

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

**AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SOLICITAÇÃO MECÂNICA**

ISAC PIRES MORAES FILHO

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 297/2018

BRASÍLIA – DF, FEVEREIRO DE 2018.

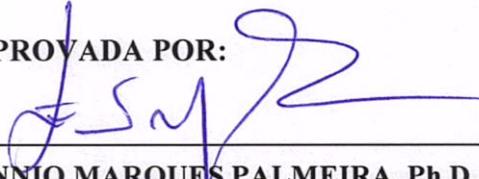
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SOLICITAÇÃO MECÂNICA**

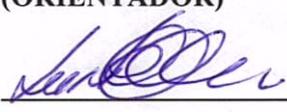
ISAC PIRES MORAES FILHO

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.

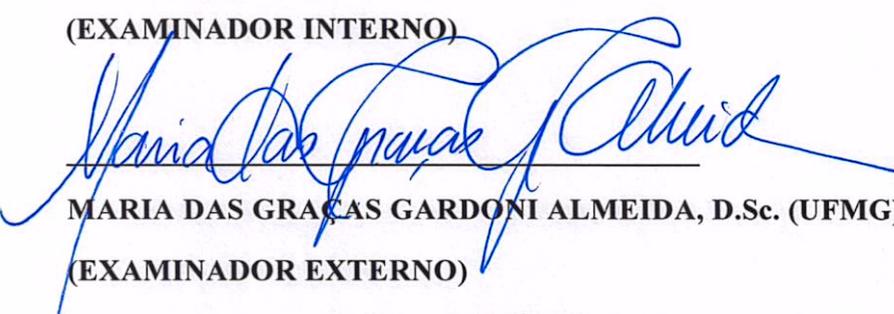
APROVADA POR:



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



LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



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

DATA: BRASÍLIA/DF, fevereiro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

MORAES FILHO, ISAC PIRES;

Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob diferentes condições de solicitação mecânica. [Distrito Federal] 2018.

xxi, - 122 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geotêxtil

2. *Bubble Point Test*

3. Abertura de filtração

4. Confinamento e Deformação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAES FILHO, I.P. (2018). **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob diferentes condições de solicitação mecânica.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-297/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ISAC PIRES MORAES FILHO.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob diferentes condições de solicitação mecânica.**

GRAU / ANO: Mestre / 2018.

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.

Isac Pires Moraes Filho

SQS 109 BLOCO A apartamento 405

70372010 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo grande apoio no cotidiano.

Agradeço a todos os professores do mestrado, pelos conhecimentos compartilhados nas aulas e pela sua contribuição à minha formação profissional.

Agradeço muito ao meu querido orientador, o professor Ennio, por estar sempre presente para esclarecer minhas dúvidas e me ajudar com paciência e atenção.

Agradeço aos meus queridos amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, em especial os meus amigos Ana Carolina, Chan, Débora, Giovanna, Igor, Juliana, Lais, Thais.

Agradeço imensamente ao CNPq e à Capes pelo financiamento ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Geotêxteis são comumente utilizados como filtros em obras geotécnicas e geoambientais. Para o dimensionamento de tais filtros é de fundamental importância o conhecimento da abertura de filtração do geotêxtil. Para entender um pouco melhor o comportamento dos geotêxteis foram realizados ensaios em geotêxteis de poliéster com gramatura de 200 g/m², 300 g/m² e 600 g/m², sob diferentes condições de solicitação mecânica (confinados e tracionados). Um equipamento foi especialmente projetado e construído para permitir a realização de ensaios de abertura de filtração usando a técnica do Bubble Point em espécimes de geotêxteis tracionados e confinados. Foram ensaiados espécimes de diferentes geotêxteis não tecidos tracionados até deformações de 20% e sob confinamento de tensões verticais de até 1000 kPa.

Com os resultados obtidos nos diferentes ensaios e utilizando várias metodologias encontradas na literatura, foram estimadas as aberturas de filtração dos geotêxteis. As previsões foram comparadas aos resultados de ensaios com acurácia satisfatória. Os ensaios também permitiram afirmar que o confinamento leva à diminuição do valor da abertura de filtração e a deformação por tração ao aumento do valor da abertura de filtração.

Com os dados obtidos, pode-se utilizar os critérios de filtros com maior acurácia, dependendo de cada obra. Isto evitará a realização de projetos muito conservadores e auxiliaria na escolha do geotêxtil com a abertura de filtração adequada para cada tipo de solo e condições de solicitação mecânica.

Geotextiles are commonly used as filters in geotechnical and geoenvironmental constructions. Designing such filters requires the knowledge of the opening size of the geotextile. In order to understand the geotextiles a little better, tests were carried out on polyester geotextiles with values of mass per unit area of 200 g/m², 300 g/m² and 600 g/m², under different mechanical conditions (confined and tensioned). An equipment was specially designed and constructed to allow the use of the Bubble Point Test on specimens of tensioned and confined geotextiles. Specimens of different non-woven geotextiles were tested for up to 20% tensile strain and under vertical stress confinement of up to 1000 kPa.

With the results obtained in the different tests and using several methodologies found in the literature, the filtration opening size of the geotextiles were estimated. The predictions were compared to the results of tests with satisfactory accuracy. The tests showed that confinement leads to a decrease in pore dimensions, whereas tensile strains increase them.

With results such as those obtained in this work, one can use filter criteria with greater accuracy, depending on each work characteristics. This will tend to minimize overconservative designs and will help in the choice of the geotextile with the adequate filtration opening size for each type of soil and mechanical solicitation of the geotextile filter.

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
CAPÍTULO 2.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO	4
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	4
2.1.2 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	6
2.2 GEOTÊXTEIS	8
2.2.1 FABRICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS.....	9
2.3 PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS.....	14
2.3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS	15
2.3.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	18
2.3.2.1 PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO E PERMISSIVIDADE..	19
2.3.2.2 PERMEABILIDADE TRANSVERSAL E TRANSMISSIVIDADE.....	21
2.3.2.3 ABERTURA DE FILTRAÇÃO.....	23
2.3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	24
2.3.3.1 CRITÉRIO DE RETENÇÃO.....	25
2.3.3.2 CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE	29
2.3.3.3 CRITÉRIO ANTICOLMATAÇÃO.....	30
2.3.3.4 CRITÉRIO DE DURABILIDADE.....	32
2.4 INFLUÊNCIA DAS TENSÕES E TRACIONAMENTO NAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS	32
2.4.1 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE TENSÕES	32
2.4.2 INFLUÊNCIA DO TRACIONAMENTO	34
2.5 BUBBLE POINT TEST OU MÉTODO DO PONTO DE BOLHA.....	36

CAPÍTULO 3.....	42
3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	42
3.1 MATERIAIS	42
3.1.1 GEOTÊXTEIS	42
3.1.2 MICROESFERAS DE VIDRO	43
3.2 EQUIPAMENTOS.....	45
3.2.1 EQUIPAMENTO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	45
3.2.2 EQUIPAMENTO DE TRAÇÃO BIDIRECIONAL.....	47
3.2.3 EQUIPAMENTO DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) PARA ENSAIOS SEM CONFINAMENTO	49
3.2.4 EQUIPAMENTO DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) PARA ENSAIOS COM CONFINAMENTO	51
3.2.4.1 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DE CONFINAMENTO	52
3.2.5 INSTRUMENTAÇÃO.....	52
3.2.5.1 CÉLULA DE CARGA.....	53
3.2.5.2 AQUISITOR DE DADOS	53
3.2.6 SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO MICROESFERAS DE VIDRO	54
CAPÍTULO 4.....	55
4. METODOLOGIA	55
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ENSAIO.....	56
4.2 AMOSTRAS TRACIONADAS EM UMA DIREÇÃO	58
4.3 AMOSTRAS TRACIONADAS EM DUAS DIREÇÕES.....	61
4.4 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) SEM CONFINAMENTO	62
4.5 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) COM CONFINAMENTO.....	64
4.6 PREPARAÇÃO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO MICROESFERAS DE VIDRO.....	65
CAPÍTULO 5.....	68
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
5.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TRACIONAMENTO NA ABERTURA	

DE FILTRAÇÃO	72
5.1.1 GEOTÊXTIL TRACIONADO EM UMA DIREÇÃO	72
5.1.2 GEOTÊXTIL TRACIONADO EM DUAS DIREÇÕES.....	75
5.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM UMA DIREÇÃO E DUAS DIREÇÕES 78	
5.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO	83
5.3 AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO ATRAVÉS DOS ENSAIOS COM MICROESFERAS DE VIDRO.....	101
CAPÍTULO 6.....	107
6. CONCLUSÃO	107
6.1 CONCLUSÕES.....	107
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO I.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Características em filtração e drenagem dos geotêxteis segundo processo de fabricação (modificada de Corbet, 1993 e Trejos, 2016).....	13
Tabela 2.2. Peso específico dos materiais (modificado de Shukla, 2002).....	16
Tabela 2.3. Critérios de retenção para geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000b).....	25
Tabela 2.4. Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).....	30
Tabela 3.1. Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados.....	42
Tabela 3.2. Características granulométricas das microesferas de vidro (Tatto, 2010).....	44
Tabela 4.1. Combinação dos ensaios de ponto de bolha realizados.....	55
Tabela 4.2. Combinação dos ensaios realizados com microesferas de vidro.....	56
Tabela 5.1. Aberturas de filtração peneira #170 – célula sem confinamento.....	69
Tabela 5.2. Aberturas de filtração peneira #170 – célula com confinamento.....	71
Tabela 5.3. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção.....	74
Tabela 5.4. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção.....	75
Tabela 5.5. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções.....	77
Tabela 5.6. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções.....	78
Tabela 5.7. Valores de O_{50} , O_{30} , O_{10}	80
Tabela 5.8. Variação percentual de aumento da abertura de filtração em função do aumento da deformação.....	82
Tabela 5.9. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção e confinados.....	95
Tabela 5.10. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção e confinados.....	96
Tabela 5.11. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções e confinados.....	96

Tabela 5.12. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções e confinados.....	97
Tabela 5.13. Valores de O_{98} a partir dos ensaios com microesferas de vidro.....	104
Tabela 5.14. Valores de O_{98} a partir dos ensaios de ponto de bolha – reprise.....	104
Tabela 5.15. Valores de O_{95} a partir dos ensaios com microesferas de vidro.....	105
Tabela 5.16. Valores de O_{95} a partir dos ensaios de ponto de bolha – reprise.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de classificações dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).....	6
Figura 2.2. Esquema de funções dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).....	8
Figura 2.3. Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2003).....	9
Figura 2.4. Processos de fabricação de geotêxteis tecidos e não tecidos (Vertematti, 2001).....	9
Figura 2.5. Fabricação dos geotêxteis tecidos (Vertematti, 2001).....	10
Figura 2.6. Fabricação dos geotêxteis não tecidos cardados (Vertematti, 2001).....	11
Figura 2.7. Fabricação dos geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos (Vertematti, 2001).....	11
Figura 2.8. Aplicações de geotêxteis em obras de filtração e drenagem: (a) drenagem subsuperficial, (b) adensamento de solo mole, (c) barragem de terra (Gardoni, 200).....	14
Figura 2.9. Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com tensão vertical (modificado de Giroud, 1996).....	17
Figura 2.10. Tamanho de constrição em arranjos de esferas (modificado de Kenney et al, 1984).....	17
Figura 2.11. Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).....	18
Figura 2.12. Esquema de ensaio de permissividade (modificado de Palmeira, 2003).....	20
Figura 2.13. Resultados experimentais – ensaios de permeabilidade em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado de Lafleur & Rollin, 1983).....	21
Figura 2.14. Esquema ensaio de transmissividade (modificado - Palmeira & Gardoni, 2002).....	22
Figura 2.15. Mecanismos de colmatação em filtros de geotêxtil (Palmeira & Gardoni, 2000b).....	27
Figura 2.16. Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987 <i>apud</i> Tatto, 2010).....	29
Figura 2.17. Condição de colmatação física dos geotêxteis (modificado de Hoare, 1982 <i>apud</i>	

Silva, 2014).....	31
Figura 2.18. Variação da abertura de filtração (O_{98} e O_{95}) com a tensão normal de confinamento (Silva, 2014).....	33
Figura 2.19. Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para geotêxtil de polipropileno de 200g/m (Trejos, 2016).....	33
Figura 2.20 Variação na abertura de filtração aparente com a deformação (Wu et al, 2008, com modificações).....	34
Figura 2.21. Relação entre a abertura de filtração (O_{95}) e deformação (Wu & Hong, 2017, com modificações).....	35
Figura 2.22. <i>Bubble point test</i> convencional (Elton & Hayes, 2007).....	36
Figura 2.23. Esquema do equipamento para ensaio do ponto de bolha. Reproduzido de ASTM (2014).....	37
Figura 2.24. Esquema da célula para ensaio do ponto de bolha. Reproduzido de ASTM (2014).....	38
Figura 2.25. Curvas obtidas em ensaios de ponto de bolha (Silva, 2014).....	40
Figura 2.26. Curvas de distribuição de poros do geotêxtil de polipropileno 200g/m impregnado (Trejos, 2016).....	41
Figura 3.1 Detalhe do geotêxtil: a) agulha utilizada no processo de consolidação, b) processo de consolidação (Hsuan & Koerner, 2002), c) furos das agulhas, d) aleatoriedade da disposição dos filamentos contínuos do geotêxtil não tecido, obtidos com o microscópio de alta resolução (Tatto, 2010 <i>apud</i> Silva, 2014).....	43
Figura 3.2. Detalhe das microesferas de vidro (Tatto, 2010).....	44
Figura 3.3. Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrassom (Tatto, 2010).....	44
Figura 3.4. Equipamento de tração uniaxial, EMIC Linha DL 2000.....	45
Figura 3.5. Detalhe da adaptação no equipamento. Fita métrica para leitura das deformações desejadas.....	46
Figura 3.6. Moldura para manutenção do tracionamento.....	46
Figura 3.7. Esquema básico do equipamento de tração bidirecional.....	47

Figura 3.8. Detalhes das garras do equipamento de tração bidirecional.....	47
Figura 3.9. (a) Estrutura (b) acessórios do equipamento de tração bidirecional.....	48
Figura 3.10. Equipamento de tração bidirecional.....	48
Figura 3.11. Equipamento montado para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos.....	49
Figura 3.12. Célula de ensaio sem confinamento.....	50
Figura 3.13. (a) Fluke 922 e (b) Fluxômetro hospitalar.....	50
Figura 3.14. (a) Célula de ensaio de ponto de bolha com confinamento e (b) detalhe do prato de compreensão.....	51
Figura 3.15. Sistema de aplicação de carga para ensaios de ponto de bolha confinados.....	52
Figura 3.16. Sistema de aquisição de dados.....	53
Figura 3.17. Massageador.....	54
Figura 4.1. Preparação das amostras.....	58
Figura 4.2. Amostra alocada no equipamento de tração uniaxial. A distância entre as garras é 150 mm.....	59
Figura 4.3. Moldura fixada para manter a deformação desejada.....	60
Figura 4.4 Amostra tracionada posicionada sobre a célula de ensaio.....	61
Figura 4.5. Amostra fixada no equipamento de tração bidirecional.....	62
Figura 4.6. (a) Posição das telas metálicas na célula de ensaio e (b) detalhe das telas metálicas.....	64
Figura 4.7. Microesferas posicionadas para ensaio.....	66
Figura 4.8. Posição de vibração da célula de ensaio.....	67
Figura 5.1. Vazão de ar versus pressão peneira #170 – célula sem confinamento.....	68
Figura 5.2. Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170 – célula sem confinamento.....	69
Figura 5.3. Vazão de ar versus pressão peneira #170 – célula com confinamento.....	70
Figura 5.4. Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170 – célula com confinamento.....	71

Figura 5.5. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) tracionado unidirecionalmente.....	73
Figura 5.6. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) tracionado unidirecionalmente.....	73
Figura 5.7. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) tracionado unidirecionalmente.....	74
Figura 5.8. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) tracionado bidirecionalmente.....	76
Figura 5.9. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) tracionado bidirecionalmente.....	76
Figura 5.10. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) tracionado bidirecionalmente.....	77
Figura 5.11. Variação do O_{98} com nível de deformação.....	79
Figura 5.12. Variação do O_{95} com nível de deformação.....	79
Figura 5.13. Variação do O_{50} com nível de deformação.....	81
Figura 5.14. Variação do O_{30} com nível de deformação.....	81
Figura 5.15. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, sem deformação.....	83
Figura 5.16. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.....	84
Figura 5.17. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em uma direção.....	84
Figura 5.18. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.....	85
Figura 5.19. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, sem deformação.....	86
Figura 5.20. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.....	86
Figura 5.21. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com	

deformação de 10%, tracionado em uma direção.....	87
Figura 5.22. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.....	87
Figura 5.23. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, sem deformação.....	88
Figura 5.24. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.....	88
Figura 5.25. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em uma direção.....	89
Figura 5.26. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.....	89
Figura 5.27. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções.....	90
Figura 5.28. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.....	91
Figura 5.29. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.....	91
Figura 5.30. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções.....	92
Figura 5.31. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.....	92
Figura 5.32. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.....	93
Figura 5.33. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções.....	93
Figura 5.34. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.....	94
Figura 5.35. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.....	94

Figura 5.36. Variação de O_{98} (mm) em função do confinamento e da deformação – G1.....	98
Figura 5.37. Variação de O_{98} (mm) em função do confinamento e da deformação – G2.....	98
Figura 5.38. Variação de O_{98} (mm) em função do confinamento e da deformação – G3.....	99
Figura 5.39. Variação de O_{95} (mm) em função do confinamento e da deformação – G1.....	99
Figura 5.40. Variação de O_{95} (mm) em função do confinamento e da deformação – G2.....	100
Figura 5.41. Variação de O_{95} (mm) em função do confinamento e da deformação – G3.....	100
Figura 5.42. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) natural – ensaio com microesferas.....	101
Figura 5.43. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) com deformação de 5%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.....	102
Figura 5.44. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) com deformação de 5%, tracionado em duas direções – ensaio com microesferas.....	102
Figura 5.45. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, sem deformação – ensaio com microesferas.....	103
Figura 5.46. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.....	103
Figura 5.47. Comparação dos valores de O_{95} através dos ensaios com microesferas e O_{95} através dos ensaios de ponto de bolha.....	106

LISTA DE SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AOS	Apparent Opening Size ou abertura de filtração
ASTM	America Society of Testing Materials
BBP	Bubble Point Test
B	Constante de capilaridade no ensaio de ponto de bolha
C_u	Coefficiente linear de uniformidade do solo
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
CGS	Canadian Geotechnical Society
C_u	Coefficiente de uniformidade do solo
D	Diâmetro das partículas do solo
d	Diâmetro dos poros do geotêxtil
D_{15}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 15% passante em peso
D_{30}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 30% passante em peso
D_{50}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 50% passante em peso
D_{85}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 85% passante em peso
D_{90}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 90% passante em peso
D_{95}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 95% passante em peso
D_c	Constrição ou a menor abertura em um canal de fluxo
d_f	Diâmetro das fibras do geotêxtil
D_G	Tamanho mínimo do solo
D_i	Tamanho indicativo de solo de base protegido
d_s	Diâmetro das partículas de solo
EOS	Tamanho de abertura equivalente
FHWA	Federal Highway Administration
FOS	Filtration Opening Size ou Abertura de Filtração
FS	Fator de segurança
g	Aceleração da gravidade
GR	Gradient Ratio ou Ensaio de Filtração do tipo Razão entre Gradientes
GTNa	Geotêxtil não tecido agulhado
GTNr	Geotêxtil não tecido resinado

