do teste apenas com o geotêxtil impregnado. A Tabela 5.9 apresenta os coeficientes de permeabilidade do GNT200 com a utilização da placa perfurada sob o filtro. Todos os ensaios de permeabilidade do geotêxtil não tiveram aplicação de tensão vertical. Uma diferença de carga hidráulica de 10 mm foi imposta nos testes de permeabilidade. Essa diferença de carga hidráulica foi aumentada para 20 e 50 mm, consecutivamente, nos testes nos geotêxteis impregnados oriundos de ensaios em sistemas solo-geotêxtil com 10, 20 e 40% de finos. Pode-se observar que quanto maior a porcentagem de finos da amostra de solo do sistema solo-geotêxtil menor foi a permeabilidade do filtro geossintético após ensaio (Tab. 5.9). O aumento do gradiente hidráulico no ensaio de permeabilidade do geotêxtil após ensaio de filtração provocou aumentos no coeficiente de permeabilidade do geotêxtil, conforme mostra a Fig. 5.6. É possível que isso seja decorrência da ocorrência de fluxo turbulento para gradientes hidráulicos maiores, particularmente para a perda de carga total de 50 mm imposta no ensaio, além da remoção de partículas impregnadas no geotêxtil.

Tabela 5.9. Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil não tecido de 200 g/m² e $\Delta h = 10$ mm.

Solo	k_{gnt}
------	-----------

	(cm/s)
Areia	0,003
Areia + 10%	0,004
Areia + 20%	0,0038
Areia + 40%	0,001

Notas: Δh = diferença de carga hidráulica (mm); k_{gnt} = coeficiente de permeabilidade normal do geotêxtil após ensaio.

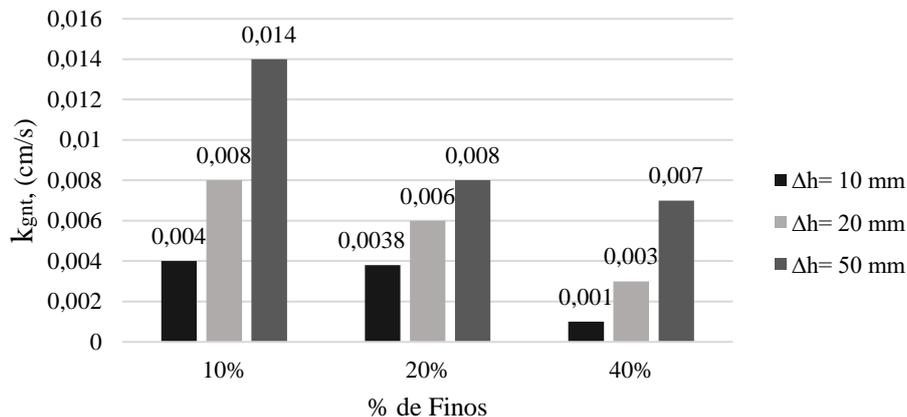


Figura 5.6. Influência da diferença de carga hidráulica na permeabilidade do geotêxtil (k_{gnt}) após ensaios de filtração em sistemas com 10, 20 e 40% de finos.

5.2.7 ANÁLISE DO GRAU DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTEL

A Figura 5.7 ilustra os resultados obtidos para a impregnação do geotêxtil não tecido de 200 g/m² após os ensaios com amostras de areia. Em relação ao material subjacente, a placa perfurada fez a impregnação diminuir na maioria dos casos em comparação com as esferas de aço. No gradiente hidráulico de 1, a tensão vertical de 25 kPa causou maior impregnação do GNT200, somente no caso da presença da placa perfurada sob o filtro. No geral, o aumento da diferença de carga hidráulica de 1 para 10 favoreceu um ligeiro aumento do grau de impregnação nos ensaios apenas com areia.

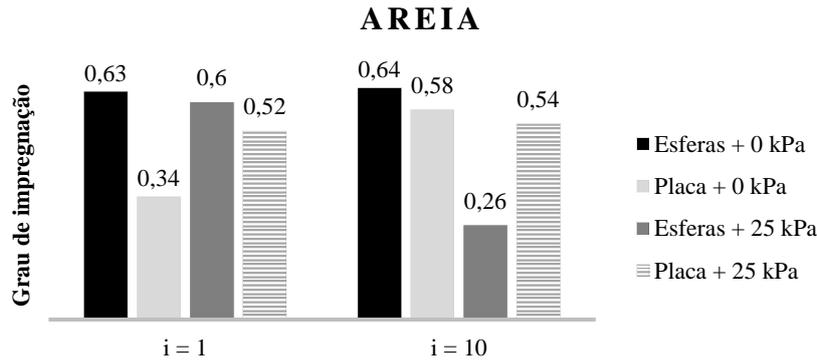


Figura 5.7. Grau de impregnação nas amostras de areia e GNT200, $s/d = 1$.

A Figura 5.8 mostra os resultados dos ensaios com areia + 10% de finos e GNT200. A placa perfurada também reduziu a impregnação ao se confrontar com as esferas de aço nos gradientes de 1 e 10. Na maior parte dos ensaios com areia + 10% de finos, o aumento do gradiente hidráulico fez a impregnação diminuir. O tamanho dos grãos impregnando o GNT200 nos ensaios com areia + 10% de finos ficou nas faixas de areia fina (entre 46,5 e 66 %) e areia média (entre 23 e 37 %).

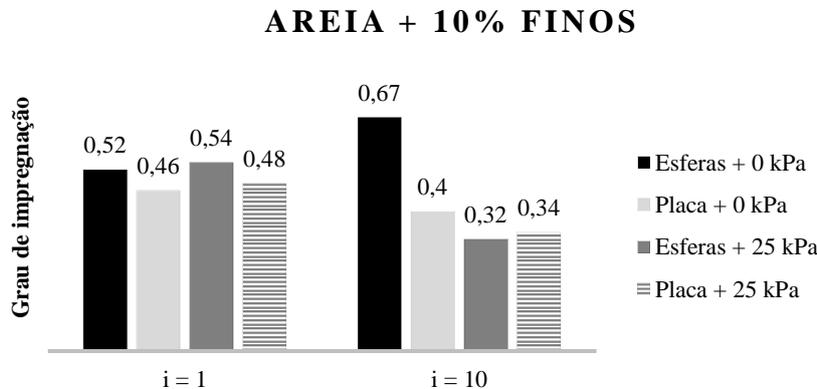


Figura 5.8. Grau de impregnação nas amostras de areia + 10% finos e GNT200, $s/d = 1$

A Figura 5.9 apresenta os resultados de ensaios com areia + 20% de finos e GNT200. A placa perfurada continuou apresentando a mesma tendência de resultados em relação às esferas de aço. O emprego de 25 kPa e 100 kPa, no gradiente hidráulico de 1, impregnou menos o filtro sintético, enquanto a amostra submetida a $i = 10$ fez o grau de impregnação se elevar com o aumento da tensão para 25 kPa, e cair para 100 kPa. Em geral, o crescimento no gradiente hidráulico para 10 provocou uma menor impregnação, exceto na tensão vertical de 100 kPa. Para gradientes maiores seria de se esperar uma maior

remoção dos grãos impregnando o geotêxtil em decorrência de uma maior força de percolação. Isso pode explicar a menor impregnação dos geotêxteis para $i = 10$ na maioria dos casos.

O tamanho de grãos impregnados nos ensaios com areia + 20% de finos e GNT200 apresentaram a predominância de areia fina (entre 52 e 71%), seguida por areia média (entre 15 e 44%). A exceção foi no ensaio com a aplicação de 100 kPa e $i = 10$, onde houve predominância de areia média (51%) em relação à areia fina (45%).

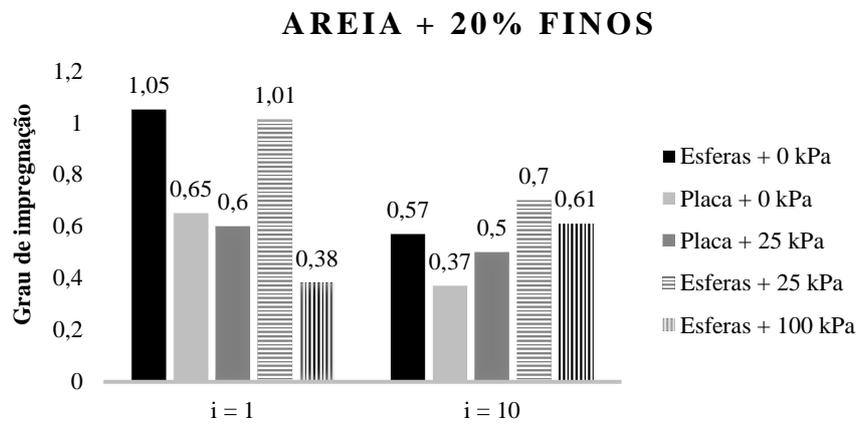


Figura 5.9. Grau de impregnação nas amostras de areia + 20% finos e GNT200, $s/d = 1$.

A Figura 5.10 exibe os resultados dos experimentos com areia + 40% de finos e GNT200. Ao utilizar as esferas de aço e no gradiente hidráulico de 1, o grau de impregnação teve um aumento ao se aplicar a tensão vertical de 25 kPa, seguido de uma redução na quantidade de partículas retidas no geotêxtil ao se aplicar 100 kPa. No gradiente hidráulico de 10 ocorreu a mesma tendência, mas sem mudanças relevantes nos valores da impregnação. O tamanho de grãos impregnados nos testes com areia + 40% de finos e GNT200 também não variou significativamente em todos os ensaios, com a predominância de areia fina (entre 51 e 78%), seguida por areia média (entre 15 e 48%).