GTNt	Geotêxtil não tecido termoligado
I_D	Densidade relativa
IGS	International Geosynthetic Society
ISO	International Organization for Standardization
k	Coefficiente de permeabilidade
k_f	Coefficiente de permeabilidade do filtro
k_n	Coefficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
k_p	Coefficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil
k_σ	Fator de redução por confinamento do geotêxtil
k_S	Permeabilidade do solo
LPM	Litros Por Minuto
M_A	Gramatura - massa por unidade de área
m.c.a.	Metro de coluna de água
MEV	Microesferas de vidro
M_f	Massa das fibras do geotêxtil
M_S	Massa das partículas de solo no geotêxtil
mm	Milímetro
N	Número que depende do critério de filtro utilizado
NBR	Norma Brasileira
n_{GT}	Porosidade do geotêxtil
n_{ef}	Porosidade efetiva
O_{50}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 50% passando
O_{85}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 85% passando
O_{90}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 90% passando
O_{95}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passando
O_{98}	Tamanho máximo de poros
O_f	Abertura de filtração do geotêxtil
PA	Poliamida
PE	Polietileno

PP.....	Polipropileno
PET.....	Poliéster
POA.....	Percentagem de área aberta
PSD	Pore Size Distribution
Q	Vazão
Qdry	fluxo de ar que passa através da amostra no teste seco no BBP
Qwet.....	fluxo de ar que passa através da amostra no teste úmido no BBP
T.....	Tensão superficial
t_{GT}	Espessura do geotêxtil
UnB	Universidade de Brasília
USACE	United States Army Corps of Engineers
β	Fator de forma, função da tortuosidade do meio
η_w	Viscosidade dinâmica do fluido
θ	Transmissividade
ρ_f	Massa específica de fibras
ρ_w	Massa específica do fluido
ψ	Permissividade
Θ	Ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil no ensaio de ponto de bolha

1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil vem cada vez mais desenvolvendo tecnologias para a melhor interação entre o homem e o meio ambiente. Desta forma, a sociedade é cada vez mais rigorosa com os projetos e soluções empregados em obras geotécnicas e, por isso, a utilização de materiais geossintéticos ganha espaço em tais projetos e soluções. Atualmente, o mercado apresenta grande variedade deste tipo de material, que pode exercer diversas funções, tais como reforço, drenagem, filtração, separação, proteção e barreira.

O geotêxtil é um exemplo de geossintético utilizado amplamente em projetos de filtros, reforço de solos, obras de contenção, canais e áreas verdes. Atualmente, os geotêxteis são priorizados para utilização em obras em função de seu menor custo, maior praticidade e diminuição de impacto ambiental, quando comparados às soluções tradicionais. Entretanto, acontecimentos recentes como o rompimento de barragens de rejeito de minério na região de central de Minas Gerais vêm alertando a comunidade geotécnica para melhor dimensionamento de componentes determinantes para o comportamento da poropressão. O geotêxtil é um componente importante nesta análise, já que é ele quem trabalha com função de drenagem e filtro.

Neste contexto, faz-se necessário definir condições que sejam ajustadas à realidade à qual o geotêxtil estará submetido na obra. Como material de filtro, é importante conhecer a abertura de filtração disponível para a passagem dos grãos de solo através do geotêxtil não tecido, propriedade que apresenta variações segundo o estado de tensões atuante. A definição das características corretas do geotêxtil auxiliará na escolha de um material que permita drenar o solo sem que ocorra fuga das partículas sólidas.

Para estudar o comportamento dos geotêxteis sob confinamento, as atividades descritas nesta dissertação foram executadas utilizando um equipamento para ensaios de ponto de bolha (*Bubble Point Test*). Diferentes condições de ensaios e tipos de materiais foram empregados, visando avaliar a influência do confinamento e do tracionamento do filtro sobre a sua capacidade de retenção.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A motivação desta pesquisa fundamenta-se na importância da necessidade de critérios de filtros condizentes com a realidade de campo para otimização dos recursos aplicados, aumentando a confiabilidade dos projetos e segurança das obras. Assim, são necessárias pesquisas que permitam o desenvolvimento de critérios de filtros para geotêxteis sob condições de confinamento e tração.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste na avaliação da abertura de filtração de geotêxteis confinados e tracionados utilizando o equipamento de ensaio de ponto de bolha (*Bubble Point Test*).

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter experimentalmente a abertura de filtração de diferentes tipos de geotêxteis;
- Avaliar a variação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e tracionados;
- Comparar resultados obtidos nos ensaios com os disponíveis na literatura e com previsões teóricas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 6 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a descrição do tema da dissertação, incluindo a introdução, a motivação da pesquisa, o objetivo geral e os específicos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do tema de estudo. Este capítulo se inicia com a definição básica de geotêxtil: tipos, processo de fabricação, funções e

propriedades. Ainda na fundamentação teórica, a dissertação mostra a utilização prática da aplicação de geotêxteis em obras de filtração e drenagem e os resultados obtidos em pesquisas anteriores, importantes para o presente estudo. O Capítulo 3 apresenta os materiais e os equipamentos que foram utilizados nos ensaios, suas especificações e propriedades. O Capítulo 4 fornece a metodologia empregada na pesquisa, onde são descritos os procedimentos para a preparação das amostras, além do processo de tração, confinamento e posterior obtenção da curva de distribuição de poros, por meio do ensaio de ponto de bolha. Neste capítulo também é apresentada a metodologia utilizada para obtenção das aberturas de filtração utilizando esferas de vidro. O Capítulo 5 descreve os resultados obtidos nos ensaios e as análises efetuadas, levando-se em conta o tracionamento e o confinamento. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo da dissertação são apresentadas as definições do material geotêxtil, os tipos de geotêxteis, as principais funções e propriedades dos geotêxteis, as aplicações de geotêxteis em sistemas de drenagem e filtração, os critérios de filtro e resultados obtidos em pesquisas anteriores.

2.1 DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO

Segundo a ASTM D4439 (ASTM, 1994), o geossintético pode ser definido como sendo um produto planar, oriundo de materiais poliméricos, usados em combinação com solos, rochas e outros materiais relacionados com engenharia geotécnica como parte integrante de projetos.

De acordo com Palmeira (2000), os geossintéticos são muito utilizados em obras de engenharia civil, particularmente as geotécnicas e de proteção ambiental. Segundo o autor, eles compreendem um conjunto de materiais poliméricos com características e funções diferenciadas que garantem o alto grau de durabilidade desejada na obra. Os polímeros mais comumente utilizados na confecção destes materiais são o polipropileno (PP), o polietileno (PE) e o poliéster (PT).

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem ser classificados dependendo do processo de fabricação. A *International Geosynthetic Society* (IGS, 2000) divulga as denominações usuais e breves descrições dos geossintéticos (Figura 2.1) que estão apresentadas a seguir:

Geotêxtil: é uma manta contínua de fibras ou filamentos, tecido ou não tecido, tricotado ou costurado. A manta é flexível e permeável. Geotêxteis são usados para aplicações de separação,

proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões.

Geotêxtil tecido: é fabricado pelo entrelaçamento de fios, fibras ou outros elementos, geralmente em ângulos retos.

Geotêxtil não tecido: é composto por fibras ou filamentos orientados ou distribuídos aleatoriamente, ligados por processo mecânico, químico ou térmico ou pela combinação destes.

Geogrelha: é um material geossintético com forma de grelha. A principal aplicação das geogrelhas é em reforço de solos.

Georrede: é um material com aparência semelhante à das grelhas formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante. Possui alta porosidade ao longo do plano, sendo usada para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases.

Geomembrana: é uma manta contínua e flexível constituída de um ou mais materiais sintéticos. Possui baixíssima permeabilidade e é usada como barreira para fluidos, gases ou vapores.

Geocomposto: é o geossintético formado pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos como, por exemplo: geotêxtil-georrede; geotêxtil-geogrelha; georrede-geomembrana ou geocomposto argiloso (GCL). Geocompostos drenantes pré-fabricados são constituídos por um núcleo plástico drenante envolto por um filtro geotêxtil.

Geocomposto argiloso (GCL): é o geocomposto fabricado com uma camada de bentonita geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligada a uma geomembrana ou a uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os GCLs 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 líquido ou gás e são comumente usados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas.

Geotubo: é um tubo polimérico, perfurado ou não, usado para drenagem de líquidos ou gases, como no caso da coleta de chorume e gases em aplicações de aterros sanitários. Em alguns casos, o tubo perfurado é envolvido por um filtro geotêxtil.

Geocélula: é um arranjo tridimensional relativamente espesso, constituído por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto.

Geoexpandido: são blocos ou placas produzidos por meio da expansão de espuma de

poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade. O geoexpandido é 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 muros rígidos.

Geospaçadores: são materiais com estrutura tridimensional com grande quantidade de vazios, para utilização em drenagem.

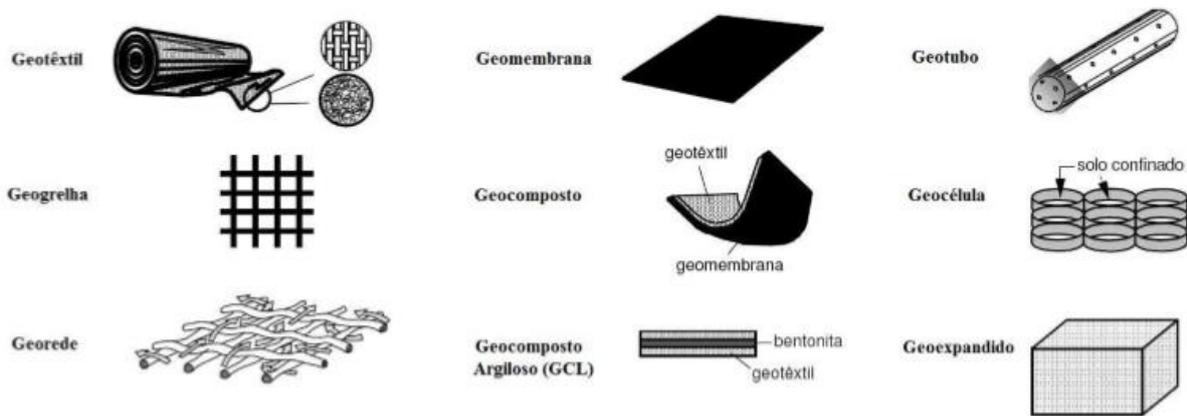


Figura 2.1. Esquema de classificações dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).

2.1.2 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem ser aplicados em diversas situações, conforme abaixo (Giroud, 1980 e IGS, 2000):

Drenagem: quando conduz a água coletada do maciço de solo para um outro local ou estrutura apropriada para a saída/coleta de água.

Barreira: quando permite a estanqueidade do maciço.

Separação do solo: quando colocados entre dois materiais granulometricamente diferentes, impedindo a mistura de ambos. Por exemplo, geotêxteis são usados para evitar que os materiais da base de um pavimento penetrem no solo mole de camadas subjacentes, assim mantendo a

espessura da camada de projeto e a integridade da estrada. O geossintético também auxilia na prevenção da entrada de finos para o interior da camada granular permeável de pavimentos.

Filtração: nesse caso, o geossintético desempenha papel similar ao de um filtro de areia, permitindo a livre passagem de água através do solo enquanto retém as partículas sólidas. Por exemplo, geotêxteis são empregados para evitar a migração do solo para dentro do agregado drenante ou de tubulações, enquanto mantém o fluxo do sistema.

Reforço: o geossintético atua como elemento de reforço inserido no solo para melhorar propriedades de resistência e reduzir a deformabilidade do material composto. Por exemplo, geotêxteis são usados na massa de solo de forma a possibilitar a construção de muros de solo reforçado verticais ou aproximadamente verticais. O emprego do reforço possibilita a construção de aterros sobre fundações em solos moles, bem como de taludes íngremes impossíveis de serem viabilizados em solos não reforçados.

Contenção de fluidos e gases: o geossintético atua como uma barreira relativamente impermeável visando prover uma camada protetora contra danos ou contaminação de solos ou geossintéticos vizinhos. Por exemplo, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (GCL) e geotêxteis impregnados por asfalto podem ser empregados como barreiras para impedir o escoamento de líquidos e gases. Além disso, podem ser utilizados na capa asfáltica de pavimentos, no envelopamento de solos expansivos e na contenção de resíduos.

Controle de Processos Erosivos: O geossintético trabalha para reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e pelo escoamento superficial. Por exemplo, mantas ou colchões de geossintéticos podem ser dispostos ao longo do talude. Barreiras de geotêxtil são também usadas na retenção de sedimentos carregados durante o escoamento superficial. Algumas barreiras de controle de processos erosivos são fabricadas com materiais biodegradáveis.

A Figura 2.2 exemplifica algumas das funções explanadas acima.

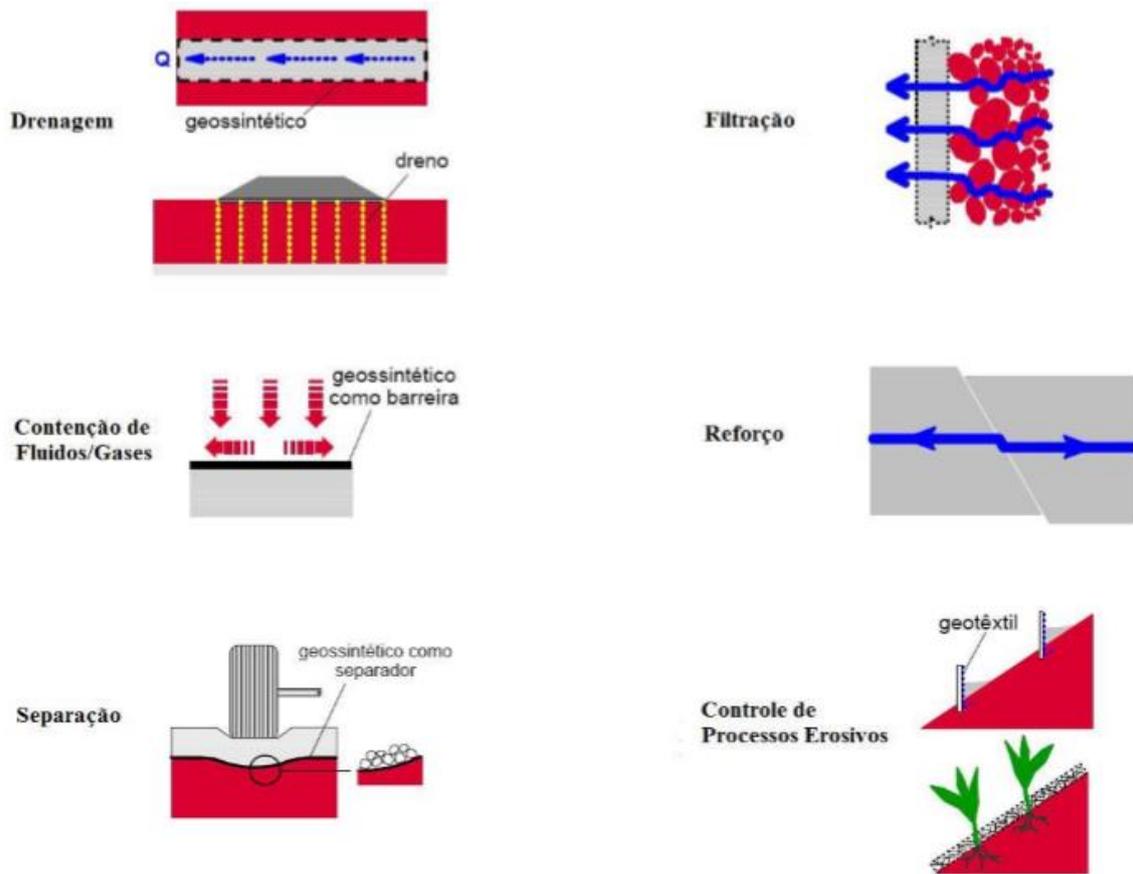


Figura 2.2. Esquema de funções dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).

2.2 GEOTÊXTEIS

Após a breve introdução ao universo de todos os geossintéticos, passa-se a tratar o material foco da pesquisa: o geotêxtil.

Conforme apresentado anteriormente, geotêxtil (Figura 2.3) é um tipo de geossintético definido pela norma NBR ISO 10318 (ABNT, 2013) como um produto têxtil tridimensional permeável, composto por fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhem várias funções numa obra geotécnica. Os polímeros mais comuns utilizados para a sua fabricação são o poliéster (PET) e o polipropileno (PP).

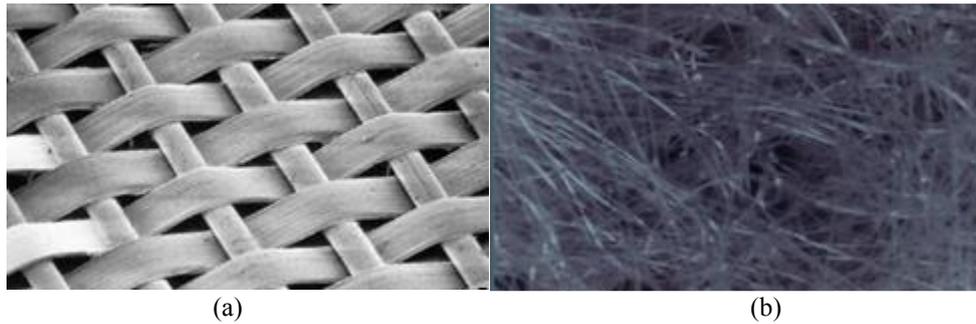


Figura 2.3. Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2003).

2.2.1 FABRICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis tecidos e não tecidos diferem entre si pelos processos de fabricação, como é apresentado na Figura 2.4. Devido ao processo de confecção os geotêxteis não tecidos normalmente têm maior espessura do que os tecidos (Basham et al., 2004).