AREIA + 40% FINOS

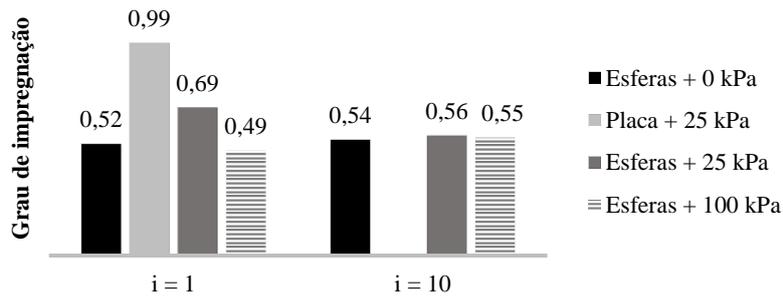


Figura 5.10. Grau de impregnação nas amostras de areia + 40% finos e GNT200, $s/d = 1$.

A Figura 5.11 apresenta o grau de impregnação em relação a massa por unidade de área do geotêxtil não tecido para a tensão vertical de 25 kPa. No gradiente hidráulico de 1, foi observado nas amostras de areia + 20% de finos que o aumento da massa por unidade de área do filtro geossintético fez o grau de impregnação diminuir, tendência esta não observada para o gradiente hidráulico de 10.

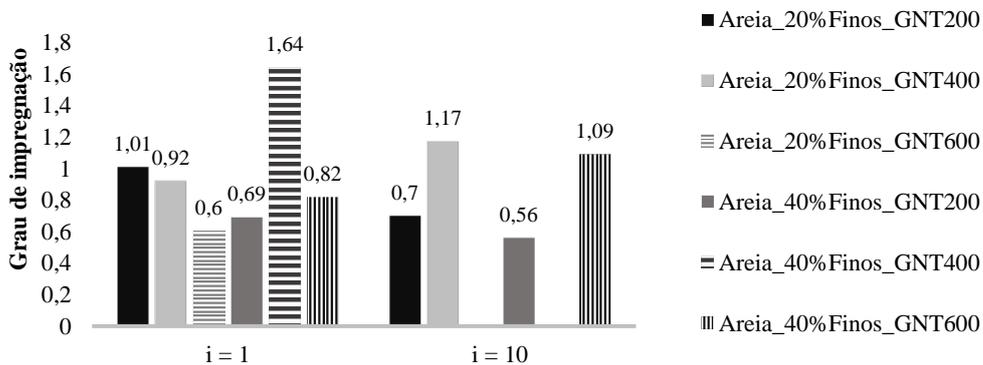


Figura 5.11. Grau de impregnação em função da massa por unidade de área do geotêxtil com 25 kPa, esferas de aço e $s/d = 1$.

A Figura 5.12 mostra os valores do grau de impregnação nos testes com areia mais 40% de finos, GNT200, 400 e 600, gradiente hidráulico de 1 e $s/d = 2$ para as esferas de aço. Com o geotêxtil não tecido de 200 g/m², à medida que se variou a tensão vertical aplicada, a impregnação se mostrou errática. O confinamento imposto na amostra com 25 kPa e GNT200 fez diminuir o grau de impregnação em relação ao ensaio sem tensão vertical. Além disso, nos ensaios com 100 kPa a impregnação cresceu com o aumento da massa por unidade de área.

Nesses ensaios com maior espaçamento entre as esferas, os tamanhos de grãos impregnados no GNT200, após os testes com areia + 40% de finos, foram semelhantes ao de areias média (entre 53 e 55%) e fina (entre 44 e 45%) para os casos de 0 kPa e 25 kPa. Para a aplicação de 100 kPa foi encontrado mais areia fina (54%), seguida por areia média (44%).

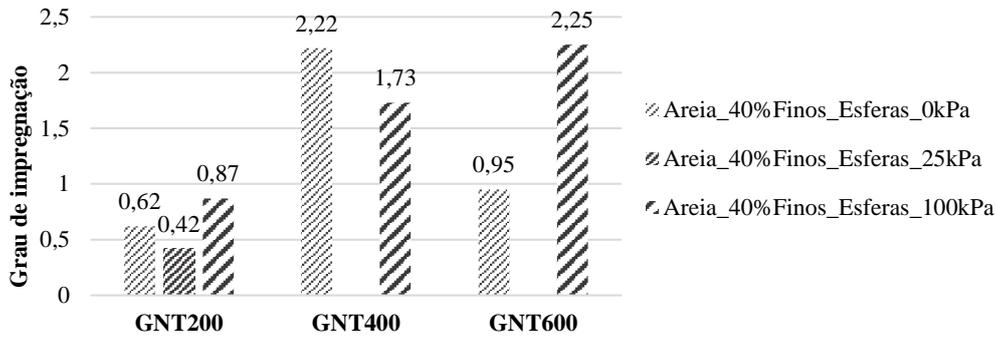


Figura 5.12. Grau de impregnação nas amostras de areia + 40% finos e GNT200, 400 e 600, $s/d = 2$.

5.3 INFLUÊNCIA DA ALTURA DAS AMOSTRAS

A Tabela 5.10 apresenta os coeficientes de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil nos ensaios onde a altura da amostra formada por areia + 40% de finos foi igual a 50, 100 e 150 mm. Os coeficientes de permeabilidade das amostras com 50, 100 e 150 mm, obtidos a partir de leituras de cargas hidráulicas nas portas laterais 3 e 4 do permeâmetro ($k_{s,3-4}$), foram menores que os coeficientes de permeabilidade dos respectivos sistemas solo-geotêxteis (k_{sg}) em todos os ensaios. Isso pode indicar que o próprio solo se colmatou localmente entre as portas 3 e 4. Entretanto, os coeficientes de permeabilidade do solo entre as portas 3 e 5 (que incorpora uma maior massa de solo) do permeâmetro ($k_{s,3-5}$) ficaram superiores a permeabilidade do sistema solo-geotêxtil. Contudo, essas diferenças estão dentro da faixa de dispersão típica em ensaios de permeabilidade.

Tabela 5.10. Coeficientes de permeabilidade da areia + 40% de finos, GNT200, $i = 1$ e $s/d = 1$.

Altura (mm)	Material drenante	Tensão Normal (kPa)	$k_{s,3-4}$ (cm/s)	$k_{s,3-5}$ (cm/s)	k_{sg} (cm/s)	Vazão (cm ³ /s)
	Esferas	0	$8,64 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-4}$	0,007
	Esferas	25	$6,37 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-4}$	0,008

50	Placa	25	$4,19 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$7,21 \times 10^{-5}$	0,008
	Esferas	100	$5,74 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$	$6,45 \times 10^{-5}$	0,005
100	Esferas	0	$3,14 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$2,46 \times 10^{-4}$	0,013
	Placa	0	$2,42 \times 10^{-3}$	$2,35 \times 10^{-3}$	$3,38 \times 10^{-4}$	0,020
	Esferas	25	$1,91 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$5,17 \times 10^{-5}$	0,009
	Placa	25	$6,6 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-4}$	$4,85 \times 10^{-5}$	0,005
	Esferas	100	$4,16 \times 10^{-5}$	$8,1 \times 10^{-5}$	$3,09 \times 10^{-5}$	0,004
150	Esferas	0	$1,92 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$1,71 \times 10^{-4}$	0,027
	Esferas	25	$1,52 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,35 \times 10^{-5}$	0,003
	Placa	25	$3,22 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^{-5}$	0,023
	Esferas	100	1×10^{-4}	$2,1 \times 10^{-4}$	$7,05 \times 10^{-5}$	0,002

Notas: $k_{s,3-4}$ = coeficiente de permeabilidade do solo entre as portas 3 e 4 do permeâmetro, equivale a 25 mm de solo; $k_{s,3-5}$ = coeficiente de permeabilidade do solo entre as portas 3 e 5 do permeâmetro, equivale a 42 mm de solo.

A Tabela 5.11 mostra os dados de GR e a razão entre os coeficientes de permeabilidade ($k_R = k_{s,3-4}/k_{sg}$ ou $k_{s,3-5} / k_{sg}$) nos ensaios realizados com amostras de areia + 40% de finos, GNT200, gradiente hidráulico de 1, e $s/d = 1$ para as esferas de aço. Os resultados de GR_{3mm} foram maiores do que os obtidos pelas propostas da ASTM D5101 (2017a) e de Fannin *et al.* (1994) nos ensaios para as duas alturas de amostras, 100 e 150 mm. As três definições de GR mostraram comportamentos semelhantes. No caso da presença das esferas de aço os valores de GR foram maiores quanto mais próximo do filtro, o que pode indicar algum nível de cegamento do geotêxtil. Nos ensaios com a placa perfurada, os resultados foram um tanto erráticos.

Nas amostras com 100 mm de altura, GR_{3mm} cresceu à medida que se aplicou tensão vertical de 25 e 100 kPa, com resultados superiores a 1. Nota-se que os valores de GR_{3mm} foram condizentes em relação ao grau de impregnação calculados nos GNT200 (Fig. 5.9). Note-se também que os valores de GR_{ASTM} nos ensaios usando as esferas de aço e sob tensão vertical foram inferiores ao limite de 3 estabelecido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (1977). Nos ensaios usando a placa perfurada atingiram-se resultados de GR_{ASTM} muito superiores a 3. Tais discrepâncias podem ser devidas ao caráter internamente instável do solo, que pode influenciar o valor do coeficiente de permeabilidade do solo que é utilizado no cálculo do GR de forma errática. Só um maior

número de ensaios permitiria avaliar melhor as possíveis diferenças entre resultados de GR obtidos em ensaios com placa perfurada ou esferas subjacentes ao filtro geotêxtil.

Nos ensaios realizados com amostras de 150 mm e esferas de aço, o GR_{ASTM} aumentou com a tensão vertical aplicada, com valores entre 1 e 3.

Tabela 5.11. Resultados de Razão entre Gradientes (GR) e k_R , com areia + 40% de finos, GNT200, $i = 1$ e $s/d = 1$.

Altura (mm)	Material drenante	Tensão Normal (kPa)	GR _{ASTM D5101}	GR _{Mod}	GR _{3mm}	k_R ($k_{s,3-4} / k_{sg}$)	k_R ($k_{s,3-5} / k_{sg}$)
10	Esferas	0	1	3,12	8,33	1,28	1,06
	Placa	0	7,14	2,68	7,14	7,17	6,95
	Esferas	25	2,93	6,2	9,52	3,7	6,77
	Placa	25	12	6,25	16,67	13,61	13,81
	Esferas	100	1,33	4,2	22,2	1,35	2,62
	15	Esferas	0	1	4,76	1,99	1,12
Esferas		25	2	8,33	5,56	1,82	2,87
Placa		25	0,80	0,93	1,25	0,84	0,98
Esferas		100	2,4	8,82	6,07	1,41	2,97

Notas: k_R = razão entre coeficiente de permeabilidade do solo dividido pelo coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil (Eq. 3.3).

A Figura 5.13 apresenta o grau de impregnação do geotêxtil GTN200 dos sistemas areia + 40% de finos para as alturas de 50, 100 e 150 mm de solo. O aumento da altura de 50 para 100 mm favoreceu uma maior impregnação nos ensaios sem tensão vertical ou com 25 kPa em alguns casos. A compressão normal de 100 kPa apresentou valores semelhantes de grau de impregnação para as diferentes alturas da amostra.

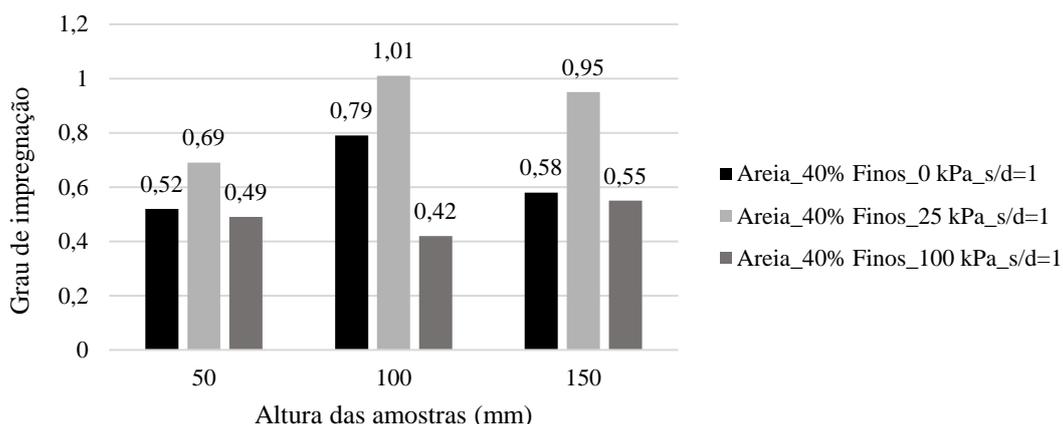


Figura 5.13. Grau de impregnação do GNT200 sobre esferas de aço em função da altura da amostra para $i = 1$.

5.4 ANÁLISE DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE SUBJACENTE

A Figura 5.14 mostra uma vista geral dos afundamentos da folha de alumínio colocada entre o geotêxtil e o material subjacente de acordo com o espaçamento entre as esferas de aço de 15 mm. A Figura 5.15 apresenta os resultados dos afundamentos máximos entre as esferas de aço, representados pelo grupo 1 (Fig. 4.13), para os geotêxteis não tecidos de 200, 400 e 600 g/m² e para tensões verticais de 25 e 100 kPa. Observou-se que o aumento da massa por unidade de área do geotêxtil fez o afundamento máximo diminuir. Isso, em parte, se deve à maior rigidez à tração de geotêxteis de maior massa por unidade de área.

A Tabela 5.12 mostra os valores dos afundamentos em referência aos grupos 2 e 3, indicados na Figura 4.13, para os quais o aumento da tensão vertical de 25 para 100 kPa, além do aumento da gramatura do geotêxtil, influenciaram para os afundamentos nessas direções. Como esperado, quanto maior a tensão vertical aplicada, maior o afundamento do geotêxtil nos vazios entre grãos do material drenante subjacente. Observou-se que folha de alumínio não sofreu danos (rasgos, furos ou cortes), para todas as condições impostas nos ensaios de afundamento, o que poderia comprometer o sistema de filtração.

Além disso, o maior afundamento do geotêxtil com $s/d = 2$, possivelmente, aumentou as aberturas de filtração devido ao estiramento do geossintético entre as esferas. Isto pode estar relacionado com as partículas de diâmetros maiores encontradas impregnadas e passantes pelos filtros nos ensaios com espaçamento maior entre as esferas.



Figura 5.14. Afundamento da folha de alumínio com GNT200 e aplicação de 100 kPa, a) $s/d = 1$ e b) $s/d = 2$.

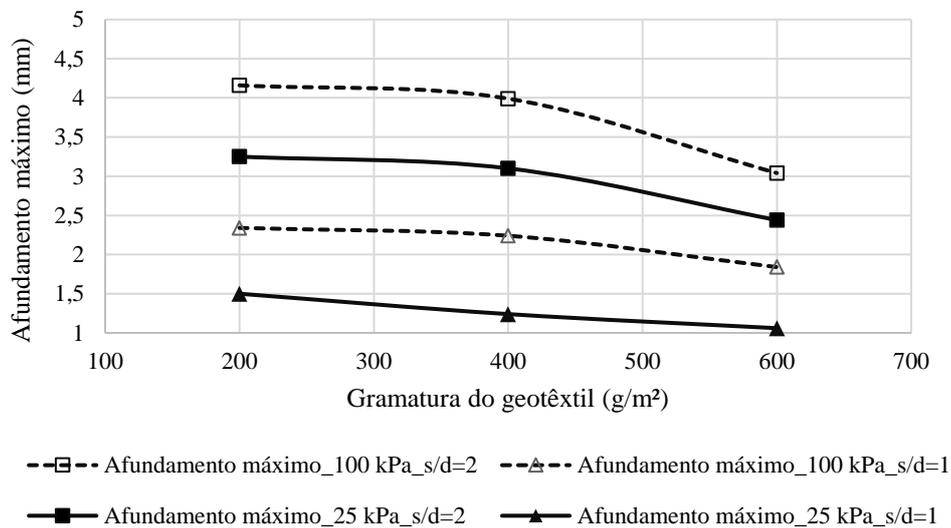


Figura 5.15. Afundamento máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$) dos geotêxteis em função da gramatura.

Tabela 5.12. Afundamentos, em média, para o grupo de pontos 2 e 3.

Geotêxtil / Tensão vertical	Grupo 2		Grupo 3	
	$s/d = 1$			
	25 kPa	100 kPa	25 kPa	100 kPa
GNT200	1,00	1,50	1,30	1,65
GNT400	0,84	1,26	1,10	1,68
GNT600	0,72	1,01	0,91	1,32
$s/d = 2$				
GNT200	1,59	2,69	1,96	3,40
GNT400	1,96	2,51	2,39	3,22
GNT600	0,78	1,56	1,47	2,01

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou estudar o comportamento de sistemas solo – geotêxteis em contato com solos previamente classificados como internamente instáveis e sob confinamento. As principais conclusões obtidas são sumariadas abaixo.

No geral, como era de se esperar, o aumento da tensão vertical provocou reduções no coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil. O tipo de material subjacente ao filtro também influenciou os resultados, com a placa perfurada tendendo a fornecer resultados menores que os observados para as esferas de aço com 15 mm de diâmetro. Porém, os resultados estão dentro da faixa de dispersão para ensaios de permeabilidade.

O aumento na massa por unidade de área do geotêxtil não tecido de 200 para 400 e 600 g/m² promoveu uma queda no coeficiente de permeabilidade do conjunto areia mais 20% ou 40% de finos. Porém, as reduções nas permeabilidades dos sistemas solo - geotêxtil em função do aumento da massa por unidade de área dos geossintéticos não foram significantes.

O espaçamento entre as esferas de aço (s/d) igual a 2 junto com o emprego de 25 ou 100 kPa diminuiu o coeficiente de permeabilidade do conjunto solo-geotêxtil (k_{sg}) nos ensaios utilizando a porcentagem de 40% de finos. O aumento do espaçamento entre as esferas de aço e sob confinamento favoreceu o aparecimento de uma camada de cegamento sobre o filtro. Para $s/d = 2$ também se observaram partículas de maiores tamanhos impregnadas nos geotêxteis. A tensão vertical de 100 kPa fez reduzir os valores dos diâmetros de partículas passantes pelo geotêxtil para os três geotêxteis não tecidos ensaiados.

No geral, o aumento do gradiente hidráulico de 1 para 10 propiciou uma redução nos valores de coeficiente de permeabilidade obtidos para uma mesma tensão vertical aplicada, material drenante sob o filtro e massa por unidade de área do geotêxtil. Isso pode ter sido consequência de um maior arraste de grãos menores do solo internamente instável devido ao aumento da força de percolação.