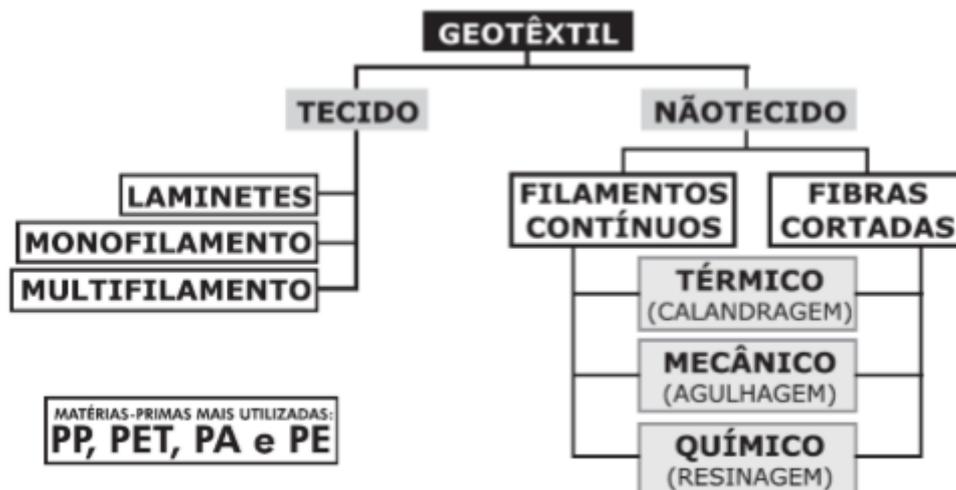


Figura 2.4 Processos de fabricação de geotêxteis tecidos e não tecidos (Vertematti, 2001).

Segundo Vertematti (2001), os geotêxteis tecidos basicamente são fabricados em teares que atamam 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. A Figura 2.5 apresenta um esquema do processo de fabricação.

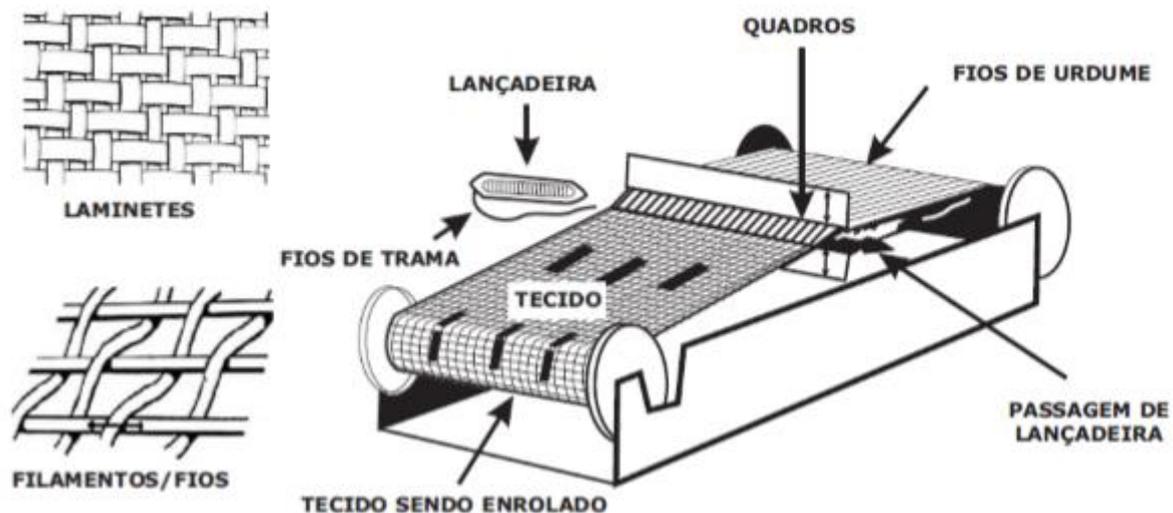


Figura 2.5. Fabricação dos geotêxteis tecidos (Vertematti, 2001).

Normalmente, para a confecção dos geotêxteis não-tecidos são utilizados dois tipos de fibras, os filamentos contínuos e as fibras cortadas, cuja diferença consiste no comprimento associado a cada um destes elementos. Os filamentos contínuos possuem grande extensão e as fibras cortadas apresentam comprimento reduzido, cerca de 25 a 100 mm (Koerner, 2005; GMA, 2002; PAVCO, 2012). As fibras são orientadas aleatoriamente no plano do geotêxtil. No processo de tecido entrelaçado os filamentos são extrudados, e colocados diretamente numa esteira em movimento para formar a manta (Basham et al., 2004), cujos fios são então ligados por processos mecânicos, químicos ou térmicos.

No processo de fabricação dos não-tecidos cabe destacar os produzidos via carda e via fundida, por serem os mais utilizados no mundo. No processo via carda, as fibras fornecidas em fardos são paralelizadas por cilindros recobertos de dentes penteadores que formam os véus, os quais são dobrados formando as mantas. Estas são consolidadas por intensa agulhagem mecânica, calandragem ou resinagem, resultando no produto final (Figura 2.6). No processo via fundida, é destacada a fiação contínua por extrusão onde os filamentos são resfriados, estirados e

depositados sobre uma esteira rolante em forma de mantas. Estes são consolidados por intensa agulhagem mecânica, calandragem ou resinagem, resultando no produto final (Vertematti, 2001). Na Figura 2.7 é apresentado o processo de fabricação com filamentos contínuos.

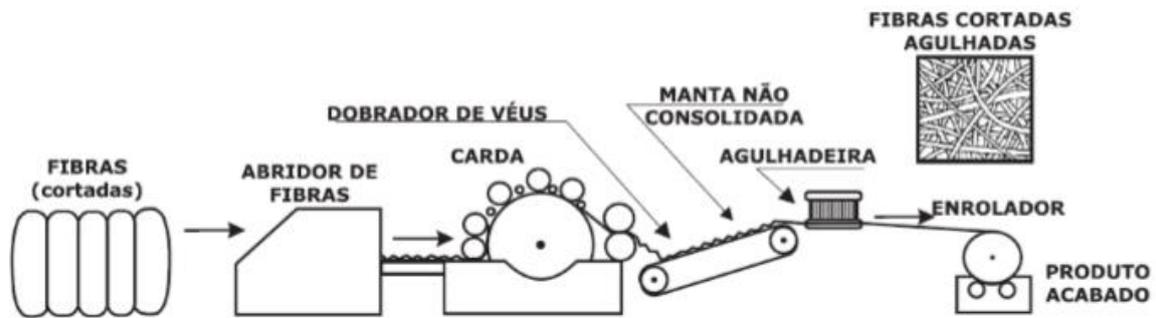


Figura 2.6. Fabricação dos geotêxteis não tecidos cardados (Vertematti, 2001).

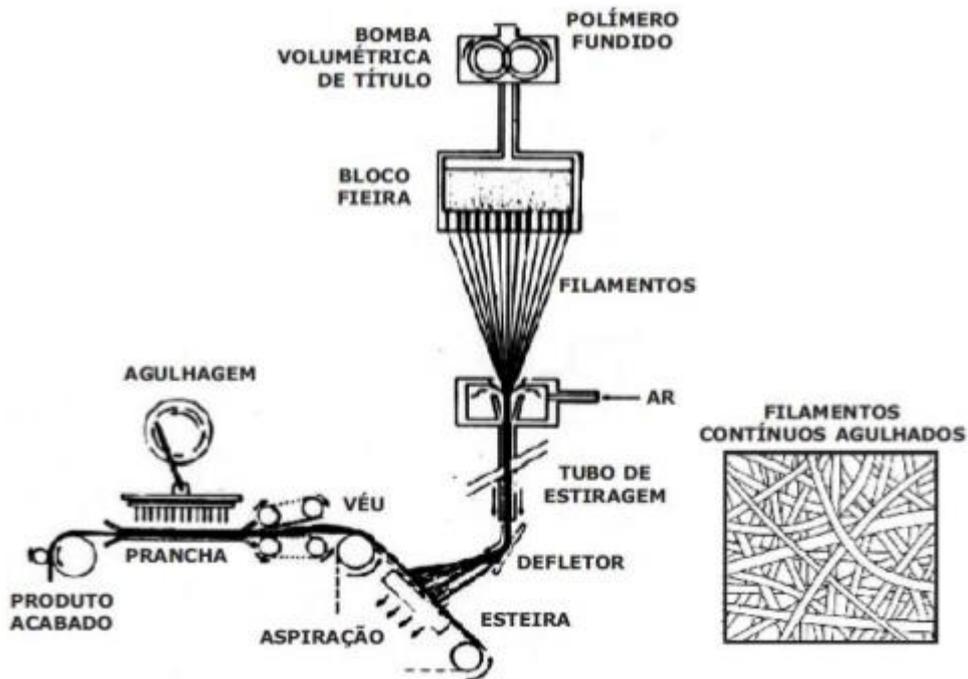


Figura 2.7. Fabricação dos geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos (Vertematti, 2001).

Os geotêxteis não tecidos apresentam uma estrutura muito mais complexa que os tecidos, possuindo a espessura como um parâmetro complementar importante. Eles, quando usados como elementos filtrantes, atuam não como uma simples interface, mas sim como um meio tridimensional, visto que a espessura passa a ser um parâmetro relevante (Muñoz, 2005). A aleatoriedade das fibras, no caso dos geotêxteis não tecidos, é o que faz mais complexa a determinação de algumas propriedades que serão estudadas mais adiante. O método de fabricação e os tipos de polímeros usados afetam as propriedades dos geotêxteis e precisam ser entendidos antes do projeto ser empreendido (Corbet, 1993). Na Tabela 2.1 são apresentadas as características filtrantes e drenantes dos geotêxteis segundo o método de fabricação e os tipos de fibras usadas (Trejos, 2016).

Tabela 2.1. Características em filtração e drenagem dos geotêxteis segundo processo de fabricação (modificado de Corbet, 1993 e Trejos, 2016).

Método de fabricação	Fibras ou tratamento	Características em filtração ou drenagem
Tecido	Laminetes	Permissividade média a alta; O EOS pode ser controlado pelo processo de tecelagem; As fibras podem se afastar mudando o EOS.
	Monofilamentos	EOS relativamente elevados; Alta permissividade; As fibras podem se afastar mudando o EOS.
	Multifilamentos	Menores tamanhos de EOS; Permissividade média; Maior resistência à perfuração.
Não Tecido	Ligação térmica	EOS pode ser variável como também a densidade das fibras no tecido; Tamanhos de EOS geralmente menores; Permissividade variável; Alguns tecidos suportam cargas hidráulicas elevadas.
	Agulhagem	EOS pode ser variável; Tamanhos de EOS menores; Susceptível à colmatação de siltes; Resistência à perfuração é boa, particularmente para tecidos mais densos.

*EOS: *equivalent opening size* (tamanho de abertura equivalente).

2.3 PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis podem trabalhar como meio de filtração e/ou de drenagem. Quando instalado entre um solo e o meio drenante, o geotêxtil tem a função de filtro. Neste caso, este elemento deve permitir a livre passagem da água e ao mesmo tempo reter as partículas de solo, o que é necessário para manter a sua estabilidade. Na função de drenagem, o geotêxtil deve possibilitar a livre passagem de fluidos através da sua espessura, no plano da manta.

Para que um filtro de geotêxtil possa reter satisfatoriamente os grãos de um solo, algumas condições são requeridas (Giroud, 1994):

- a) o solo deve estar em contato íntimo com o filtro de geotêxtil, não havendo espaço aberto entre o solo e o geotêxtil onde as partículas possam se mover ou acumular;
- b) o solo deve ter uma distribuição de tamanho de partículas contínua e estar no estado denso, o que assegura um bom embricamento entre as suas partículas;
- c) as aberturas do filtro de geotêxtil devem ser apropriadas de forma a reter as partículas de solo, assim como não ser colmatado.

A Figura 2.8 apresenta alguns exemplos de aplicações de geotêxteis em obras com a função de filtração e drenagem.



Figura 2.8. Aplicações de geotêxteis em obras de filtração e drenagem: (a) drenagem subsuperficial, (b) adensamento de solo mole, (c) barragem de terra (Gardoni, 2000).

2.3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

Para a utilização de geotêxteis em obras geotécnicas, é fundamental a sua caracterização para o reconhecimento dos seus aspectos físicos e posterior definição da sua função apropriada. Sabe-se que as propriedades mais relevantes para a aplicação de geotêxteis como dreno e/ou filtros são: i) massa por unidade de área, ii) espessura, iii) porosidade, iv) rigidez e v) arranjo estrutural dos filamentos (Silva, 2014).

A **massa por unidade de área, ou gramatura**, (M_A) é definida como sendo a massa do produto por unidade de área, comumente expressa em gramas por metro quadrado. É um dos parâmetros mais utilizados para identificação dos geotêxteis não tecidos e sua determinação encontra-se normatizada pela norma brasileira NBR 12568 (ABNT, 1992).

A **espessura** (t_{GT}) é definida como a distância, expressa em milímetros, entre duas superfícies rígidas paralelas que comprimem a amostra de geotêxtil em dois níveis de carga préestabelecidos, que são: i) sobrecarga de 2 kPa – espessura nominal; e ii) sobrecarga acima de 2 kPa – que representa tensões mais próximas às condições de campo. A determinação da espessura encontra-se normatizada pela norma americana ASTM D5199 (ASTM, 1991) e pela norma brasileira NBR 12569 (ABNT, 1992).

A **porosidade** (n_{GT}), geralmente expressa em porcentagem, é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra. É uma característica importante dos geotêxteis não tecidos, podendo ser relacionada com a espessura e a gramatura por meio da Equação 2.1 (Giroud, 1996):

$$n_{GT} = \frac{V_V}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_f} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \cdot \rho_f} \quad (2.1)$$

Onde:

n_{GT} = porosidade do geotêxtil;

V_V = volume de vazios do geotêxtil;

V = volume total do geotêxtil;

γ = peso específico total do geotêxtil;

γ_f = peso específico das fibras;

M_A = gramatura do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

ρ_f = massa específica das fibras.

Os pesos específicos de polímeros geralmente utilizados para a fabricação de geossintéticos são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Peso específico dos materiais poliméricos (modificado de Shukla, 2002).

Polímeros	Peso específico
Polipropileno	0,91
Poliéster	1,22 - 1,38
Poliamida	1,05 - 1,14
Polietileno	0,91 - 0,95

A porosidade também é influenciada pela tensão vertical (Giroud, 1996), como ilustrado na Figura 2.9.

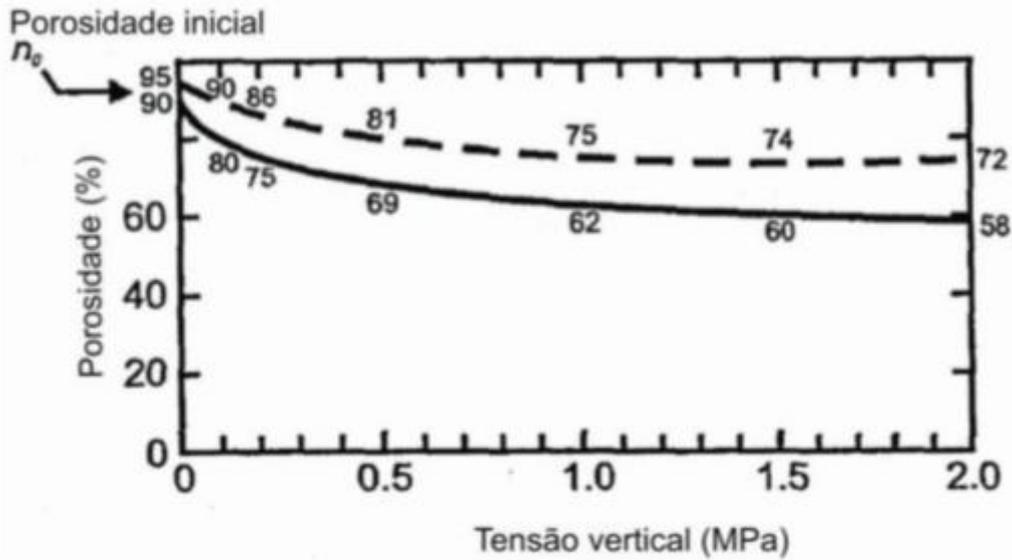


Figura 2.9. Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com a tensão vertical (modificado de Giroud, 1996 *apud* Silva, 2014).

A **rigidez**, ou flexibilidade, geralmente expressa em kN/m, do geotêxtil está relacionada à sua flexão sob seu peso próprio e indica a facilidade do mesmo em se acomodar bem à superfície de trabalho (Tatto, 2010).

O **arranjo estrutural** dos filamentos influencia o tamanho de canais de fluxo dentro do filtro e, conseqüentemente, o fluxo através do geotêxtil. Kenney et al. (1984) definem o tamanho de constrição (D_c) como sendo o diâmetro da maior esfera que passará através de uma abertura específica que, para o caso de partículas esféricas, é esquematizada na Figura 2.10.

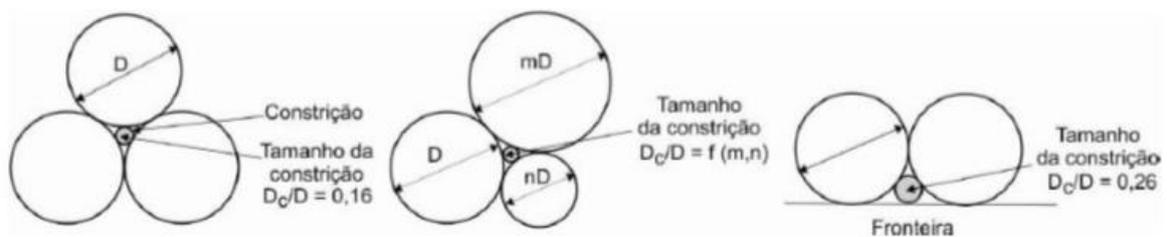


Figura 2.10. Tamanho de constrição em arranjos de esferas (modificado de Kenney et al, 1984).

O termo "constriction" foi introduzido por Kenney et al. (1984) para filtros granulares. Este

parâmetro é útil, pois ele infere uma medida quantitativa do tamanho de canais dentro do filtro e ajuda a entender o comportamento de filtração. A denominação constrição será adotada nesta dissertação, significando o tamanho do estreitamento circular.

Os estudos analíticos e experimentais realizados por Kenney et al. (1984) mostram que D_c geralmente é independente da forma da curva granulométrica do solo empregado como filtro e pode estar relacionada ao tamanho das partículas da fração fina. Desta forma, o conhecimento da D_c é extremamente útil para o projeto de filtros. As partículas de solo podem ficar retidas nos canais de fluxo quando D_c for menor que o diâmetro da partícula carregada pelo fluido. Particularmente, no caso de geotêxteis não tecidos, esta capacidade de retenção é influenciada pela tensão vertical, como mostra a Figura 2.11.