Os ensaios com areia + 10% de finos e GNT200 tiveram os diâmetros das partículas na base da amostra de solo não muito afetados. Em ambos os gradientes hidráulicos, os ensaios com a placa perfurada tenderam a aumentar os valores de diâmetros de partículas na base do solo e passantes pelo geotêxtil. Assim, houve certa perda de finos na base do corpo de prova de solo e esses finos podem ter ficado impregnados no geotêxtil. A mudança do gradiente hidráulico de 1 para 10 fez partículas de menores diâmetros passarem pelo geotêxtil.

No ensaio com areia + 20% de finos e GNT200, a placa perfurada aumentou os diâmetros de partículas na base da amostra e passantes pelo geotêxtil, particularmente para o gradiente hidráulico de 10. A elevação do gradiente hidráulico de 1 para 10 fez diminuir aqueles valores em ensaios com tensões verticais de 25 e 100 kPa.

Para o ensaio em amostra com 40% de finos e GNT200, sob gradiente hidráulico de 1, o crescimento da tensão vertical favoreceu os finos a atravessarem o geotêxtil. O gradiente hidráulico de 10 e o aumento da compressão normal ajudaram na formação da camada de cegamento acima do filtro. No geral, o aumento do gradiente hidráulico de 1 para 10, e sob tensão vertical de 25 ou 100 kPa, fez diminuir os diâmetros de partículas na base da amostra e passantes pelo geotêxtil.

Nos ensaios com o geotêxtil GNT400, esferas de aço ($s/d = 1$), gradiente hidráulico de 1 e tensão vertical de 25 kPa observou-se perda de finos na base da amostra de solo, além do confinamento reduzir os diâmetros de partículas passantes pelo geotêxtil e impregnadas nele. O GNT400 deixou o material na interface solo-geotêxtil levemente mais fino quando comparado ao geotêxtil GNT200.

O ensaio com GNT600 e esferas de aço ($s/d = 1$), a elevação do gradiente hidráulico contribuiu para uma predominância de solo mais fino tanto na interface solo-geotêxtil como no tamanho das partículas passantes pelo filtro.

Nos ensaios de permeabilidade do geotêxtil GNT200 após ensaios de filtração, o acréscimo na diferença de carga hidráulica de 10, 20 e 50 mm utilizada no ensaio fez o coeficiente de permeabilidade do filtro impregnado aumentar, provavelmente devido ao maior arraste de partículas impregnadas no geotêxtil.

Em relação ao grau de impregnação dos três geotêxteis obtidos após os ensaios de filtração com amostras de 50 mm de solo, na maior parte dos casos, a elevação do gradiente hidráulico fez o grau de impregnação aumentar nos geotêxteis com areia + 40% de finos, e reduzir nas amostras com +10% ou +20% de finos. A menor quantidade de finos pode ter favorecido a passagem deles pelo geotêxtil, em vez de se acumularem nos vazios deste.

A altura do corpo de prova de solo não alterou de forma significativa o coeficiente de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil. Os valores de razão entre gradientes foram maiores para definições dessa razão utilizando-se leituras de piezômetros mais próximos ao geotêxtil. Em geral, para GR_{ASTM} , os sistemas com +40% de finos, esferas de aço ($s/d = 1$) e GNT200, não ultrapassaram o limite de 3 estabelecido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (1977). Entretanto, se o valor a ser considerado for de GR_{3mm} , os resultados excederam o limite de 3.

A respeito ao afundamento do geotêxtil entre as esferas de aço, o aumento da gramatura do geotêxtil fez o afundamento máximo diminuir. O maior espaçamento entre as esferas de aço e o aumento da tensão vertical também aumentaram os afundamentos máximos. Já estes diminuíram com o aumento da gramatura do geotêxtil, devido à maior rigidez à tração de geotêxteis mais espessos. Além disso, o maior afundamento do geotêxtil com $s/d = 2$ favoreceu o aparecimento de partículas de maiores diâmetros impregnadas e passantes pelos filtros.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As sugestões para pesquisas futuras estão listadas abaixo:

- Automatizar o ensaio de permeabilidade a fim de facilitar na obtenção dos resultados;
- Utilizar diferentes gradientes hidráulicos nos ensaios além dos investigados neste estudo;
- Realizar ensaios com amostras indeformadas de solos, de modo a simular a aplicação de filtros geotêxteis em valas;

- Obter um maior número de resultados de permeabilidade do geotêxtil após ensaio de filtração;
- Analisar o desempenho dos filtros geotêxteis em contato com solos finos típicos de Brasília-DF sob condições de confinamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT (2001). Curso básico de Geotêxteis. Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos, São Paulo, 95p.

ABNT (2013). Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 9862, Rio de Janeiro, 4p.

ASTM (2017a). Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems. American Society for Testing and Materials, ASTM D5101, United States, 8p.

ASTM (2017b). Standart Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), American Society for Testing and Materials, ASTM D2487, United States, 10p.

ABNT (2021). Geossintéticos: Determinação da espessura a pressões especificadas: Parte 1: Camada única. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 9863-1, Rio de Janeiro, 6p.

ASTM (2022). Standard Guide for Development of Laser Diffraction Particle Size Analysis Methods for Powder Materials. American Society for Testing and Materials, E3340, United States, 9p.

AYALA, R. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Tese de Doutorado, Publicação no G.TD-159/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300p.

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

BIDIM (1991). Utilização do Geotêxtil Bidim em Drenagem de Pavimento. São José dos Campos, SP, 14p.

BRITO, A. F. S. (2020) Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, GO, 128p.

BURENKOVA, V.V. (1993). Assessment of Suffusion in Non-cohesive and Graded Soils. Journal of Geoscience and Environment Protection, 4(6): 357–360.

CAIQ. CENTRAL ANALÍTICA DO INSTITUTO DE QUÍMICA DA UNB. Disponível em < <https://caiq.unb.br/equipamentos/471-difratometro-de-raios-x-de-po>>

CAZZUFFI, S.; IELO, D.; MANDAGLIO, M. C. & MORACI, N. (2015). Recent Developments in The Design Of Geotextile Filters. The 2nd International GSI-Asia Geosynthetics Conference, Seoul, Korea, 1-12.

CHRISTOPHER, B.R. & FISCHER, G.R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(4): 337-353.

CSA (2020). ICP – OES e ICP – MS. Centro de Soluções Analíticas Educacional. Disponível <<https://csaeducacional.com.br/materias/icp-oes-e-icp-ms>>

DU, C.; XU, C.; YANG, Y. & WANG, J. (2022). Filtration Performance of Nonwoven Geotextile Filtering Fine-Grained Soil under Normal Compressive Stresses. *Applied Sciences*, 12(24): 1-29.

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

FRISCHKNECHT, R.; STUCKI, M.; BÜSSER, S.; ITTEN, R. (2012). Comparative Life Cycle Assessment Of Geosynthetics Versus Conventional Construction Materials. *Ground Engineering*, 45(10), p. 24–28.

GARDONI M.G., PALMEIRA E.M. & MLYNAREK J. (2000). Influence of vertical stresses on hydraulic behaviour of nonwoven geotextiles. *Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering*, Wolski & Mfynarek (eds.), Warsaw, Poland, pp.127-133.

GARDONI, M. G. & PALMEIRA, E. M. (2002). Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. *Géotechnique*, 52(6): 405-418.

GARDONI, M.G. (2000). Estudo do Comportamento Dreno – Filtrante de Geossintéticos sob compressão. Tese de Doutorado, Publicação no G.TD-003A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336p.

GIROUD, J. P. (1996). Granular Filters and geotextile filters. *Proceedings of GeoFilters*, Lafleur, J. & Rollin, A.L. (eds.), Montréal, Canada, pp. 565-680.

GIROUD, J. P. (2010). Development of criteria for geotextile and granular filters. 9th International Conference on Geosynthetics, 9ICG, Guarujá, Brazil, 1: 45 – 64.

GOMES, R.C., PALMEIRA, E.M. & LANZ, D. (1994). Failure and deformation mechanisms in model reinforced walls subjected to different loading conditions. *Geosynthetics International*, 1 (1): 45-65.

GOURC, J.P. (2008). Training Course: Geosynthetics in Drainage and Filtration. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Shanghai, China, 4: 17–20.

HONG, Y.S. & WU, C. S. (2011) Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2),102-115.

- IGS (2009). Recommended Descriptions of Geosynthetic Functions, Geosynthetic Terminology, Mathematical and Graphical Symbols. International Geosynthetic Society, South Carolina, 31p.
- KENNEY, T. C. & LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (2): 215-225.
- KENNEY, T.C., CHAHAL, R., CHIU, E., OFOEGBU, G.J., OMANG, G.N. & UME, C.A. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (1): 32-43.
- KHAN, M. W.; DAWSON, A. R. & MARSHALL, A. M. (2021). Filtration performance of non-woven geotextiles with internally-stable and -unstable soils under dynamic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(2), 293-311.
- KUERBIS, R. & VAID, Y. P. (1988). Sand sample preparation – the slurry deposition method. *Soils and Foundations*, 28 (4): 107-118.
- LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J. & ROLLIN, A.L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115 (12): 1747–1768.
- LAWSON, C.R. (1982). Filter criteria for geotextiles: relevance and use. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108 (10): 1300-1317.
- LOPES, M. M. (2019). Estudo do Comportamento Físico-Mecânico de Solos Reforçados com Fibras De Açaí (Euterpe oleracea). Trabalho de Monografia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.
- MELO, D. L. A. (2018). Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis Não Tecidos Sob Diferentes Esforços Solicitantes. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM – 310/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.
- MELO, D. L. A. (2023). Estudos Experimentais em Geotêxteis como Elementos de Separação em Obras Viárias. Tese de Doutorado, (em fase de elaboração), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- MUÑOZ, C. S. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis. Dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 120p.
- PALMEIRA, E. M. & TREJOS GALVIS, H. L. (2018). Evaluation of predictions of nonwoven geotextile pore size distribution under confinement. *Geosynthetics International*, 25(2): 1-42.
- PALMEIRA, E. M. (2020). A review on some factors influencing the behaviour of nonwoven geotextile filters. *Soils and Rocks*, 43(3): 351 – 368.