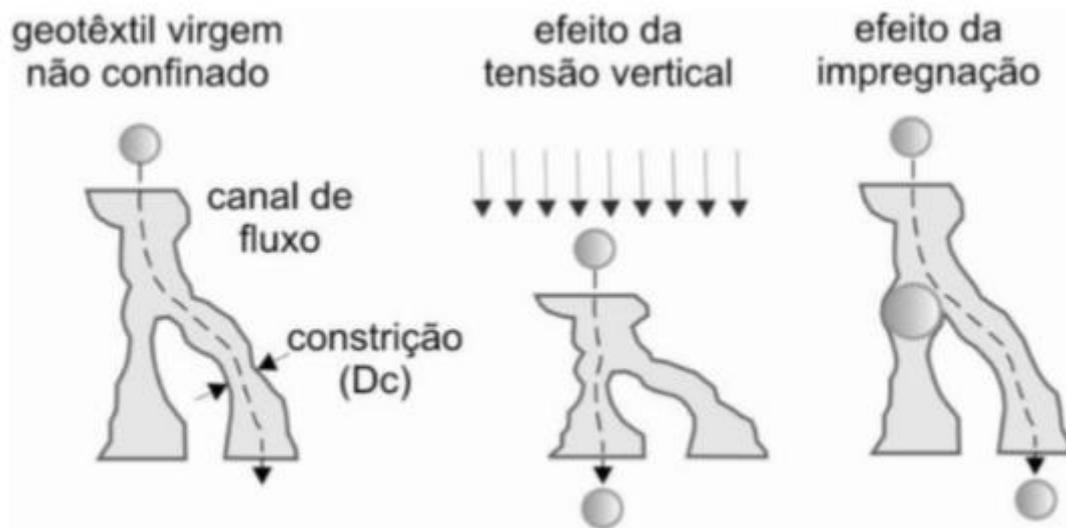


Figura 2.11. Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).

2.3.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Em todas as aplicações dos geotêxteis em obra de engenharia, tais como, estruturas hidráulicas, drenagem de rodovias ou drenagem de barragens, o geotêxtil deve satisfazer os requisitos de permeabilidade e retenção do solo. Estas propriedades, se adequadas, vão garantir a vida útil

do sistema dreno-filtrante (van Zanten, 1986).

Os ensaios hidráulicos são empregados na determinação de propriedades relevantes para a aplicação de geotêxteis com função de filtração ou drenagem. Como filtro, o geotêxtil deve permitir a passagem de fluido e reter as partículas sólidas. No caso de drenagem, ele deve conduzir a água ao longo do seu plano (Costa et al., 2008; Aguiar & Vertematti, 2004).

Para aplicações de filtração, o objetivo é determinar o coeficiente de permeabilidade (k), parâmetro que indica a facilidade de percolação do fluido, e a obtenção da abertura de filtração. Nesse último caso, determina-se o diâmetro equivalente da maior partícula que pode atravessar o geotêxtil. Em vez de se considerar o coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil (k_n), muitas vezes prefere-se trabalhar com a permissividade, que representa a relação entre k_n e a espessura do geotêxtil. Para aplicações de drenagem, o objetivo é determinar o coeficiente de permeabilidade no plano (k_p) e da capacidade de descarga ao longo do plano do geotêxtil (vazão por unidade de comprimento normal ao fluxo).

2.3.2.1 PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO E PERMISSIVIDADE

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

$$v = k \cdot i \quad (2.2)$$

Onde:

v = velocidade aparente de fluxo;

k = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

i = gradiente hidráulico.

Quando o geotêxtil trabalha como elemento de filtro é necessário conhecer a sua permissividade. A permissividade é definida como a razão entre a permeabilidade normal ao

plano do geotêxtil e sua espessura:

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

Onde:

ψ = permissividade do geotêxtil;

k_n = coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

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

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

A determinação da permissividade está normatizada pela norma brasileira NBR ISO 11058 (ABNT, 2013) e pela norma americana ASTM D5493 (ASTM, 2011). O ensaio consiste em fazer passar a água através de um espécime de geotêxtil, como pode ser visto na Figura 2.12.

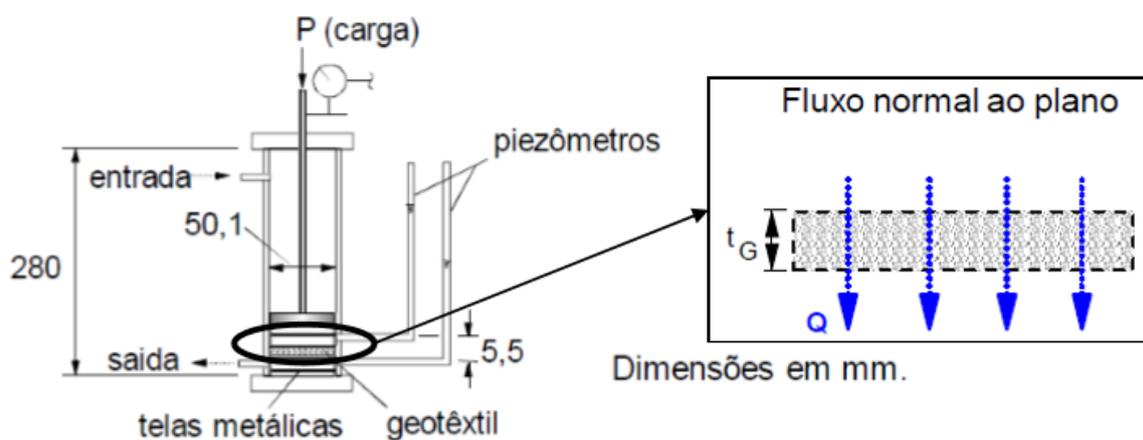


Figura 2.12. Esquema ensaio de permissividade (modificado - Palmeira, 2003).

Lafleur & Rollin (1983) analisaram o comportamento da permissividade variando a gramatura, tamanho de fibras e o tipo de material do geotêxtil não tecido agulhado e os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.13, mostrando a redução da permissividade com o aumento da gramatura do produto.

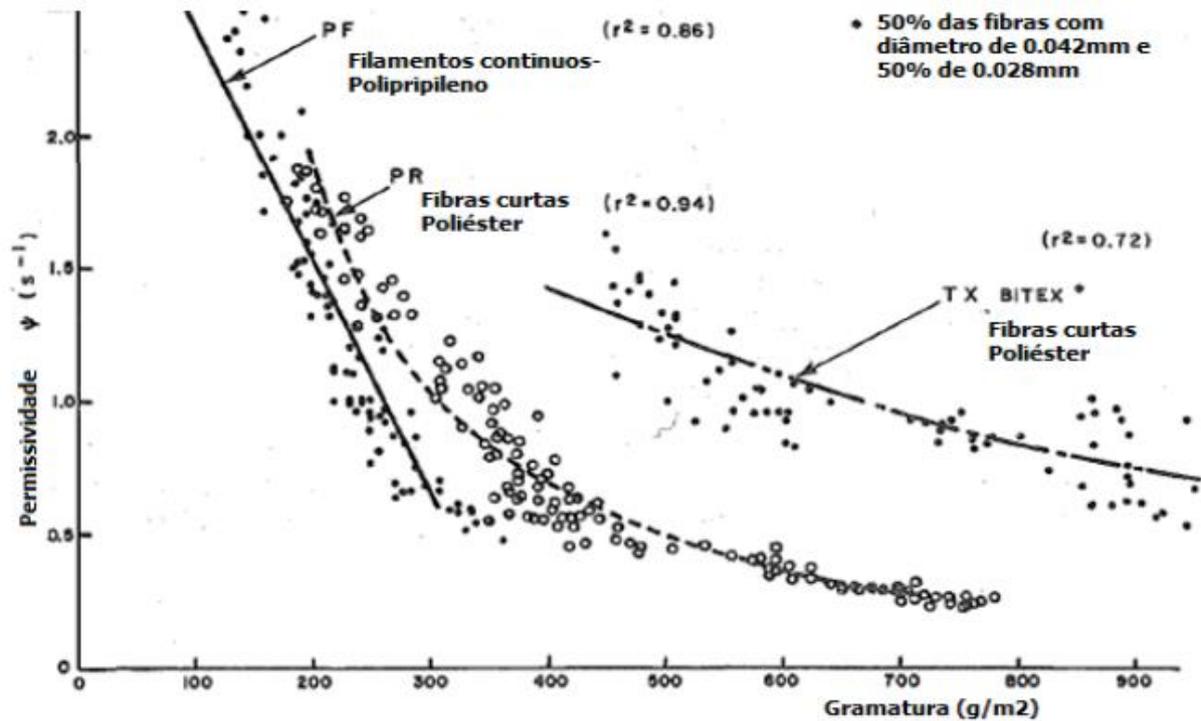


Figura 2.13. Resultados Experimentais- Ensaio de permeabilidade em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado - Lafleur & Rollin, 1983).

2.3.2.2 PERMEABILIDADE TRANSVERSAL E TRANSMISSIVIDADE

Quando há interesse na consideração de drenagem através do geotêxtil é necessário conhecer a sua transmissividade. Esta propriedade é definida pela norma NBR ISO 12958 (ABNT, 2013) e pela norma americana ASTM D4716 (ASTM, 2014) como o produto entre a permeabilidade ao longo do plano do geotêxtil e a sua espessura.

$$\theta = k_p \times t_{GT} \quad (2.4)$$

Onde:

θ = transmissividade;

k_p = coeficiente de permeabilidade ao longo do plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

A determinação da transmissividade é normatizada pela norma NBR ISO 12958 (ABNT, 2013) e pela norma americana ASTM D4716 (2014). O ensaio está esquematizado na Figura 2.14.

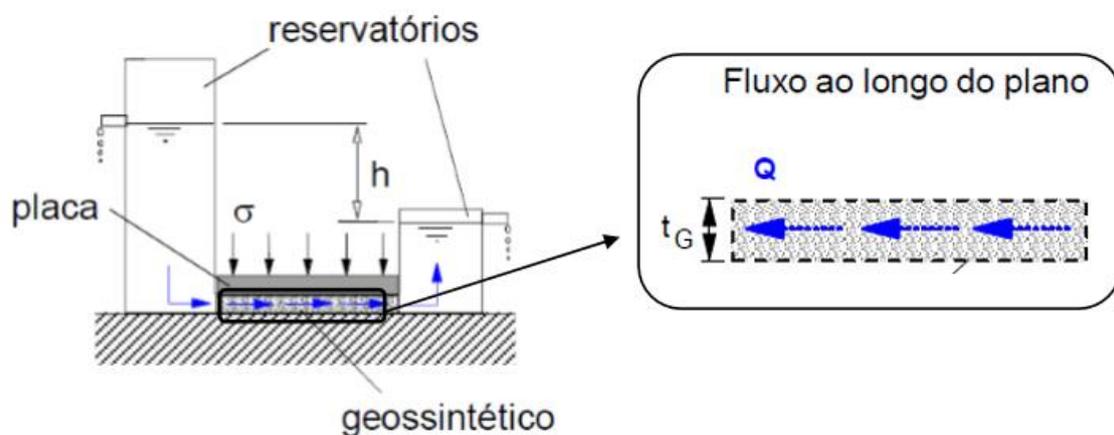


Figura 2.14. Esquema ensaio de transmissividade (modificado - Palmeira & Gardoni, 2002).

Gardoni & Palmeira (1998) e Gardoni & Palmeira (1999) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade em geotêxteis em função da tensão de compressão e da gramatura. Campbell & Wu (1994) e Giroud et al. (2000) chegaram a conclusões semelhantes em estudos de transmissividade de geotêxteis tecidos, não-tecidos e georredes.

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

1- A compactação pode causar a quebra de algumas partículas de solo o que pode alterar a distribuição de tamanho de partículas, com repercussão nos critérios de filtro;

2- Altas tensões de compressão geralmente não afetam os filtros granulares, mas os geotêxteis não tecidos são muito compressíveis, o que acarreta os seguintes efeitos: (a) como o geotêxtil não tecido comprime, sua abertura de filtração decresce; (b) a transmissividade hidráulica decresce com o decréscimo da espessura e (c) em um geocomposto para drenagem, a cobertura de geotêxtil não tecido pode penetrar nos vazios da georrede ou geoespaçador interno, diminuindo a capacidade drenante do geocomposto.

Em relação ao item 2b de Giroud (1996), Gardoni (2000) encontrou resultados contraditórios à afirmação quando o geotêxtil foi submetido a tensões de compressão até 800 kPa. Para estes casos, a transmissividade aumentou com o decréscimo da espessura.

2.3.2.3 ABERTURA DE FILTRAÇÃO

O valor da abertura de filtração (O_f) do geotêxtil é usualmente assumido como o valor do maior grão que passou pelo geotêxtil em ensaios de abertura de filtração (Holtz *et al.*, 1998; Messias da Silva, 2014) e está associada às dimensões dos poros e constrições no geotêxtil (IGS, 2000). Ele é tomado como O_{98} , O_{95} ou O_{90} em diferentes partes do mundo e dependendo do método utilizado para sua obtenção (Palmeira *et al.*, 1996). Um valor comumente utilizado para a abertura de filtração é o O_{95} , que é o diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passando.

Do ponto de vista prático, a abertura de filtração (O_f) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante para definir o potencial de filtração, sendo o mais utilizado para o dimensionamento de filtros de geotêxteis (Rigo *et al.*, 1990; Muñoz, 2005; Messias da Silva, 2014).

Atualmente, vários métodos têm sido desenvolvidos para a medição da abertura de filtração dos geotêxteis. Os ensaios de peneiramento, são divididos em três tipos: peneiramento seco, peneiramento úmido e peneiramento hidrodinâmico.

O peneiramento seco é realizado com microesferas de vidro, de tamanhos conhecidos, ou partículas de areia de quartzo calibradas, em condição seca, através de uma tela feita do espécime de geotêxtil, numa armação de peneira, por um período de tempo constante, geralmente 10 minutos. O peneiramento úmido consiste no peneiramento por vibração

enquanto a água é jogada sobre as esferas ou partículas de areia. O peneiramento hidrodinâmico é realizado com partículas de areia ou esferas de vidro que são depositadas sobre o espécime de geotêxtil, contido em um recipiente, e o conjunto é submetido ao fluxo alternado de água pela imersão e emersão repetidas e um tanque (Trejos, 2016).

Os métodos da capilaridade e da análise de imagens são métodos indiretos, pois requerem cálculos para derivar os tamanhos de abertura de filtração a partir das medidas efetuadas.

O método da análise de imagens foi desenvolvido por Rollin *et al.* (1977) e nele o espaço dos poros do geotêxtil é preenchido por uma resina transparente e se emprega um analisador de imagens que permite a visualização dos poros e a obtenção de medidas em seções transversais do geotêxtil (Trejos, 2016). A intrusão de mercúrio fornece a distribuição de poros baseado no volume total de poros, mas não dá nenhuma informação sobre o número de poros ou tamanho de constrições do geotêxtil (Bhatia *et al.*, 1996).

O método *de Bubble Point Test* (BBP) é baseado no princípio do fluxo capilar, no qual o material poroso somente permitirá a passagem do líquido quando a tensão aplicada exceder a atração capilar do líquido no maior poro. O ensaio fornece a distribuição completa dos tamanhos das aberturas, o que facilita o emprego de critérios para projetos dos filtros (Elton & Hayes, 2007).

2.3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são importantes em diversas aplicações de geotêxteis, sendo que as mais relevantes são a compressibilidade e resistência à tração. A compressibilidade é a medida do decréscimo da espessura com a variação da tensão vertical, sendo muito importante para os geotêxteis não tecidos, pois tem influência direta nas suas propriedades hidráulicas. A resistência à tração de um geotêxtil é expressa em termos de carga máxima de tração suportada pelo geotêxtil por unidade de comprimento carregado. A rigidez à tração do geotêxtil é a relação entre uma dada carga de tração aplicada e a respectiva deformação (Silva, 2014).

2.3.3.1 CRITÉRIO DE RETENÇÃO

O critério de retenção visa garantir que as partículas do solo base não atravessarão o filtro em quantidade que possa desestabilizar o maciço.

Normalmente, o critério de retenção é apresentado como uma relação entre o diâmetro característico da partícula de solo e do tamanho de abertura de filtração do geotêxtil. O valor da abertura de filtração do geotêxtil é usualmente assumido como o diâmetro do maior grão que é capaz de passar pelo geotêxtil em ensaios de abertura de filtração. A Tabela 2.3 apresenta alguns critérios de retenção presentes na literatura.

Tabela 2.3. Critérios de retenção para geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000b).

Fonte	Critério	Aplicação
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 1,5$ $O_{50}/D_{85} \leq 1,8 - 7,0$ $O_{50}/D_{50} \leq 0,8 - 2,0$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, dependendo do C_u do solo.
Canadian Geotechnical Society – CGS (1992)	$O_f/D_{85} \leq 1,5$ $O_f/D_{85} \leq 3,0$	Solos uniformes; Solos amplamente graduados.
UK DTP – Murray and McGown (1992), a partir de Corbet (1993)	$O_{90}/D_{90} = 1,0$ a $3,0$ $O_{90}/D_{90} \leq 1,0$ a $3,0$ $O_{90}/D_{50} \leq 1,8$ a $6,0$	Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos; Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2$ mm) – critério alternativo; Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos espessos ($t_{GT} > 2$ mm) – critério alternativo.

Fonte	Critério	Aplicação
Fannin <i>et al.</i> (1994) – UBC	$O_f/D_{85} < 1,5$ e $O_f/D_{50} < 1,8$ $O_f/D_{85} < 0,2$; $O_f/D_{50} < 2,0$; $O_f/D_{50f} < 2,5$ e $O_f/D_{15} < 4,0$	Não tecidos, $1 < Cu < 2$; Não tecidos, $3 < Cu < 7$.
Bhatia and Huang (1995)	$O_{95}/D_{85} < 0,65 - 0,05 Cc$ $O_{95}/D_{85} < 2,71 - 0,36 Cc$ $O_{95} < D_{85}$	$n_{GT} < 60\%$ e $Cc > 7$; $n_{GT} < 60\%$ e $Cc < 7$; $n_{GT} < 60\%$.
Lafleur (1999)	$O_f/D_I < 1,0$ $1,0 < O_f/D_I < 5,0$	Solos estáveis ($Cu \leq 6$ e $D_I = D_{85}$ neste caso), solos com $Cu > 6$ mas linearmente graduados ($D_I = D_{50}$, neste caso), mal graduado ($Cu > 6$) solos internamente estáveis ($D_I = D_G$) e solos com $Cu > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e intermanente estáveis ($D_I = D_{30}$); Solos instáveis: $D_I = D_{30}$ para solo mal graduado internamente instável com curva granulométrica côncava para cima (risco de migração de finos). Critério desenvolvido para solos sem coesão.

Notas: O_f = abertura de filtração obtida em peneiramento hidrodinâmico; D_I = diâmetro de partícula indicativo do solo de base protegido; D_G = tamanho mínimo do solo; Cu = coeficiente de não uniformidade do solo = D_{60}/D_{10} ; t_{GT} = espessura do geotêxtil; Cc = coeficiente de curvatura do solo = $(D_{30})^2/(D_{60}D_{10})$; D_{50f} = 50% das partículas do solo possuem diâmetro D inferior ao valor de O_f do geotêxtil; n_{GT} = porosidade do geotêxtil. Legenda modificada de Bessa da Luz (2004).

Quando as condições acima são satisfeitas e houver um fluxo d'água, algumas poucas partículas, que não se encontram consolidadas na matriz do solo, se movem em direção ao filtro geotêxtil e mesmo que não passem através dele não poderão causar nenhum dano ao mesmo. Se as condições acima não forem satisfeitas, as partículas de solo que se deslocam devido ao fluxo d'água, se não passarem através do geotêxtil, podem causar as seguintes situações: i) cegamento, ii) bloqueamento ou iii) colmatação física (Silva, 2014).