- PALMEIRA, E. M. (2022). Notas de Aula – Filtros Geotêxteis. Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG), Brasília, Distrito Federal. 18p.
- PALMEIRA, E. M.; TATTO, J. & ARAUJO, G. L. S. (2012). Sagging and filtration behaviour of nonwoven geotextiles overlying different bedding materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 31: 1-14.
- PALMEIRA, E.M. & FANNIN, R.J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration. *Geosynthetics – 7th ICG*, Gourc & Girard (eds.), Delmas, Lisse, pp. 853-870.
- PALMEIRA, E.M. & MATHEUS, E. (2000). Gradient ratio tests on artificially clogged nonwoven geotextiles. *Proceedings of Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering*, Wolski & Mlynarek (eds.), Balkema, 1: pp. 149-156.
- PALMEIRA, E.M. (2018). *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294p.
- PALMEIRA, E.M., FANNIN, R.J. & VAID, Y.P. (1996). A study of the filtration behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (6): 899-912.
- PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M. G. & BESSA DA LUZ, D. W. (2005). Soil-geotextile filter interaction under high stress levels in the gradient ratio test. *Geosynthetics International*, 12(4): 162–175.
- PÉREZ COLLANTES, R. D. C. *Influência da Temperatura na Sucção e Comportamento Mecânico dos Solos Tropicais Compactados*. Tese de Doutorado, Publicação no G.TD – 174/2022, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 177p.
- SHI, Y. (1993). *Filtration behaviour of non-woven geotextiles in the gradient ratio test*. Master Of Applied Science, The Faculty Of Graduate Studies Department Of Civil Engineering, University Of British Columbia, Vancouver, Canada, 145 p.
- STOLTZ, G.; DELMAS, P. & BARRAL, C. (2019). Comparison of the behaviour of various geotextiles used in the filtration of clayey sludge: An experimental study. *Geotextiles and Geomembranes*, 47 (2): 230-242.
- TATTO, J. (2010). *Comportamento filtrante de geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio*. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-186/10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 200p.
- VAID, Y. P.; NEGUSSEY, D. (1988). *Preparation of Reconstituted Sand Specimens*. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 977, Philadelphia, 405-417.
- VERTEMATTI, J. C. (2015). *Manual Brasileiro de Geossintéticos - MBG*. 2º Ed. Editora Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 428p.

WAN, C. & FELL, R. (2008). Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (3): 401–407.

WU, C. S.; HONG, Y. S.; YAN, Y. W. & CHANG, B. S. (2006). Soil-nonwoven geotextile filtration behavior under contact with drainage materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(1): 1–10.

APÊNDICES

APÊNDICE A

A – DETALHAMENTO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DO CONJUNTO SOLO – GEOTÊXTIL NÃO TECIDO

Tabela A.1 – Ensaio de permeabilidade com solo – geotêxtil

Areia + Esferas de aço com $s/d = 1 + \text{GNT200}$											
0 kPa	n° horas / h (cm)	1	2	3	4	19	20	21	23	24	25
i = 1	<i>h1</i>	59,6	59,5	59,5	59,5	59,8	59,9	59,9	60	60	60
	<i>h2</i>	61,1	61,1	61	61	60,6	60,6	60,4	60,5	60,6	60,5
	<i>h3</i>	41,1	42,3	42,7	42,8	43,4	43,5	43,5	43,6	43,7	43,7
	<i>h4</i>	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,5	41,5	41,6	41,6	41,7
	<i>h5</i>	50,1	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2
	<i>h6</i>	45,4	45,7	45,7	45,7	45,8	45,8	45,9	45,9	45,9	45,9
	<i>h7</i>	50,4	50,4	50,7	50,7	51,2	51,2	51,2	51,3	51,3	51,6
	<i>h8</i>	51,6	51,7	51,8	51,8	52,1	52,1	52,2	52,3	52,3	52,4
	<i>h9</i>	55,9	55,7	55,7	55,7	55,5	55,5	55,55	55,55	55,6	55,7
	<i>h10</i>	55,4	55,5	55,6	55,6	55,4	55,4	55,5	55,5	55,5	55,5
	<i>h11</i>	57	57	57	57	57,1	57,1	57,1	57,6	57,1	57,1
	<i>h12</i>	58,2	58,1	58,1	58,1	58	58	58	58	58	57,9
	Volume (cm ³)	50									
	Tempo (seg)	49	52	53	53	57	57	57	58	61	61
	k_{sg} (cm/s)	6,49 x 10 ⁻²	6,11 x 10 ⁻²	6 x 10 ⁻²	6 x 10 ⁻²	4,34 x 10 ⁻²	4,11 x 10 ⁻²	4,11 x 10 ⁻²	3,84 x 10 ⁻²	3,65 x 10 ⁻²	3,47 x 10 ⁻²
	Vazão (cm ³)	1,020	0,962	0,943	0,943	0,877	0,877	0,877	0,862	0,820	0,820
Areia + 10% de finos + Esferas de aço com $s/d = 1 + \text{GNT200}$											
0 kPa	n° horas / h (cm)	1	2	3	21	22	24	25	26		
i=1	<i>h1</i>	52,7	52,8	52,8	53,3	54,6	55	54,8	54,8		
	<i>h2</i>	52,7	52,8	52,8	53,3	54,6	55	54,8	54,8		
	<i>h3</i>	52,8	53	52,8	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4		
	<i>h4</i>	51,8	51,7	51,7	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7		
	<i>h5</i>	51,5	51,4	51,4	50,7	50,7	50,6	50,6	50,6		
	<i>h6</i>	50,4	51,6	51,5	51,4	51,4	51,3	51,3	51,3		
	<i>h7</i>	52,7	52,8	52,9	53,4	54,7	55	55	55		
	<i>h8</i>	52,7	52,8	52,9	53,4	54,7	55	54,8	54,8		
	<i>h9</i>	51,8	51,7	51,7	50,6	50,7	50,6	50,6	50,6		
	<i>h10</i>	51,5	51,5	51,5	50,6	50,7	50,6	50,6	50,6		
	<i>h11</i>	51,5	51,3	51,3	50,5	50,6	50,6	50,6	50,6		
	<i>h12</i>	51,2	51,2	51,2	50,5	50,6	50,6	50,5	50,5		
	Volume (cm ³)	50									
	Tempo (seg)	129	137	143	448	497	572	600	600		
	k_{sg} (cm/s)	2,26 x 10 ⁻²	2 x 10 ⁻²	1,91 x 10 ⁻²	3,49 x 10 ⁻³	2,2 x 10 ⁻³	1,74 x 10 ⁻³	1,7 x 10 ⁻³	1,7 x 10 ⁻³		
	Vazão (cm ³)	0,39	0,36	0,35	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08		
Areia + 20% de finos + Esferas de aço com $s/d = 1 + \text{GNT200}$											
0 kPa	n° horas / h (cm)	1	2	5	23	24	25	26	27	28	
i=1	<i>h1</i>	54	54,1	54,7	54,4	54,4	54,7	54,9	54,9	54,9	
	<i>h2</i>	54	54,1	54,7	54,3	54,8	55,2	55,3	55,3	55,3	
	<i>h3</i>	54	54,1	54,7	54,3	54,8	55,2	55,3	55,3	55,3	

i=1	<i>h4</i>	51,4	51,3	50,8	51,7	51,2	50,8	50,7	50,5	50,5	
	<i>h5</i>	51,2	51,1	50,7	51,2	50,8	50,6	50,4	50,4	50,4	
	<i>h6</i>	44,1	34,4	34,2	32,5	32,6	32,5	32,5	32,5	32,5	
	<i>h7</i>	54	54,1	54,7	54,3	54,8	55,1	55,2	55,3	55,3	
	<i>h8</i>	54	54,1	54,7	54,3	54,8	55,1	55,2	55,3	55,3	
	<i>h9</i>	52	51,9	51,8	51,6	51	50,7	50,6	50,4	50,4	
	<i>h10</i>	51,5	51,4	51	51,3	50,8	50,6	50,4	50,4	50,4	
	<i>h11</i>	41	47,5	51,4	51,1	50,7	50,5	50,4	50,4	50,4	
	<i>h12</i>	50,7	50,7	50,4	50,7	50,4	50,3	50,2	50,2	50,2	
	Volume (cm ³)	50									
	Tempo (seg)	146	158	292	257	268	375	545	627	687	
	<i>k_{sg}</i> (cm/s)	9,09 x 10 ⁻³	8,15 x 10 ⁻³	3,49 x 10 ⁻³	4,61 x 10 ⁻³	4,09 x 10 ⁻³	2,65 x 10 ⁻³	1,71 x 10 ⁻³	1,49 x 10 ⁻³	1,36 x 10 ⁻³	
Vazão (cm ³)	0,342	0,316	0,171	0,195	0,187	0,133	0,092	0,080	0,073		
Areia + 40% de finos + Esferas de aço com s/d = 1 + GNT200											
25 kPa	n° horas / <i>h</i> (cm)	1	2	3	4	5	22	23	24		
	i=1	<i>h1</i>	59,9	60,1	60,8	61	61	60,8	60,8	60,5	
		<i>h2</i>	59,9	60,1	60,8	61	61,2	60,9	60,9	60,9	
		<i>h3</i>	59,9	59,9	60,6	60,7	60,7	60,8	60,8	60,8	
		<i>h4</i>	48,8	51,5	52,6	53,6	54	54,5	54,5	54,5	
		<i>h5</i>	55,1	55,1	55,1	55	54,9	54,7	54,7	54,7	
		<i>h6</i>	55,4	55,3	55,2	55,2	55,1	54,7	54,7	54,7	
		<i>h7</i>	59,8	59,9	60,6	60,7	60,8	60,8	60,8	60,8	
		<i>h8</i>	59,5	59,6	60,3	60,5	60,7	60,7	60,7	60,7	
		<i>h9</i>	56,2	56	56	55,8	55,5	54,7	54,7	54,7	
		<i>h10</i>	55,6	55,6	55,6	55,4	55,3	54,7	54,7	54,7	
		<i>h11</i>	55,6	55,5	55,5	55,4	55,3	54,7	54,7	54,7	
		<i>h12</i>	55,1	55,1	55,1	54,9	54,8	54,7	54,7	54,5	
Volume (cm ³)	50										
Tempo (seg)	199	639	642	720	960	3628	4200	6300			
<i>k_{sg}</i> (cm/s)	4,47 x 10 ⁻³	1,34 x 10 ⁻³	1,17 x 10 ⁻³	9,73 x 10 ⁻⁴	7,18 x 10 ⁻⁴	1,93 x 10 ⁻⁴	1,67 x 10 ⁻⁴	1,13 x 10 ⁻⁴			
Vazão (cm ³)	0,251	0,078	0,078	0,069	0,052	0,014	0,012	0,008			

Notas: h_n = altura da água no piezômetro conectado em determinada porta lateral do permeâmetro.

APÊNDICE B

B – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS: ALTURA E ÍNDICE DE VAZIOS ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO

Tabela B.1. Características das amostras dos ensaios de filtração com 200 g/m² e $s/d = 1$.

Solo	Material drenante	i	Tensão Normal (kPa)	Wsd (g)	Wsd_{real} (g)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	ei_{real}	ef_{real}	
Areia	Esferas	1	0	532,54	589,16	5,2	5,3	0,72	0,76	
	Placa		0	585,74	564,31	5,2	5,2	0,80	0,80	
	Esferas	10	25	560,20	558,00	5,15	5	0,80	0,75	
	Placa		25	538,73	587,26	5,3	5,2	0,76	0,73	
	Areia + 10%	Esferas	1	0	552,86	550,49	5,2	5,3	0,85	0,88
		Placa		0	551,75	555,19	5,3	5,3	0,87	0,87
		Esferas	10	25	568,27	630,13	5,5	5,4	0,71	0,67
		Placa		25	534,92	556,45	5,2	5,1	0,83	0,79
Areia + 20%		Esferas	1	0	495,50	530,70	5	5,15	0,82	0,88
		Placa		0	511,40	552,20	5	5,2	0,75	0,82
		Esferas	10	25	497,50	545,40	5,1	5	0,81	0,78
		Placa		25	501,00	534,10	5,3	5,05	0,92	0,83
	Areia + 40%	Esferas	1	0	530,32	528,30	4,9	5	0,80	0,83
		Placa		0	516,70	552,29	5,3	5,4	0,86	0,89
		Esferas	10	25	536,60	574,05	5,4	5,5	0,82	0,86
		Placa		25	545,60	582,31	5,5	5,4	0,83	0,80
Areia + 40%		Esferas	1	0	495,10	540,00	5	5,05	0,79	0,81
		Placa		0	485,20	533,00	4,95	5	0,80	0,82
		Esferas	10	25	521,10	559,50	5,1	4,8	0,83	0,73
		Placa		25	496,50	539,00	5	4,9	0,80	0,76
	Areia + 40%	Esferas	1	100	537,42	538,45	5,2	4,8	0,80	0,66
		Placa		25	496,50	539,00	5	4,9	0,80	0,76
		Esferas	10	0	499,5	533,60	5	5,05	0,82	0,83
		Placa		0	511,05	549,20	5	5,1	0,76	0,80
Areia + 40%		Esferas	1	25	537,30	573,00	5,3	5,2	0,79	0,76
		Placa		100	530,52	537,26	5	4,85	0,80	0,75
		Esferas	10	25	494,00	545,00	5,1	5,05	0,81	0,79
		Placa		0	529,12	536,4	5	4,97	0,81	0,80
	Areia + 40%	Esferas	1	25	496,80	546,72	5,35	5,1	0,90	0,77
		Placa		100	523,42	532,80	4,9	4,7	0,78	0,71
		Esferas	10	25	497,60	504,4	4,9	4,8	0,89	0,84
		Placa		0	530,52	538,02	5,05	5,3	0,82	0,91
Areia + 40%		Esferas	10	25	526,70	566,50	5,3	5,27	0,81	0,80
		Esferas		100	531,92	545,60	5,05	4,85	0,79	0,72

Notas: Wsd = massa seca da amostra obtida pela Equação 4.2; Wsd_{real} = massa seca da amostra depois de 24h na estufa; ei_{real} = índice de vazios inicial da amostra considerando o Wsd_{real} ; ef_{real} = índice de vazios final da amostra considerando o Wsd_{real} .

Tabela B.2. Características das amostras dos ensaios de filtração com 400 g/m²
e $s/d = 1$

Solo	Geotêxtil	Material drenante	<i>i</i>	Tensão Normal (kPa)	<i>Wsd</i> (g)	<i>Wsd_{real}</i> (g)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	<i>ei_{real}</i>	<i>ef_{real}</i>
Areia + 20%	GNT400	Esferas	1	0	541	584,4	5,2	5,52	0,72	0,98
				25	515,2	550,8	4,95	4,93	0,74	0,73
			10	25	506,2	559,9	5,33	5,30	0,84	0,83
Areia + 40%	GNT400	Esferas	1	0	526,3	574,1	5,2	5,5	0,76	0,87
				25	528,7	564,2	5,4	5,3	0,85	0,82

Tabela B.3. Características das amostras dos ensaios de filtração com 600 g/m²
e $s/d = 1$

Solo	Geotêxtil	Material drenante	<i>i</i>	Tensão Normal (kPa)	<i>Wsd</i> (g)	<i>Wsd_{real}</i> (g)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	<i>ei_{real}</i>	<i>ef_{real}</i>
Areia + 20%	GNT600	Esferas	1	25	505,1	544,5	5,1	4,75	0,81	0,69
				1	25	501,9	547,5	5,3	5,2	0,88
Areia + 40%	GNT600	Esferas	10	25	495,87	540	4,9	4,7	0,76	0,68

Tabela B.4. Características das amostras dos ensaios de filtração com 200, 400 e 600 g/m² e $s/d = 2$

Solo	Geotêxtil	Material drenante	<i>i</i>	Tensão Normal (kPa)	<i>Wsd</i> (g)	<i>Wsd_{real}</i> (g)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	<i>ei_{real}</i>	<i>ef_{real}</i>
Areia + 40%	GNT200	Esferas	1	0	543,52	548,20	5,1	5,25	0,80	0,86
				25	537,5	548,6	5	4,85	0,77	0,71
				100	542,2	558,4	5,1	4,85	0,77	0,68
	GNT400	Esferas	1	0	490,6	540	5	4,98	0,79	0,78
				100	532,7	575,42	5,4	5,1	0,82	0,72
				100	515,37	564,7	5,4	5,2	0,85	0,78
GNT600	Esferas	1	0	524,9	572	5,2	5,45	0,77	0,84	
			100	515,37	564,7	5,4	5,2	0,85	0,78	

APÊNDICE C

C – TESTES DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOLO - GEOTÊXTIL

Para verificar a repetibilidade dos experimentos, testes de filtração duplicados foram conduzidos usando GNT200 e GNT400. A Figura C.1 mostra os resultados dos testes, demonstrando que os resultados são geralmente repetíveis e em boa concordância.