A Figura 2.15a representa o cegamento, onde somente uma camada de solo bloqueia superficialmente a passagem de fluido pelo geotêxtil. Este é um fenômeno particularmente relevante e comum em solos internamente instáveis e que são sujeitos ao fenômeno de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo), que será abordado adiante. No bloqueamento, esquematizado na Figura 2.15b, o geotêxtil pode perder consideravelmente a sua permeabilidade devido ao fechamento dos vazios superficiais por partículas de solo retidas. Na colmatação física, Figura 2.15c, as partículas de solo ficam impregnadas dentro do geotêxtil. A descrição detalhada destes processos pode ser encontrada em Spada (1992).

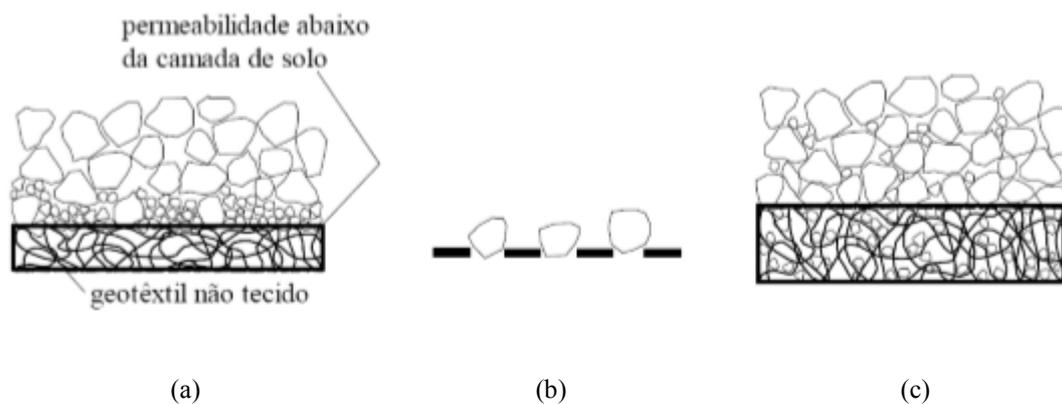


Figura 2.15. Mecanismos de colmatação em filtros geotêxteis (a) cegamento, (b) bloqueamento e (c) colmatação física (Palmeira & Gardoni, 2000b).

Segundo Aguiar & Vertematti (2004), é muito importante verificar a capacidade de estabilidade interna do solo em estudo. CHEN *et al.* (1981), propõe o seguinte critério:

$$D_{50s} > \frac{D_{85s}}{5}; D_{35s} > \frac{D_{50s}}{5}; D_{15s} > \frac{D_{35s}}{5} \quad (2.5)$$

Onde:

D_{85s} é o diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passando;

D_{50s} é o diâmetro das partículas de solo correspondente a 50% passando;

D_{35s} é o diâmetro das partículas de solo correspondente a 35% passando;

D_{15s} é o diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passando.

Segundo Giroud (1994), a continuidade da curva de distribuição de tamanho de grãos é necessária, mas não suficiente para assegurar a estabilidade interna de um solo não coesivo. Portanto, é essencial distinguir entre solos internamente estáveis e internamente instáveis, para a definição do projeto de filtro.

Para que um solo não coesivo apresente uma estrutura interna estável, não basta seguir critérios simples que comparam tamanho dos grãos do solo à abertura de filtração do geotêxtil. Segundo Giroud (2005), esta é uma condição necessária, mas não suficiente para assegurar a estabilidade interna do solo.

A força de percolação pode provocar a instabilidade da estrutura do solo de base dependendo da sua distribuição granulométrica, originando o fenômeno de sufusão. De acordo com Giroud (1996), o piping é o carreamento de partículas a partir do contato do solo com o geotêxtil sob a ação da percolação de um líquido, enquanto sufusão é a migração de partículas menores de um solo internamente instável (curva granulométrica com concavidade para cima ou com patamares) através dos vazios entre partículas maiores do próprio solo, como representado na Figura 2.16.

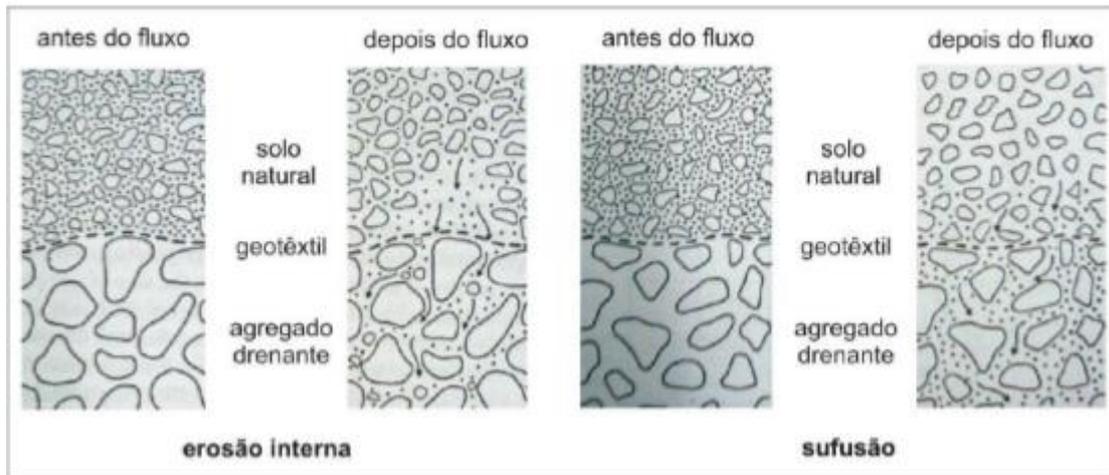


Figura 2.16. Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987 *apud* Totto, 2010).

2.3.3.2 CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade inicial do filtro deve ser maior ou igual a do solo para evitar qualquer perda de carga significativa. A maioria das mantas, devido à sua porosidade e pequena espessura, introduz uma perda de carga hidráulica pequena no sistema. Portanto, todos os critérios de permeabilidade propostos são baseados no princípio de que a manta deve ser suficiente permeável de modo a evitar o desenvolvimento de pressão d'água na interface solo-filtro e providenciar capacidade de fluxo adequada. A Tabela 2.4 apresenta alguns critérios de permeabilidade existentes.

Tabela 2.4. Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).

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

2.3.3.3 CRITÉRIO ANTICOLMATAÇÃO

O critério anticolmatação visa garantir que a maioria das aberturas sejam largas o suficiente para deixar passar as partículas pequenas através do filtro de modo a que ele não colmate (Gardoni, 1995), evitando-se, assim, o cegamento, ou aprisionamento de partículas no seu interior, o que pode comprometer o desempenho do filtro, vide Figura 2.17.

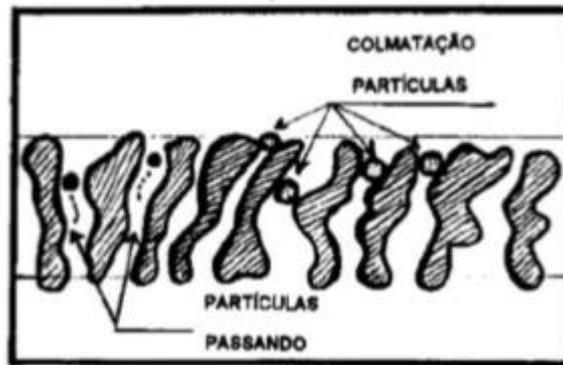


Figura 2.17. Condição de colmatação física dos geotêxteis (modificado de Hoare, 1982 *apud* Silva, 2014).

Segundo a metodologia de Christopher & Holtz (1985), para situações não-críticas e condições pouco severas, deve-se adotar:

$$O_{95} \geq 3D_{15}, \text{ para } C_u > 3. \quad (2.6)$$

Onde,

D_{15} é o diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passando;

O_{95} é a abertura de filtração característica;

C_u é o coeficiente de uniformidade do solo.

Para situações críticas e sob condições severas, aqueles autores recomendam executar ensaios de compatibilidade, tipo Razão entre Gradientes ou Condutividade Hidráulica. Estes ensaios buscam avaliar o potencial de colmatação e a capacidade de retenção de geotêxteis em contato com o solo ou a perda de permeabilidade global do sistema solo-geotêxtil.

2.3.3.4 CRITÉRIO DE DURABILIDADE

Além da condição de filtro, o geossintético deve atender um critério mínimo de durabilidade. Para isso, deve atender a critérios envolvendo resistência mecânica e de agressividade do fluido percolante ou do ambiente. Holtz et al. (1995) apresentam condições que estabelecem resistências mínimas para que o filtro geotêxtil atenda ao critério de durabilidade.

Os critérios usuais para filtros geotêxteis não consideram a influência da tensão de compressão e nem a colmatação parcial antes do início da sua vida útil devido ao espalhamento e compactação do solo sobre a manta. As atuais aplicações de geossintéticos em obras geotécnicas e de meio ambiente requerem que o produto seja, em geral, usado em situações severas, tornando-se necessária uma revisão geral dos critérios (Gardoni, 2000).

2.4 INFLUÊNCIA DAS TENSÕES E TRACIONAMENTO NAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS

Para melhor compreensão e uso dos geotêxteis, faz-se necessário definir condições que sejam ajustadas à realidade à qual o material estará submetido na obra. A seguir, é apresentado um resumo de pesquisas já realizadas que são relevantes para o tema dessa dissertação.

2.4.1 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE TENSÕES

A influência dos níveis de tensão nas características dos geotêxteis é muito relevante. Silva (2014) realizou ensaios no equipamento de ponto de bolha (método de intrusão de poros) utilizando espécimes de geotêxtil comprimidos por meio de telas metálicas. Trejos (2016) também avaliou a influência da tensão de compressão, juntamente com a influência do grau de impregnação no geotêxtil. Alguns resultados encontrados são apresentados a seguir (Figuras 2.18 e 2.19).

Os trabalhos demonstraram que o confinamento reduziu o valor das aberturas de filtração em função do grau da tensão vertical. Quanto maior a tensão de confinamento, menor é o valor da

abertura de filtração, permitindo concluir que o estudo adequado de cada caso de campo é essencial para a execução de um projeto adequado.

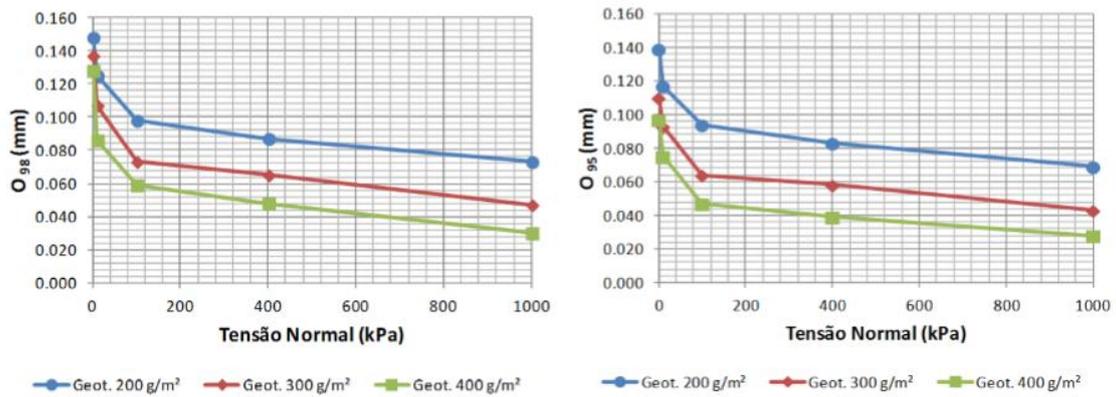


Figura 2.18. Variação da abertura de filtração (O₉₈ e O₉₅) com a tensão normal de confinamento (Silva, 2014).

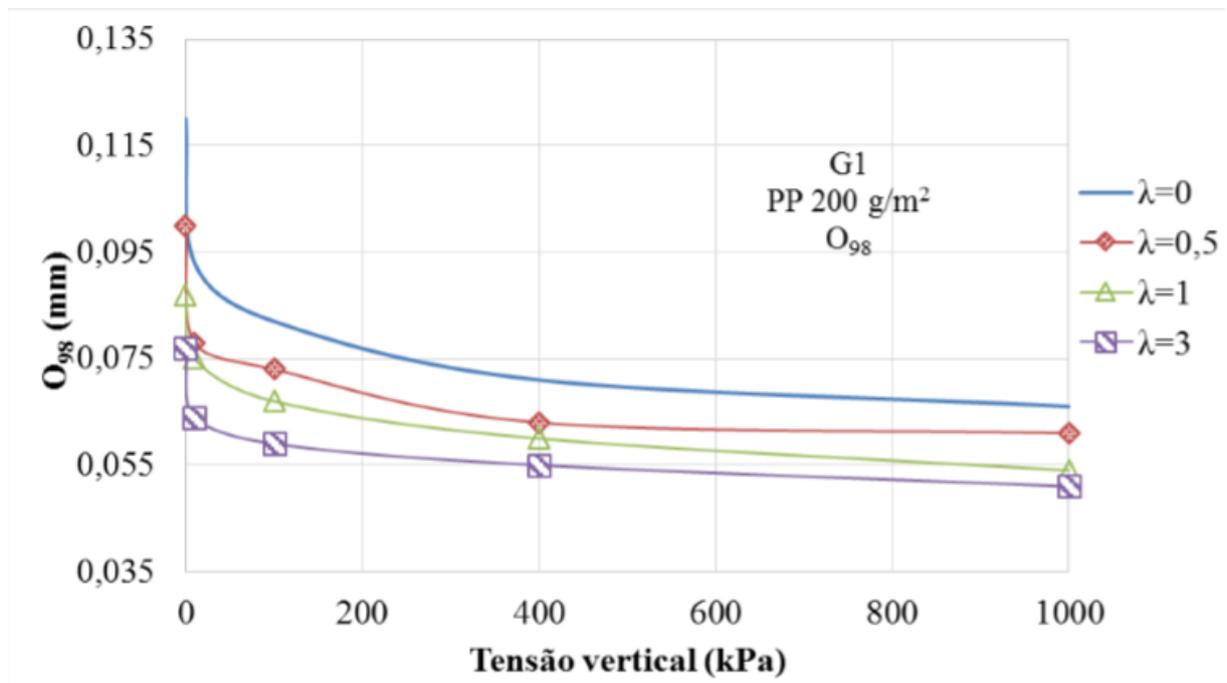


Figura 2.19. Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para geotêxtil de polipropileno de 200g/m (Trejos, 2016).

2.4.2 INFLUÊNCIA DO TRACIONAMENTO

A influência do tracionamento também é uma questão relevante. Alguns estudos já foram realizados, entretanto uma posição definitiva ainda não pode ser assumida. Wu *et al.* (2008) realizaram testes em geotêxteis aplicando cargas de tração em uma direção e observaram que o valor da abertura de filtração aumentou em função do aumento da deformação. Os ensaios foram realizados em geotêxteis tecidos e não tecidos. Os geotêxteis não tecidos possuíam a gramatura de 110 g/m (T1) e 136 g/m (T2). A Figura 2.20 apresenta os resultados para os tipos de geotêxteis estudados.

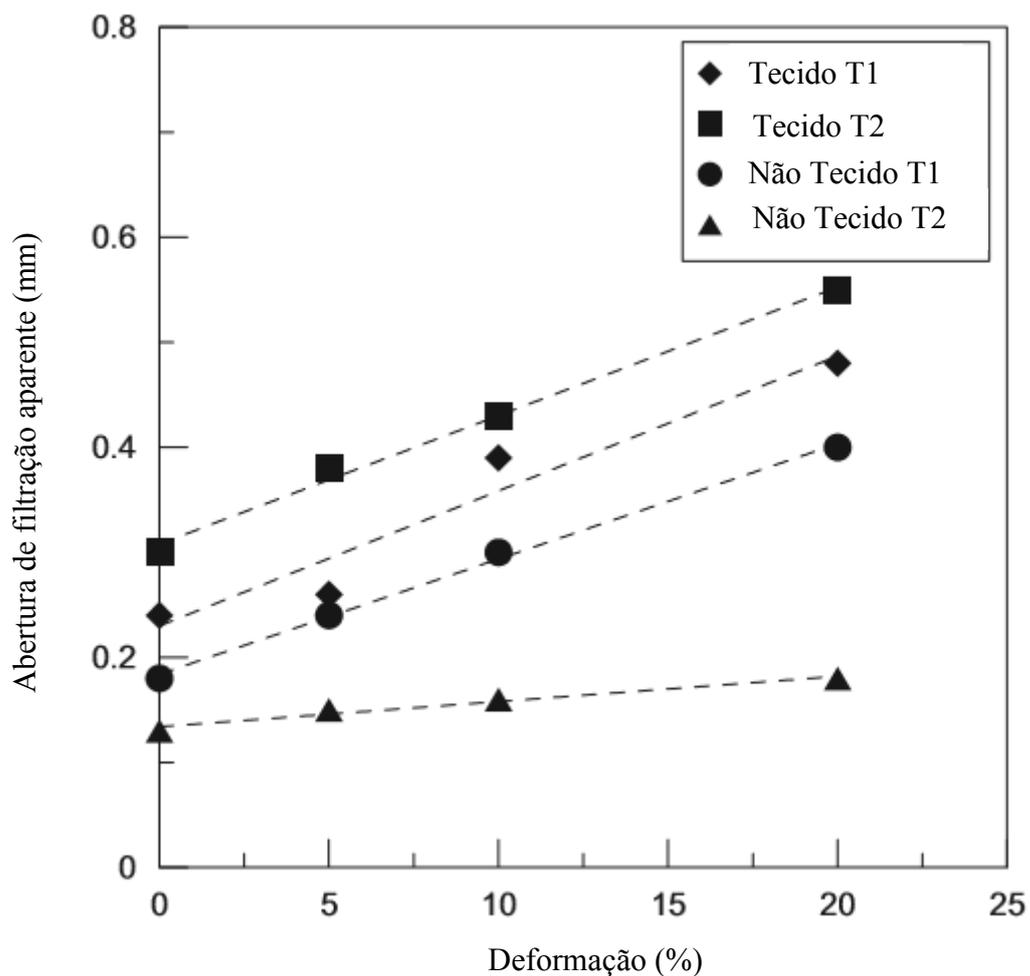


Figura 2.20. Variação na abertura de filtração aparente com a deformação (modificado de Wu *et al.*, 2008.).

Contudo, Wu & Hong (2017) estudaram a influência da tração unidirecional e bidirecional e concluram que a abertura de filtração decai com o aumento da deformação – ao contrário do observado no trabalho de Wu *et al.* (2008). Pode-se perceber também que a abertura de filtração é menor ainda nos casos em que o geotêxtil foi solicitado nas duas direções, como mostrado na Figura 2.21. Os geotêxteis ensaiados são do tipo não tecido, e possuem gramatura de 140 g/m (GT1), 184 g/m (GT2), e 263 g/m (GT3).

Ao se tratar de deformação bilateral, acredita-se que o estudo de 2017 levanta algumas dúvidas pois, tradicionalmente, ao diminuir a gramatura de um geotêxtil não tecido (consequência da deformação do material) obtém-se uma abertura de filtração maior. Os resultados deste trabalho são contraditórios a este conhecimento.

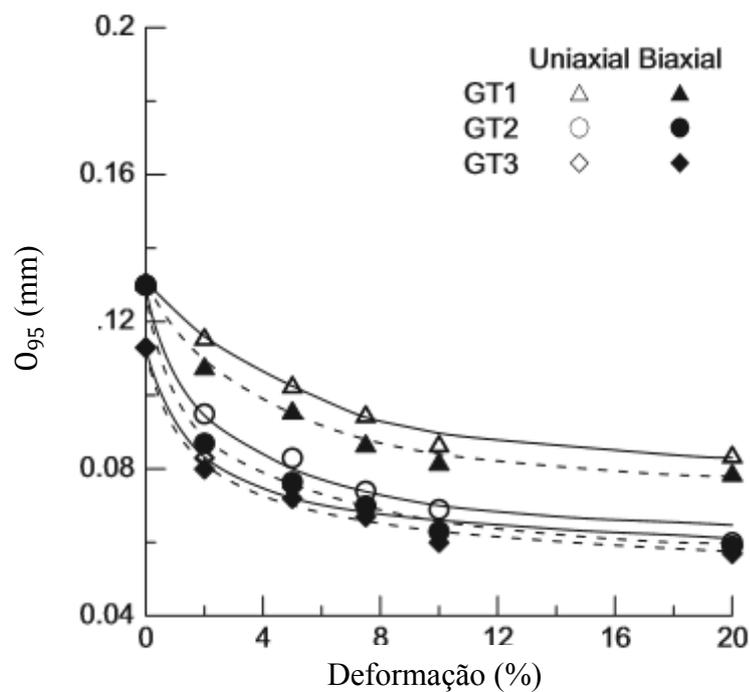


Figura 2.21. Relação entre a abertura de filtração (O_{95}) e deformação (modificado de Wu & Hong, 2017).

2.5 BUBBLE POINT TEST OU MÉTODO DO PONTO DE BOLHA

A norma americana ASTM D6767 (ASTM, 2014) padroniza o ensaio de *Bubble Point Test* (BBP), ou método do ponto de bolha, e mostra que a partir da relação inversa entre pressão exercida e a vazão que o fluido atravessa o geotêxtil é possível obter a curva de diâmetros de constrições, que são, na verdade, uma medida da abertura de filtração do geotêxtil. Esta pressão que deve ser aplicada para o fluido atravessar os poros do geotêxtil está relacionada à resistência do menisco capilar. Quanto menor a abertura, maior a pressão que deve ser aplicada, pois a força devido à tensão capilar é inversamente proporcional ao quadrado do raio da abertura.

O princípio do BBP é que há um líquido nos canais contínuos de um geotêxtil unidos por atração capilar e tensão superficial, e a pressão mínima necessária para forçar o líquido a partir dos poros é uma função dos seus diâmetros. A Figura 2.22 ilustra esse conceito.

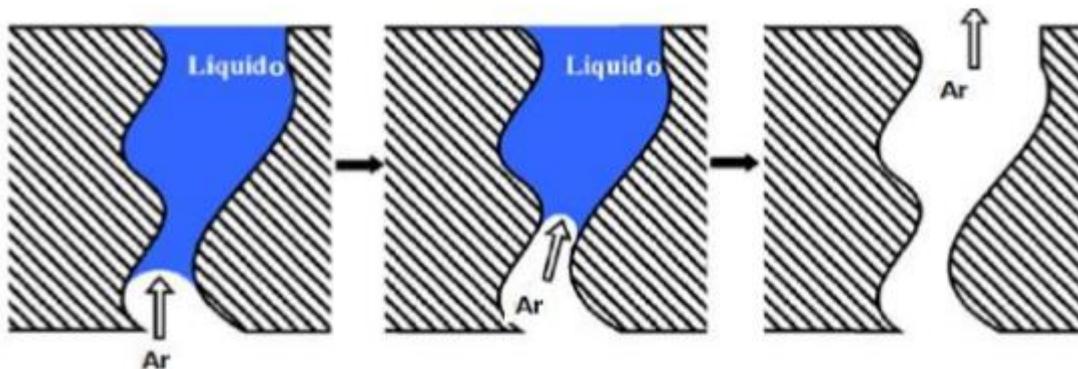


Figura 2.22. *Bubble point test* convencional (Elton & Hayes, 2007).

Dentre as diversas metodologias propostas para a determinação da curva de distribuição de poros em geotêxteis, a norma ASTM 6767 (ASTM, 2014) propõe o Método Normalizado para a Caracterização do Tamanho de Poros de Geotêxteis pelo Teste de Fluxo Capilar (*Standard Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test*), também conhecido como Teste do Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*), representado no esquema da Figura 2.23. O ensaio normalizado pela ASTM 6767 (ASTM, 2014) propõe a determinação dos tamanhos de poro de uma amostra de geossintético na margem entre 0,001 mm e 0,5 mm, sendo que a norma afirma que a acurácia do método é maior no intervalo entre 0,001 mm e 0,2 mm. O teste é realizado tanto com a amostra úmida (saturada) quanto com a amostra seca. Para fins de cálculo os poros são considerados esféricos.

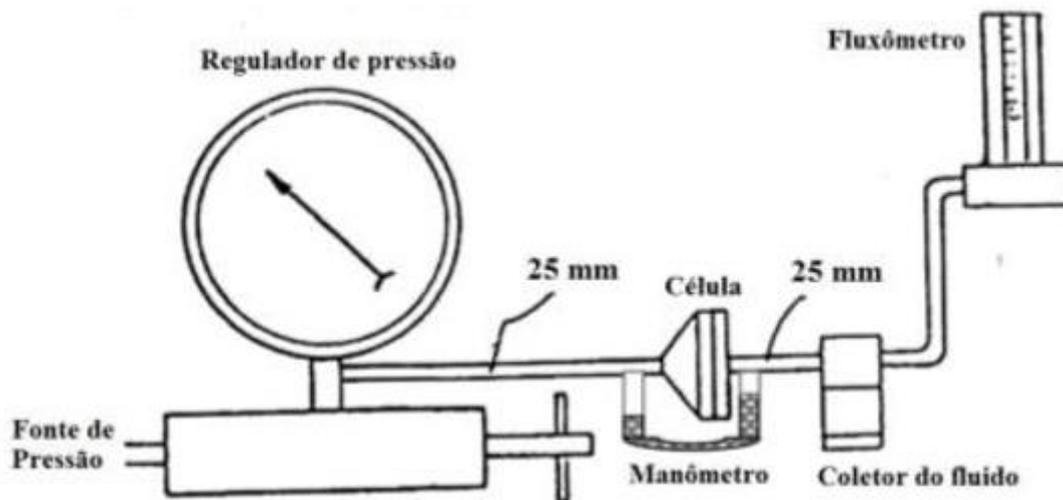


Figura 2.23. Esquema do equipamento para ensaio do Ponto de Bolha. (ASTM, 2014).

O método do ponto de bolha é baseado no princípio do fluxo capilar, que estabelece que um material poroso apenas permitirá a passagem de um líquido quando a pressão aplicada exceder a atração capilar exercida pelo poro sobre o líquido. Esse fenômeno ocorre exatamente na célula do equipamento do Ponto de Bolha, representada na Figura 2.24. No ensaio, um material poroso é saturado com um líquido. O líquido usado na saturação deve ser facilmente absorvido dentro de todos os poros do material. O ângulo de contato entre o líquido e os poros do material idealmente deve ser igual ou próximo de zero, e líquidos com baixa tensão superficial alcançam mais facilmente esta situação (Bhatia & Smith, 1996). Quando a amostra é ensaiada saturada, na aplicação da pressão de ar, os poros de maiores diâmetros tendem a ser vencidos primeiro. Isto ocorre porque a tensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro do poro.

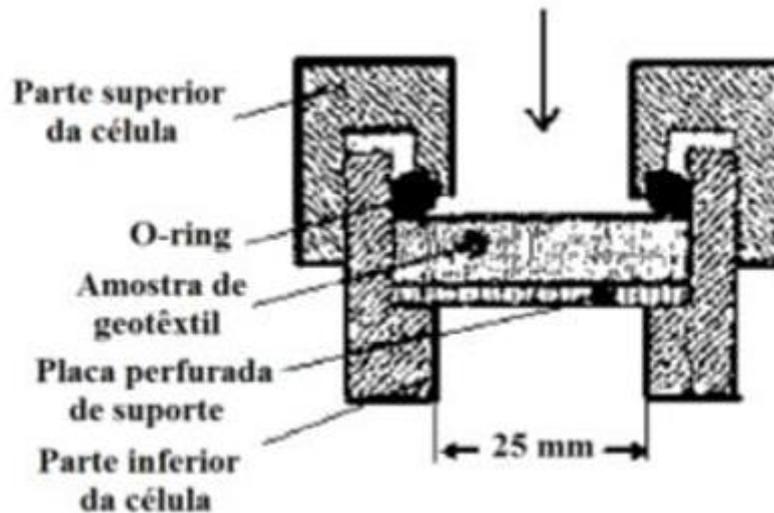


Figura 2.24. Esquema da célula para ensaio do Ponto de Bolha. (ASTM, 2014).

Em um poro, a condição de equilíbrio pode ser expressa por ASTM 6767-11(ASTM, 2014):

$$\pi \cdot d \cdot T \cdot B \cdot \cos \theta = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P \quad (2.7)$$

Onde,

d = diâmetro do poro (mm);

T = tensão superficial (mN/m ou dynes/cm);

B = constante capilar;

θ = ângulo de contato entre o líquido e o poro do material, assumido zero para líquidos com baixa tensão superficial;

P = pressão (Pa).

O lado esquerdo da Equação 2.7 é a força resistiva desenvolvida a partir da ação da tensão de superfície atuando entre o líquido e a face lateral de um poro ou constrição de diâmetro O_i . O lado direito da Equação 2.7 é a força motriz desenvolvida, a partir da pressão aplicada multiplicada pela área do poro ou constrição.

Assim, resolvendo a Equação 2.7, e reescrevendo-a para determinar o tamanho do poro, encontra-se:

$$d = \frac{4.T.B.\cos\theta}{P} \quad (2.8)$$

Onde,

d = diâmetro do poro para a pressão P;

T = tensão superficial do líquido de molhagem (mN/m ou dynes/cm);

B = constante capilar, igual a 0.715, conforme a norma ASTM D 6767 (ASTM, 2014);

θ = ângulo de contato entre o líquido e o poro do material;

P = pressão (Pa).

Para $\theta = 0$, a Equação 2.8 pode ser reescrita como:

$$d = \frac{4.B.T}{P} \quad (2.9)$$

Substituindo fatores de conversão de pressão e a constante capilar, a norma ASTM D 6767-11 (ASTM, 2014) propõe a equação:

$$d = \frac{2860.T}{P} \quad (2.10)$$

Onde,

d = diâmetro do poro para a pressão P (mm);

T = tensão superficial do líquido de molhagem (mN/m ou dynes/cm);

P = pressão (Pa).

Comparando a Equação 2.9 com a Equação 2.10, tem-se $4B=2860$, logo $B=715$. Convertendo as unidades da Equação 2.10 para o Sistema Internacional, tem-se que $B=0.715$, valor que será usado na Equação 2.9 para o cálculo do diâmetro equivalente em cada nível de pressão. Caso a água seja utilizada como líquido de saturação, o valor da sua tensão superficial (T) é adotado como 72 mN/m (0,072 N/m), considerando a amostra ensaiada em temperatura ambiente de 25 °C (Kaye & Laby, 1973 apud Fredlund & Rahardjo, 1993).

A Equação 2.9 relaciona o diâmetro relativo do poro ou constrição para cada valor de pressão utilizado no ensaio. Como se observa, pressões maiores resultam em um valor de poro equivalente menor. O ensaio de ponto de bolha pode ser estendido para medir a completa distribuição de poros de um material pelo acréscimo continuado da pressão aplicada sobre a amostra permitindo, progressivamente, que poros cada vez menores sejam vencidos.

A curva de distribuição de poros é obtida comparando o fluxo de ar através da amostra nas condições saturada e seca para o mesmo tamanho de poro. A partir da aplicação de uma pressão na amostra de geotêxtil, é medida a quantidade de ar que passa pela amostra em cada incremento de pressão com a utilização de um fluxômetro. O gráfico de pressão versus fluxo de ar é traçado tanto para a amostra úmida (iniciando o ensaio com a amostra saturada) quanto para a amostra na condição seca. Os valores são plotados em uma escala semi-logarítmica, com o valor da pressão aplicada em escala logarítmica (eixo das abscissas) e o valor do fluxo de ar em escala normal (eixo das ordenadas). A Figura 2.25 mostra um exemplo das curvas úmida e seca resultantes de um ensaio de ponto de bolha.

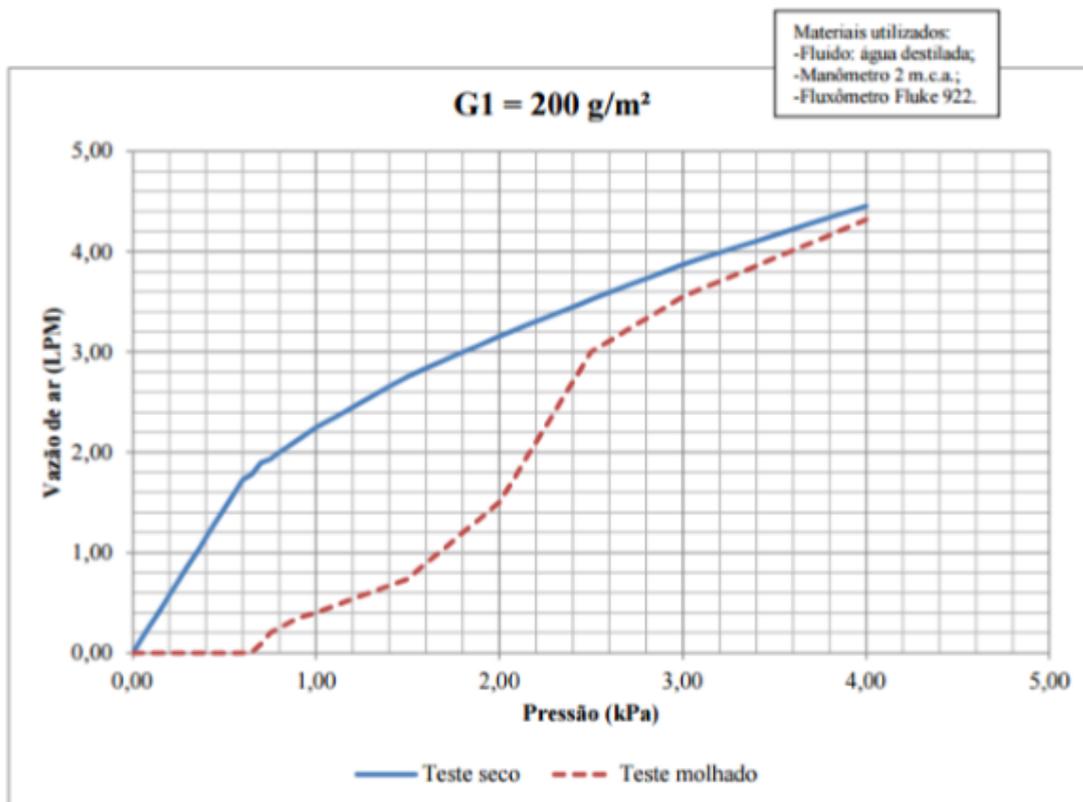


Figura 2.25. Curvas obtidas em ensaios de ponto de bolha (Silva, 2014).

As medidas obtidas pelo gráfico de pressão versus fluxo de ar, obtidas após o ensaio de ponto de bolha, são utilizadas para traçar a curva de distribuição de tamanho de poros da amostra. A equação a seguir é utilizada para calcular a porcentagem de ocorrência de cada diâmetro equivalente de poros, a partir das leituras de fluxo de ar através das amostras seca e inicialmente saturada:

$$\% \text{ Menor que } D = 100 \left(1 - \frac{Q_{\text{wet}}}{Q_{\text{dry}}} \right) \quad (2.11)$$

Onde,

% Menor que D = porcentagem de ocorrência de poros menores que determinado diâmetro D;

Q_{wet} = fluxo de ar que passa através da amostra no teste úmido na mesma pressão (L/min);

Q_{dry} = fluxo de ar que passa através da amostra no teste seco na mesma pressão (L/min).

A Figura 2.26 ilustra um exemplo de curva de distribuição de poros obtida após aplicação das Equações 2.9 e 2.11 para cada valor de pressão.

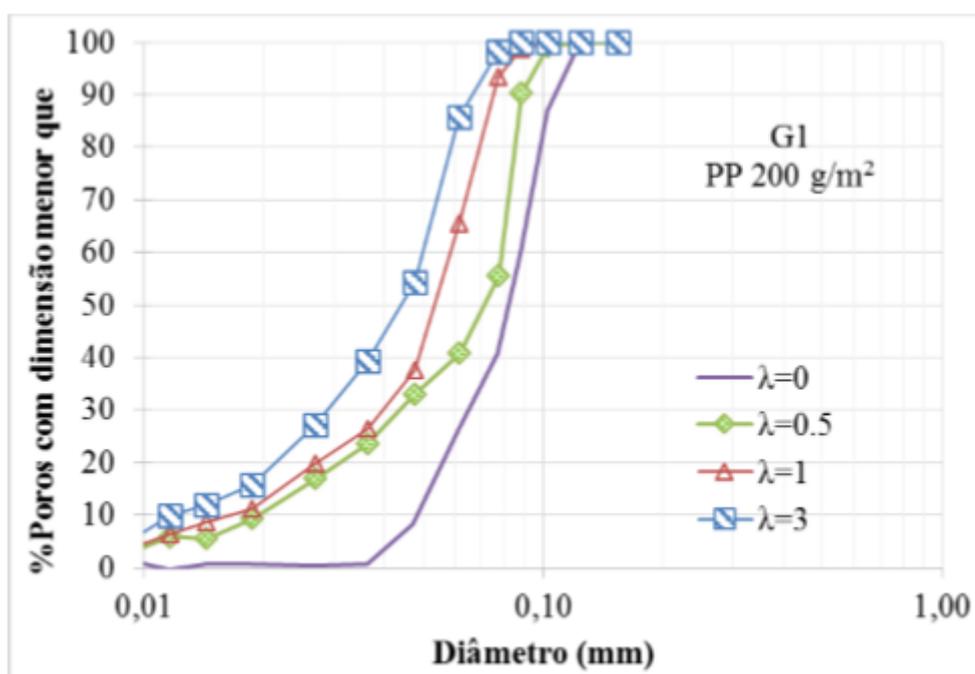


Figura 2.26. Curva de distribuição de poros do geotêxtil de polipropileno com gramatura de 200 g/m e diferentes níveis de impregnação (λ) por microesferas de vidro (Trejos, 2016).