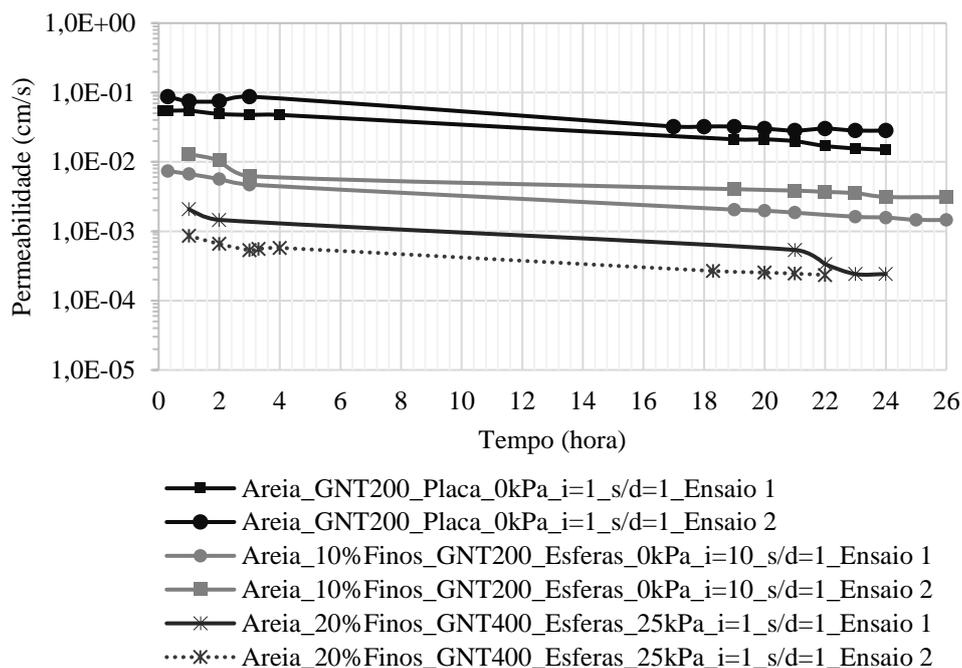
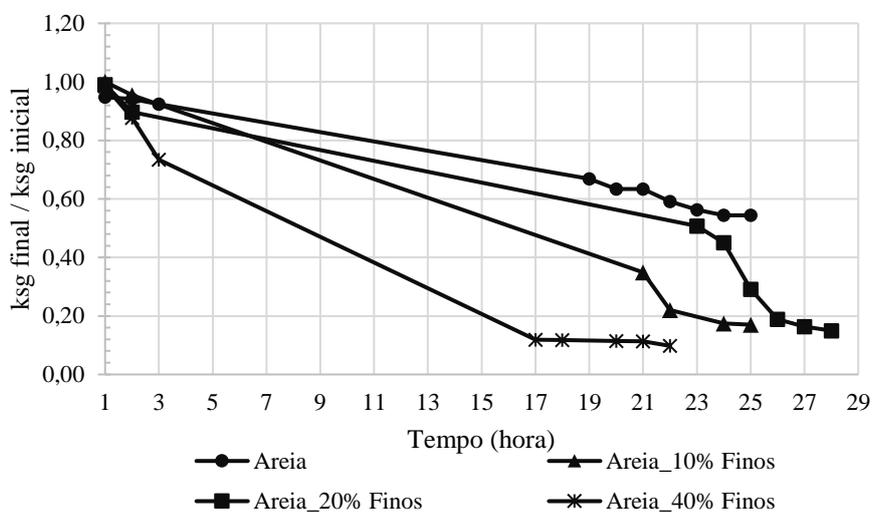


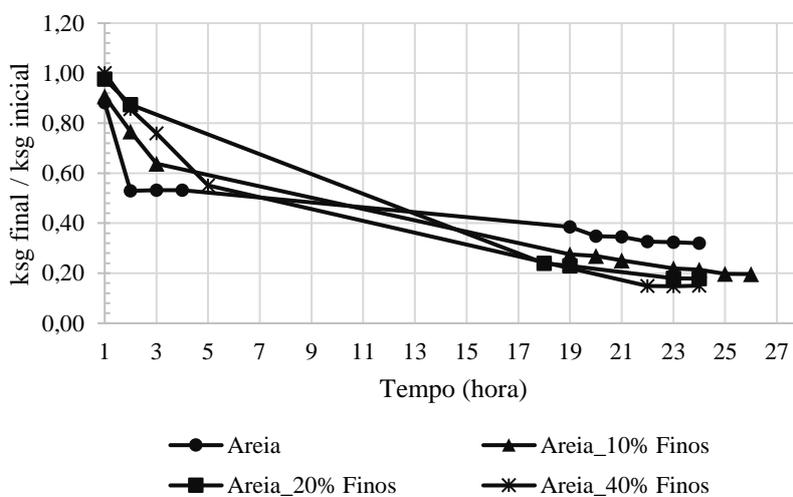
Figura C.1. Teste de repetibilidade dos ensaios de permeabilidade no sistema Solo-geotêxtil

APÊNDICE D

D – INFLUÊNCIA DO TEMPO NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOLO – GEOTÊXTIL



(a) GNT200_ $s/d = 1_0$ kPa



(b) GNT200_ $s/d = 1_{10}$ kPa

Figura D.1. Influência do tempo nos ensaios com esferas e $i = 1$

APÊNDICE E

E – GRAU DE IMPREGNAÇÃO DAS AMOSTRAS

Tabela E.1. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT200

Areia + 40% de finos + Placa, 25 kPa e $i = 1$						
m_3	m_2	msi	m_{gnt} (g/cm ²)	Ai (cm ²)	mf	λ
3,5	1,9	1,6	0,024	72,38	1,73	0,92
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 1$, 25 kPa e $i = 1$						
4,29	2,9	1,39	0,0254	49,48	1,25	1,1
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 1$, 100 kPa e $i = 1$						
4,4	3,82	0,58	0,024	49,48	1,18	0,49
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 0 kPa e $i = 1$						
5,13	4,91	0,22	0,0241	38,93	0,938	0,23
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 25 kPa e $i = 1$						
4,2	3,9	0,3	0,0244	38,93	0,95	0,32
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 100 kPa e $i = 1$						
5,11	4,23	0,88	0,0241	38,93	0,938	0,94

Tabela E.2. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT400

Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 1$, 0 kPa e $i = 1$						
m_3	m_2	msi	m_{gnt} (g/cm ²)	Ai (cm ²)	mf	λ
9,54	5,35	4,19	0,0386	49,48	1,914	2,19
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 1$, 25 kPa e $i = 1$						
6,8	2,8	4	0,042	49,48	2,11	1,89
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 0 kPa e $i = 1$						
9,33	5,75	3,58	0,041	38,93	1,61	2,22
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 100 kPa e $i = 1$						
8,92	6,13	2,79	0,041	38,93	1,61	1,73

Tabela E.3. Resultados do grau de impregnação dos ensaios de permeabilidade solo – GNT600

Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 1$, 25 kPa e $i = 1$						
m_3	m_2	msi	m_{gnt} (g/cm ²)	Ai (cm ²)	mf	λ
8	5,7	2,3	0,056	49,48	2,8	0,82
Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 0 kPa e $i = 1$						
8,62	6,29	2,33	0,063	38,93	2,45	0,95

Areia + 40% de finos + Esferas, $s/d = 2$, 100 kPa e $i = 1$						
11,6	6,7	4,96	0,056	38,93	2,2	2,25

APÊNDICE F

F – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS PARTÍCULAS NA BASE DA AMOSTRA DE SOLO, IMPREGNADAS E PASSANTES NOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO SOLO – GEOTÊXTIL

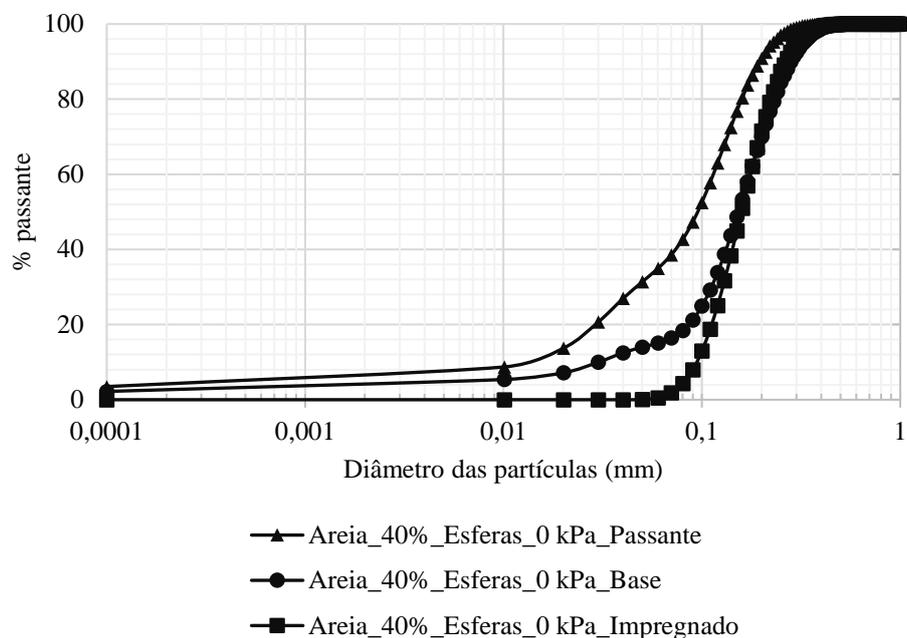


Figura F.1. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 1$, 0 kPa, $i = 1$

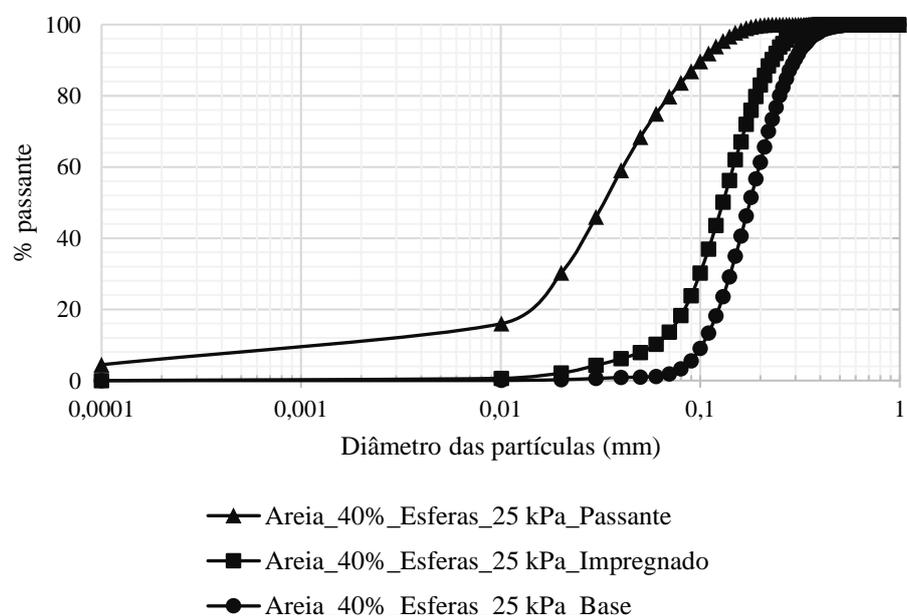


Figura F.2. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 1$, 25 kPa, $i = 1$