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Esta seção aborda os materiais utilizados nos ensaios e descreve os equipamentos utilizados durante a execução deste trabalho.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 GEOTÊXTEIS

Para a execução dos ensaios de ponto de bolha foram utilizados três tipos de geotêxteis de poliéster, não tecidos, agulhados, de filamentos contínuos, com gramaturas de 200, 300 e 600 g/m . A Tabela 3.1 apresenta suas principais características.

Tabela 3.1. Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados.

Nome	Geotêxtil	Material	M_A (g/m)	t_{GT} (mm)	O_{95} (mm)	K_n (cm/s)	Ψ (s ⁻¹)
G1	OP-20	PET	200	2,9	0,130	0,22	0,76
G2	OP-30	PET	300	3,3	0,110	0,22	0,63
G3	OP-60	PET	600	4,0	0,080	0,22	0,51

Notas: M_A = massa por unidade de área (gramatura), t_{GT} = espessura nominal (ABNT NBR 12569), O_{95} = abertura de filtração, K_n = permeabilidade normal ao plano, Ψ = permissividade. Valores de M_A , O_{95} , K_n , Ψ são dados fornecidos pelos fabricantes.

Os geotêxteis não tecidos já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e foram utilizados em estudos anteriores por Tatto (2010), Silva (2014) e Trejos (2016). A Figura 3.1 apresenta o detalhamento da agulha utilizada no processo de consolidação da manta de geotêxtil por meio da técnica de agulhagem (needlepunched) e o detalhe da aleatoriedade dos filamentos (Tatto, 2010 *apud* Silva, 2014). Nos geotêxteis ensaiados, os furos do processo de agulhagem são aparentes, o que pode influenciar diretamente na abertura de

filtração.

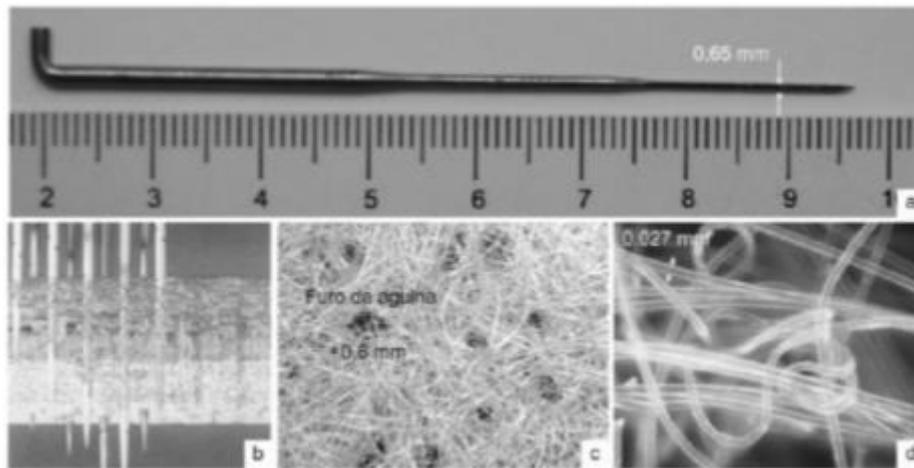


Figura 3.1. Detalhe do geotêxtil: a) agulha utilizada no processo de consolidação, b) processo de consolidação (Hsuan & Koerner, 2002), c) furos das agulhas, d) aleatoriedade da disposição dos filamentos contínuos do geotêxtil não tecido, obtidos com o microscópio de alta resolução (Tatto, 2010 *apud* Silva, 2014).

3.1.2 MICROESFERAS DE VIDRO

Nos ensaios de abertura de filtração por peneiramento foram utilizadas microesferas de vidro com diâmetros variando entre 60 μm e 150 μm com o intuito de simular um solo de gradação uniforme (Figura 3.2). As microesferas de vidro já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e foram utilizadas em estudos anteriores de Tatto (2010). As microesferas são provenientes da empresa Potters Industrial Ltda, e a Figura 3.3 e a Tabela 3.2 apresentam as suas principais características granulométricas.

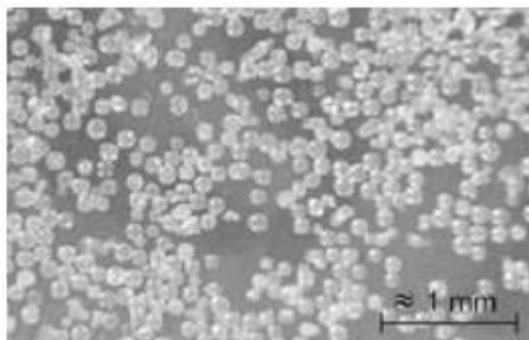


Figura 3.2. Detalhe das microesferas de vidro (Tatto, 2010).

Tabela 3.2. Características granulométricas das microesferas de vidro (Tatto, 2010).

D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₅₀ (mm)	D₆₀ (mm)	D₉₅ (mm)	C_u	C_c
0,075	0,090	0,096	0,100	0,137	1,33	1,08

Notas: C_u= coeficiente de uniformidade e C_c= coeficiente de curvatura.

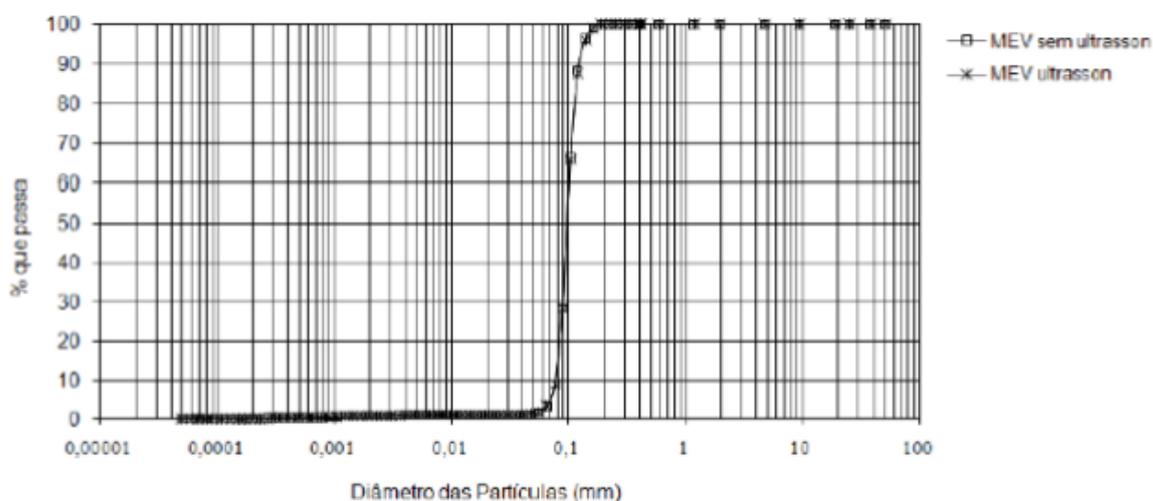


Figura 3.3. Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrassom (Tatto, 2010).

A curva granulométrica da Figura 3.3 foi obtida por Tatto (2010) por meio do equipamento granulômetro a laser, sem e com utilização de ultrassom para provocar a desagregação de possíveis grumos de partículas.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 EQUIPAMENTO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Para tracionar a amostra de geotêxtil em uma direção, foi utilizado o equipamento de ensaio de tração uniaxial existente no laboratório de Geotecnia da UnB. Este equipamento foi fabricado pela empresa EMIC, modelo Linha DL 2000 (Figura 3.4). Além das leituras fornecidas pelo equipamento, para se obterem as deformações desejadas foi também utilizada uma fita métrica adaptada ao equipamento, conforme mostra a Figura 3.5.



Figura 3.4. Equipamento de tração uniaxial EMIC, Linha DL 2000.



Figura 3.5. Detalhe da adaptação no equipamento – fita métrica para leitura dos deslocamentos desejados.

Para transportar a amostra tracionado ao equipamento do *Bubble Point Test*, mantendo-se as deformações impostas, foi fabricada uma moldura de aço, conforme mostrado na Figura 3.6.

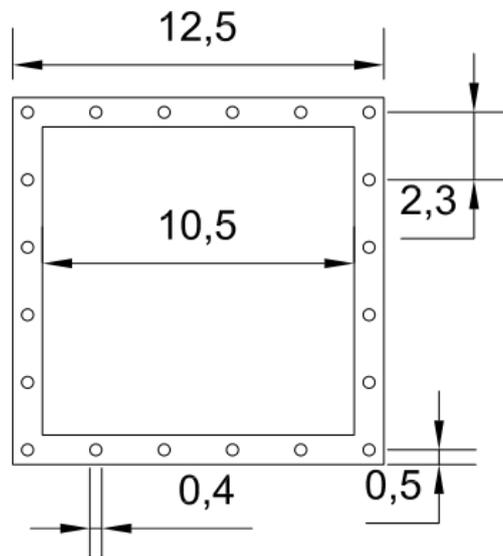


Figura 3.6. Moldura para manutenção do tracionamento.

O equipamento foi montado com perfis metálicos como elementos de reação, dois cilindros hidráulicos de dupla ação – com capacidade de 20 kN, cada – e duas células de carga conectadas ao aquisitor de dados. As células de cargas foram calibradas e conseguem realizar leituras de até 20 kN, cada.

As células de carga foram instaladas com o intuito de obter-se as medidas de força proporcionadas pelos cilindros hidráulicos e com isso as medidas de deformações desejadas – para realizar esta tarefa, as células foram previamente calibradas através de equipamento existente no laboratório do departamento de mecânica da UnB. Entretanto, neste equipamento também foram instaladas fitas métricas para facilitar a leitura das deformações e agilizar a execução dos ensaios. Assim, a presença das células tornou-se redundante, porém auxiliou na validação das leituras realizadas com as fitas e vice-versa.

A Figura 3.9 abaixo apresenta a estrutura do equipamento e seus acessórios.



Figura 3.9. (a) Estrutura (b) acessórios do equipamento de tração bidirecional.

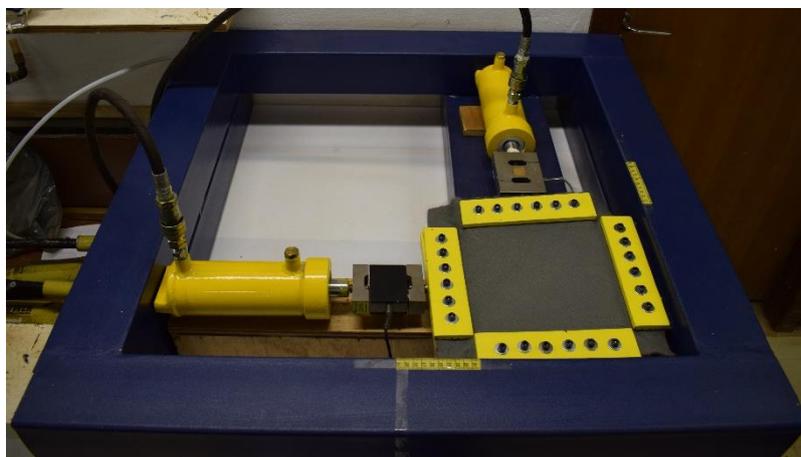


Figura 3.10. Equipamento de tração bidirecional.

3.2.3 EQUIPAMENTO DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) PARA ENSAIOS SEM CONFINAMENTO

O equipamento utilizado para ensaios sem confinamento foi o desenvolvido por Lima (2014) e utilizado nos trabalhos de Silva (2014) e Trejos (2016). A Figura 3.11 mostra a concepção do equipamento existente no laboratório de geotecnia da UnB.

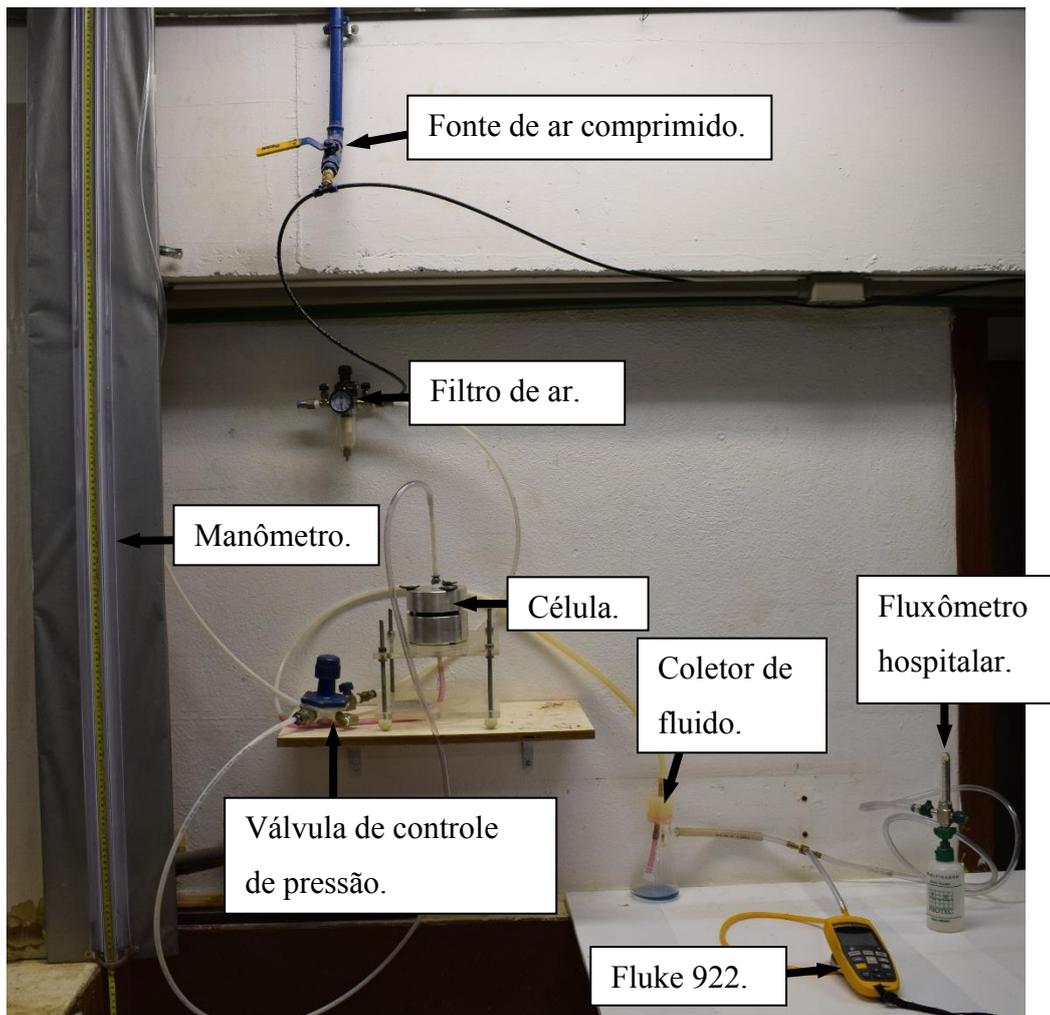


Figura 3.11. Equipamento BBP montado para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos.

A versão atual, o equipamento é composto por:

- 1) Fonte limpa de gás pressurizado, filtrado e com regulação;

- 2) Manômetro de ramo aberto em formato de “U”, utilizado como instrumento de medição de pressão;
- 3) Célula porta-amostra de geotêxtil vedada para que não haja vazamentos no suporte da célula (Figura 3.12);

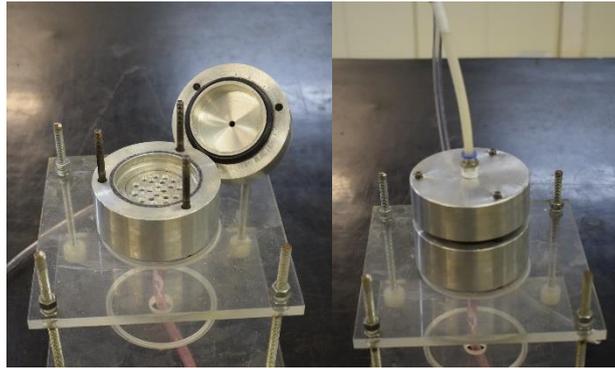


Figura 3.12. Célula de ensaio sem confinamento.

- 5) Medidores de fluxo de ar em LPM, sendo esses equipamentos o Fluke 922 e o fluxômetro hospitalar (Figura 3.13). Os dois medidores foram instalados em conjunto para validação das leituras obtidas;



(a) (b)
Figura 3.13. (a) Fluke 922 e (b) Fluxômetro hospitalar

- 6) Coletor do fluido de saturação;
- 7) Encaixes adequados, tubos e conexões para montar o aparelho;

3.2.4 EQUIPAMENTO DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) PARA ENSAIOS COM CONFINAMENTO

Para os ensaios de ponto de bolha com confinamento, a concepção dos componentes foi a mesma utilizada nos ensaios sem confinamento, com exceção da célula de ensaio e a introdução do sistema de aplicação da carga de compressão.

A célula utilizada foi baseada na célula dos ensaios sem confinamento, acrescida de um pistão central que conecta o prato interno de compressão dentro da célula com o sistema de aplicação de carga. A Figura 3.14 apresenta a célula dos ensaios com confinamento. Abaixo do prato de compressão foi inserido 5 malhas metálicas – interconectadas – com abertura de 4,2 mm para facilitar e melhorar a distribuição de ar dentro da célula.

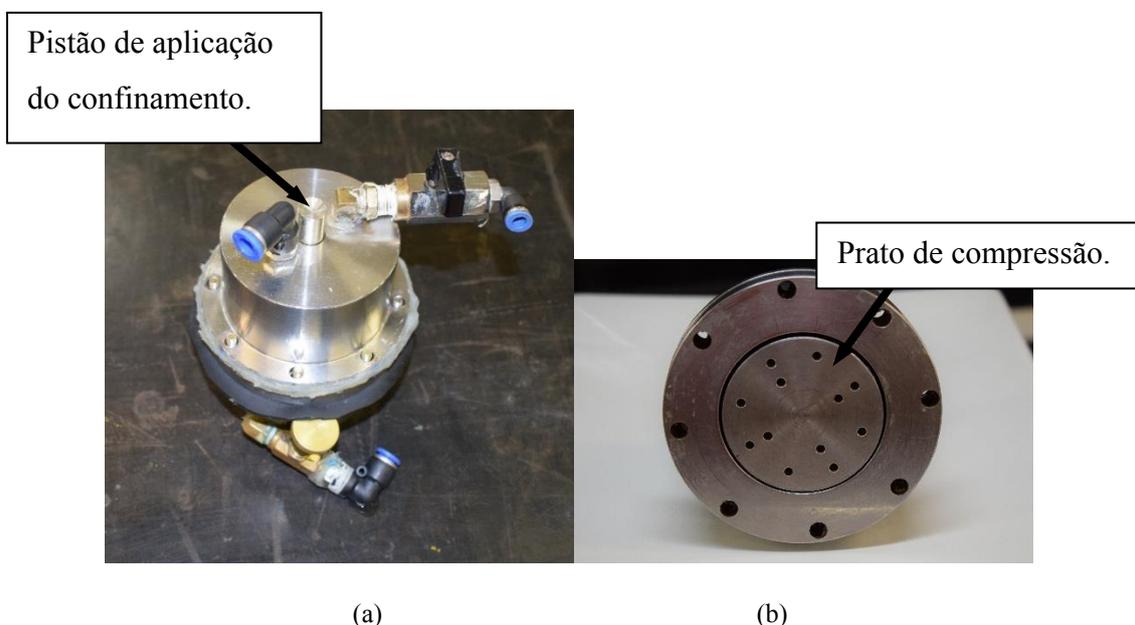


Figura 3.14. (a) Célula de ensaio de ponto de bolha com confinamento e (b) detalhe do prato de compressão.