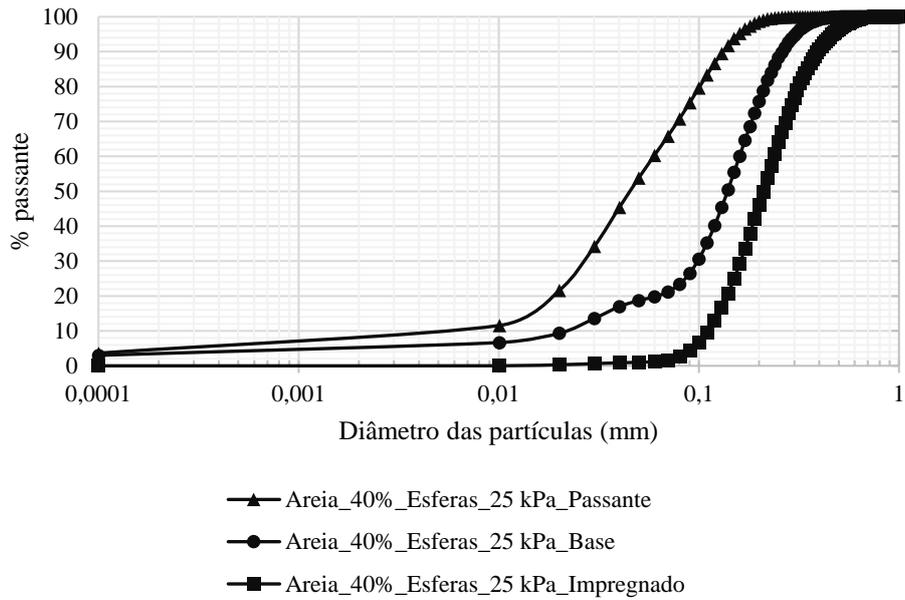


Figura F.3. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 2$, 25 kPa, $i = 1$

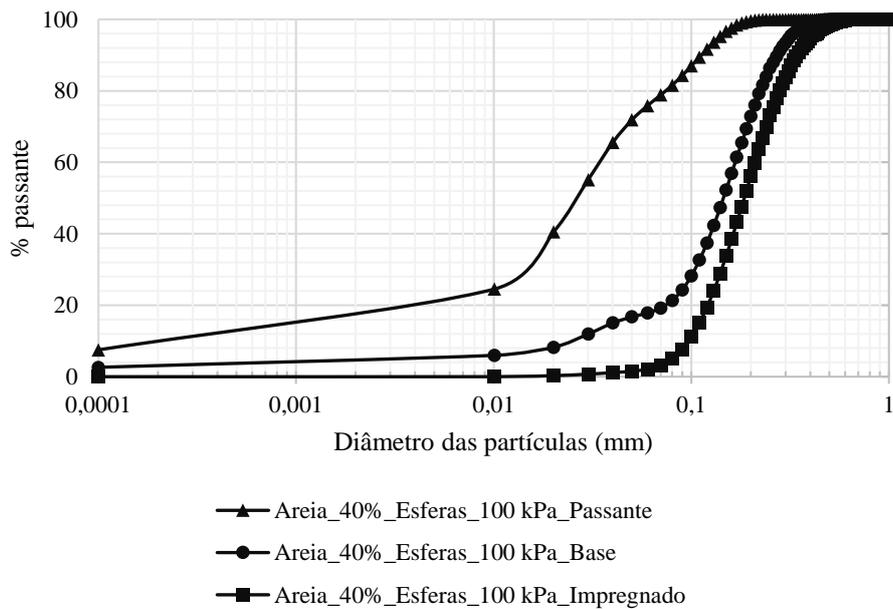


Figura F.4. Curvas granulométricas do material na base, impregnado e passante pelo GNT200, esferas de aço com $s/d = 2$, 100 kPa, $i = 1$

APÊNDICE G

G – DETALHAMENTO DO AFUNDAMENTO DOS GEOTÊXTEIS NAS ESFERAS DE AÇO

Tabela G.1. Afundamentos nas direções x e y, com esferas no $s/d = 2$, e GNT200

Pontos	25 kPa			100 kPa		
	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)
1	1,96		3,19	2,71		3,83
2	1,48		3,01	2,43		4,45
3		1,72	3,08		3,16	4,54
4		1,76	3,07		3,77	3,63
5	1,41		2,96	3,27		4,21
6		2,18	3,42		3,77	4,29
7		1,95			3,61	
8	1,08			2,36		
9		1,54			2,15	
10		2,58			3,96	
11	1,67			2,81		
12	1,94			2,55		
Média (mm)	1,59	1,96	3,12	2,69	3,40	4,16

Tabela G.2. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 2$, e GNT400

Pontos	25 kPa			100 kPa		
	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)
1	2,37		3,04	2,2		3,82
2	2		3,45	2,56		3,11
3		2,51	3,53		3,12	4,5
4		2,74	3,07		3,03	3,81
5	2,3		2,81	3,2		4,11
6		2,48	2,68		3,12	4,59
7		2,43			3,8	
8	1,63			2,14		
9		1,86			2,82	
10		2,32			3,4	
11	1,85			2,48		
12	1,62			2,5		
Média (mm)	1,96	2,39	3,10	2,51	3,22	3,99

Tabela G.3. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 2$, e GNT600

Pontos	25 kPa			100 kPa		
	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)
1	1,04		2,48	1,77		2,87
2	1,07		2,4	1,37		2,53
3		1,18	2,24		1,69	3,34
4		1,73	2,76		1,88	2,96
5	0,92		2,27	1,89		3,26
6		1,75	2,48		1,88	3,28
7		1,59			2,24	
8	0,02			0,93		
9		1,22			2,07	
10		1,33			2,29	
11	0,84			1,82		
12	0,77			1,58		
Média (mm)	0,78	1,47	2,44	1,56	2,01	3,04

Tabela G.4. Afundamentos nas direções x e y (mm), com esferas no $s/d = 1$, e GNT200

Pontos	25 kPa			100 kPa		
	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)	Grupo 1	Grupo 2	δ máx (mm)
1	0,69	-	1,36	1,18	-	2,25
2	0,96	-	1,29	1,57	-	2,38
3	1,49	-	1,92	1,51	-	2,21
4	0,71	-	1,38	1,44	-	1,99
5	-	1,19	1,67	-	2,02	2,07
6	-	1,32	1,64	-	1,8	2,08
7	-	1,56	1,74	-	1,73	2,37
8	-	1,22	1,16	-	1,78	2,01
9	-	1,51	1,22	-	1,24	2,15
10	-	1,46	1,66	-	1,84	2,41
11	1,22	-	1,39	1,97	-	2,3
12	-	0,9	0,98	-	1,41	2,46
13	-	1,49	1,58	-	1,58	2,29
14	-	1,18	1,67	-	1,35	2,39
15	-	1,57	1,26	-	1,95	2,34
16	0,35	-	2,17	1,47	-	2,57
17	-	1,12	0,94	-	1,6	2,17
18	-	0,85	1,52	-	1,42	2,08
19	-	1,47	1,04	-	1,82	2,33
20	-	1,33	1,08	-	1,42	2,5
21	-	1,16	1,11	-	1,73	2,19
22	-	1,32	1,23	-	1,59	2,41
23	-	1,45	1,78	-	1,74	2,45
24	-	1,21	1,86	-	1,41	2,55
25	1,23	-	2,25	1,92	-	2,39
26	-	0,87	1,5	-	1,38	2,64
27	-	1,2	1,54	-	1,77	2,58
28	-	0,74	1,44	-	1,5	2,33
29	-	1,96	1,64	-	1,76	2,36
30	-	2,15	1,65	-	1,54	2,46
31	0,7	-	1,83	1,13	-	2,66
32	-	0,8	1,52	-	1,54	2,41
33	-	1,49	-	-	1,74	-
34	-	1,26	-	-	1,65	-
35	-	0,91	-	-	1,5	-
36	-	1,04	-	-	1,52	-
37	-	1,16	-	-	1,48	-
38	-	1,49	-	-	1,7	-
39	-	1,58	-	-	1,91	-
40	1,74	-	-	2	-	-
41	-	1,1	-	-	1,67	-
42	-	1,07	-	-	1,27	-
43	-	1,08	-	-	1,3	-
44	-	1,51	-	-	1,96	-
45	0,7	-	-	1,24	-	-
46	-	-	-	-	1,94	-
47	-	-	-	-	1,86	-
48	-	-	-	-	1,63	-
49	-	-	-	-	2,02	-
50	-	1,51	-	-	1,9	-
51	-	1,57	-	-	1,85	-
52	1,08	-	-	1,36	-	-
53	0,93	-	-	1,35	-	-
54	1,06	-	-	1,4	-	-
55	1,07	-	-	1,42	-	-
Média (mm)	1,00	1,30	1,50	1,50	1,65	2,34