3.2.4.1 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DE CONFINAMENTO

O sistema de aplicação de carga consiste num conjunto de acessórios – cilindro hidráulico de compressão, célula de carga e pino de aplicação de carga – interligados entre si (Figura 3.15). O cilindro é parafusado na estrutura de suporte em dois pontos. A célula de carga possui aberturas rosqueáveis em cada extremidade, o que possibilita sua conexão com o cilindro (extremidade superior) e com o pino (extremidade inferior).

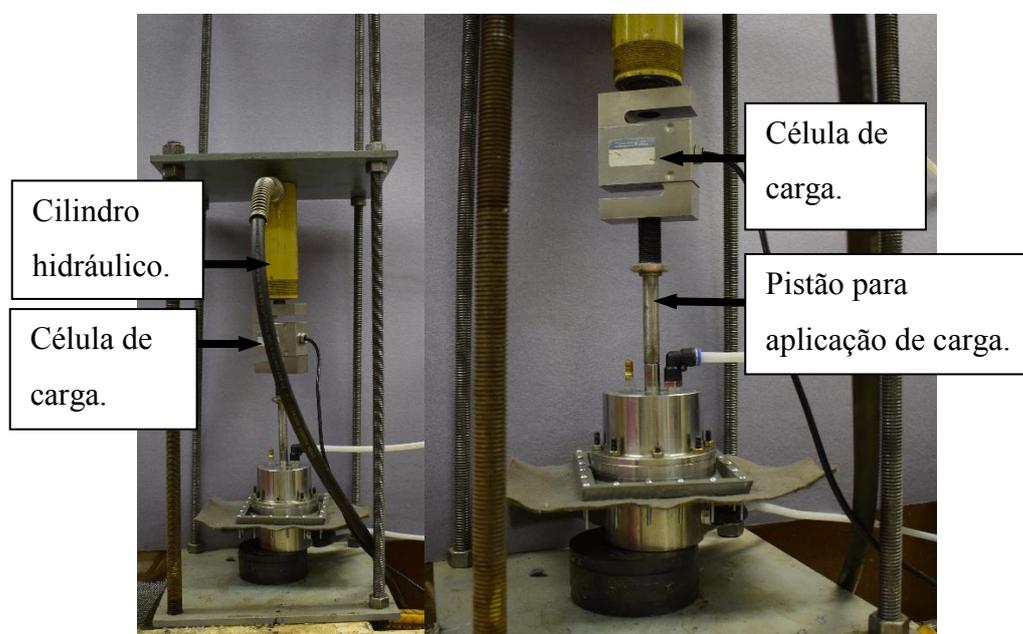


Figura 3.15. Sistema de aplicação de carga para ensaios de ponto de bolha confinados.

3.2.5 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação teve por objetivo monitorar as cargas aplicadas pelos cilindros hidráulicos. No momento da tração, pôde-se validar as deformações lidas diretamente nas régua do equipamento de tração bidirecional, e no momento do confinamento pôde-se aplicar as cargas de compressão desejadas.

3.2.5.1 CÉLULA DE CARGA

Para auxiliar o equipamento de tração foram utilizadas duas células de carga com capacidade máxima de 20 kN cada. Para medir a carga de confinamento foi utilizada também uma célula de carga com capacidade máxima de 20 kN. As células de carga utilizadas foram da marca Kratos, modelo KLS.

Antes da realização dos ensaios, as células de carga foram devidamente calibradas em uma prensa hidráulica específica para ensaios de compressão e tração, do tipo MTS 810 (*Material Test System*) com capacidade de carga máxima de 70 kN. Foram realizados incrementos de carga de 2 kN até atingir valores próximos ao limite máximo de capacidade da célula. As leituras eram registradas pelo aquisitor de dados, possibilitando a obtenção da curva de calibração do instrumento.

3.2.5.2 AQUISITOR DE DADOS

O sistema de aquisição utilizado foi o Spider-8, da empresa HBM. O sistema possui oito canais, onde cada instrumento pode ser ligado por meio de um conector de quinze pinos, com possibilidades de ligações em ponte completa, meia ponte ou um quarto de ponte. O aquisitor foi conectado ao computador que possui um *software* (Catman) que permite a configuração dos canais e leituras simultâneas em todos os canais (Figura 3.16).

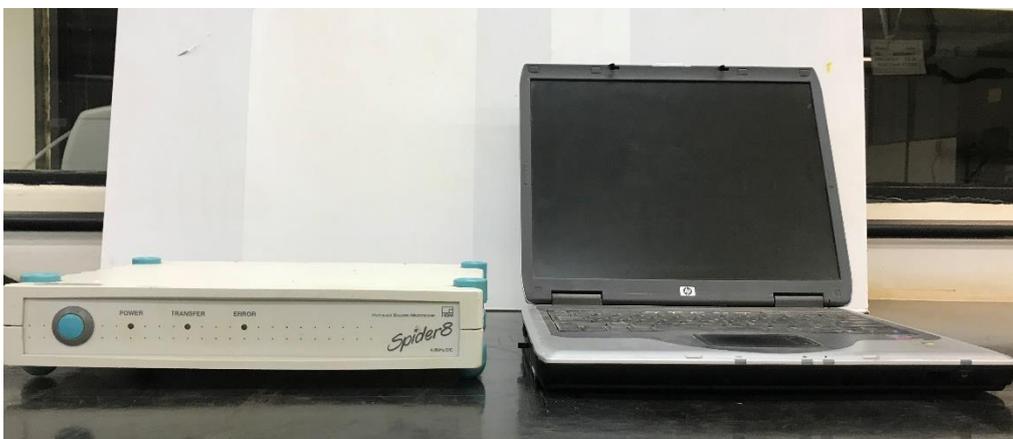


Figura 3.16. Sistema de aquisição de dados.

3.2.6 SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO MICROESFERAS DE VIDRO

Para a realização dos ensaios para determinação da abertura de filtração utilizando microesferas, foram empregadas as duas células de ensaio utilizadas anteriormente e o massageador pessoal IR- Magnet Plus da marca G-Tech (Figura 3.17). O motivo da utilização deste equipamento foi para proporcionar vibração às células de ensaios.



Figura 3.17. Massageador.

Após a utilização dos equipamentos apresentados realizou-se ensaios de granulometria de acordo com a norma NBR 7.181 (ABNT, 2016).

4. METODOLOGIA

As atuais aplicações de geossintéticos em obras geotécnicas e de meio ambiente requerem que o produto seja, em geral, usado em situações severas, tomando-se necessária a execução de experimentos mais realistas que possibilitem melhoria nos critérios de filtros geotêxteis existentes.

As Tabela 4.1 e 4.2 apresentam as combinações dos ensaios de ponto de bolha e com microesferas de vidro realizados. A metodologia empregada nos ensaios realizados nessa dissertação é apresentada neste capítulo.

Tabela 4.1. Combinação dos ensaios de ponto de bolha realizados.

Tensão (kPa)	G1							G2							G3						
	Deformação (%)							Deformação (%)							Deformação (%)						
	Virgem	1D			2D			Virgem	1D			2D			Virgem	1D			2D		
		5	10	20	5	10	20		5	10	20	5	10	20		5	10	20			
0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
400	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1000	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 4.2. Combinação dos ensaios realizados com microesferas de vidro.

Tensão (kPa)	G1						G2			G3		
	Deformação (%)						Deformação (%)			Deformação (%)		
	Natural	1D			2D		Natural	1D	2D	Natural	1D	2D
		5	10	20	5	10		5	5		5	5
0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10	X	X			X							

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ENSAIO

O procedimento de amostragem do geotêxtil não tecido visa diminuir a variabilidade e heterogeneidade usualmente presente. Os geossintéticos são tipicamente fornecidos pelas empresas em bobinas, sendo que ao longo do mesmo geotêxtil as propriedades como gramatura (MA), espessura nominal (t_{GT}), abertura de filtração (FOS), alongamento (ϵ), permeabilidade normal ao plano (K_n), permissividade (Ψ) e porosidade (n) podem variar, dependendo do processo de fabricação e qualidade do produto (Silva, 2014). Mesmo que a amostragem seja apropriada, convém assegurar a melhor representatividade possível da média obtida, pois há limites práticos para a distribuição possível de corpos-de-prova sobre o total do lote e suas unidades utilizadas em laboratório (ABNT, 2013). Assim, a amostragem para os ensaios foi feita segundo a norma NBR ISO 9862 (ABNT, 2013). O procedimento utilizado na preparação das amostras foi o adotado por Silva (2014) e Trejos (2016), com algumas adaptações para melhor atender o objetivo da dissertação, as quais são descritas a seguir:

- 1) Os rolos devem estar em ótimo estado de conservação. A amostra deve estar de preferência não dobrada. A amostra deve ser armazenada em um local seco, escuro, livre de poeira, em temperatura ambiente e protegida contra alterações químicas e físicas;
- 2) As duas primeiras voltas dos rolos devem ser descartadas para retirada da amostra, assim como áreas que apresentam irregularidades – amassadas ou rasgadas;
- 3) As amostras de geotêxtil devem ser selecionadas após a obtenção das informações relativas

ao número de espécimes, formato e demais características.

5) Os corpos-de-prova, para cada tipo de ensaio, devem ser extraídos de posições uniformemente distribuídas por toda a largura e comprimento da manta, desprezando-se os 100 mm externos de cada borda;

6) Após a seleção da área de amostragem, para cada gramatura de geotêxtil, obtém-se uma área com dimensões de 2,10m x 2,10m – para as amostras do ensaio tracionado em uma direção – e com dimensões de 2,00m x 2,00m – para amostras do ensaio tracionado em duas direções. As áreas selecionadas foram acomodadas em uma superfície plana e limpa, permanecendo neste local por 24 h. Nesta área, foram marcados 64 quadrados de 250 mm de lado ao longo do seu comprimento – para o estudo da abertura de filtração do geotêxtil tracionado em uma direção – e 36 quadrados de 300 mm de lado ao longo do seu comprimento – para o estudo da abertura de filtração do geotêxtil tracionado em duas direções. A seleção de qual amostra seria usada para cada ensaio foi feita através da função $=aleatórioentre(inferior,superior)$ no Excel;

7) Esse procedimento foi realizado a quantidade de vezes suficiente para garantir o número de amostras necessárias à finalização da pesquisa;

8) Os espécimes quadrados de 250 mm e 300 mm de lado – foram pesados para conferência de suas gramaturas. Adotou-se como critério de aceitação diferenças máximas de $\pm 10\%$ em relação à gramatura especificada pelo fabricante;

9) Os espécimes foram armazenados em local apropriado, evitando alterações em suas propriedades.

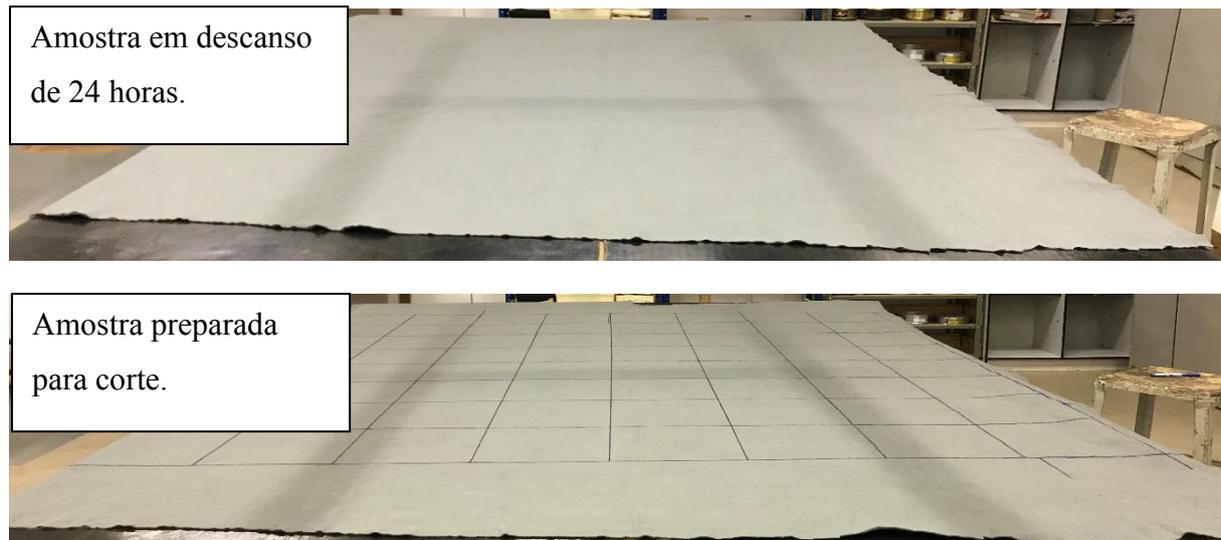


Figura 4.1. Preparação das amostras

Todas as amostras de geotêxtil foram lavadas em água destilada durante 1 h, e posteriormente secas. O espécime deve estar completamente seco antes da realização dos ensaios.

4.2 AMOSTRAS TRACIONADAS EM UMA DIREÇÃO

Para realização dos ensaios em uma direção, as amostras de 250 mm eram retiradas do local de armazenamento e alocadas no equipamento de tração uniaxial de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Ligar o equipamento e definir a deformação máxima permitida conforme manual de instrução;
- 2) Instalar os espécimes no equipamento. A distância entre as garras deve ser 150 mm para permitir o encaixe da moldura; 50 mm são alocados dentro da garra superior e 50 mm dentro da garra inferior (Figura 4.2);

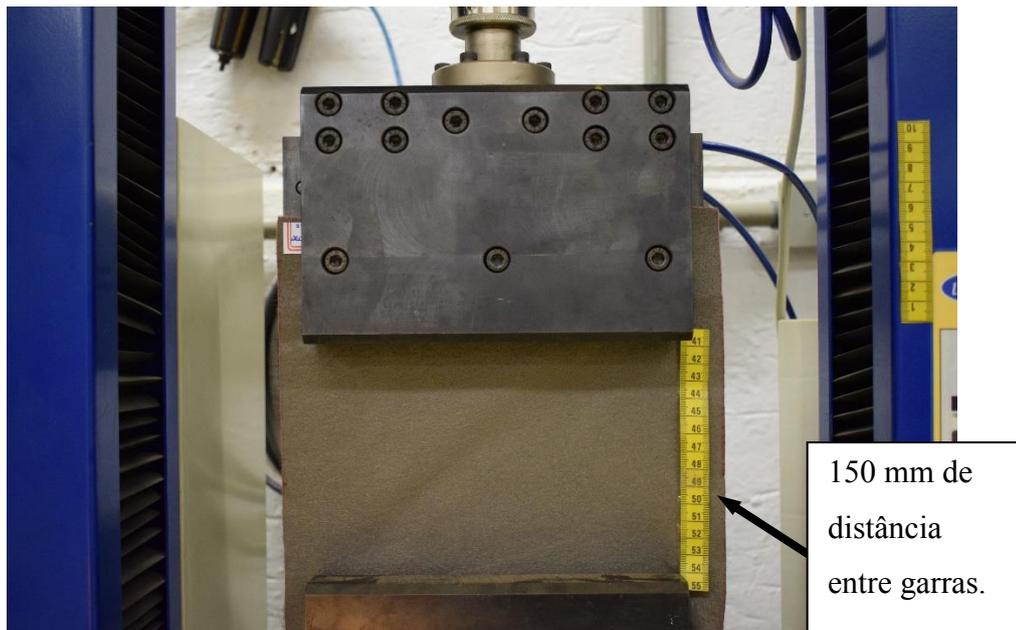


Figura 4.2. Espécime instalado no equipamento de tração uniaxial. A distância entre as garras é 150 mm.

- 3) Movimentar a garra superior até a deformação desejada – foram estudados casos de 5%, 10% e 20% de deformação. As medidas da deformação foram realizadas diretamente por meio da régua auxiliar. A velocidade utilizada foi a velocidade padrão da prensa;
- 4) Fixar a moldura, conforme Figura 4.3. Para aferir que a moldura manteria a deformação aplicada, fio traçada uma reta de tamanho conhecido sobre a manta e deixou-se a amostra travada por 20 minutos – tempo necessário para realização completa de um ensaio. Após este período mediu-se novamente o traço e verificou-se que este mantinha-se com o mesmo comprimento.



Figura 4.3. Moldura fixada para manter a deformação desejada.

5) Para os ensaios secos, a amostra – fixada na moldura – era levada diretamente à célula de ensaio (Figura 4.4). Para os ensaios saturados a amostra foi colocada em um recipiente contendo etanol durante uma hora para garantir completa saturação; posteriormente foi levada à célula de ensaio. Os ensaios úmidos foram realizados em até 15 minutos após a retirada da amostra do recipiente com etanol. Percebeu-se que ensaios realizados após este tempo não apresentaram resultados satisfatórios. O etanol foi escolhido porque entre os líquidos permitidos por norma, foi o que permitiu maior agilidade na execução dos ensaios e menor custo.

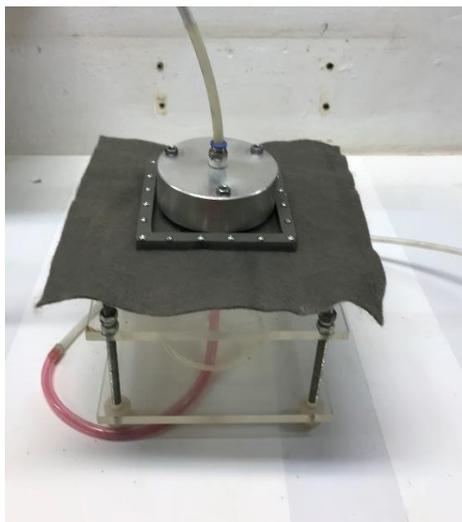


Figura 4.4. Amostra tracionada posicionada sobre a célula de ensaio.

4.3 AMOSTRAS TRACIONADAS EM DUAS DIREÇÕES

Para realização dos ensaios em duas direções, os espécimes de 300 mm eram retirados do local de armazenamento e alocadas no equipamento de tração bidirecional, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Conectar os cilindros aos macacos hidráulicos;
- 2) Ligar o sistema de aquisição de dados. As medidas da deformação foram realizadas (indiretamente) por meio do sistema de aquisição e (diretamente) pelas régua auxiliares;
- 3) Posicionar as amostras de 300 mm nas garras (Figura 4.5);

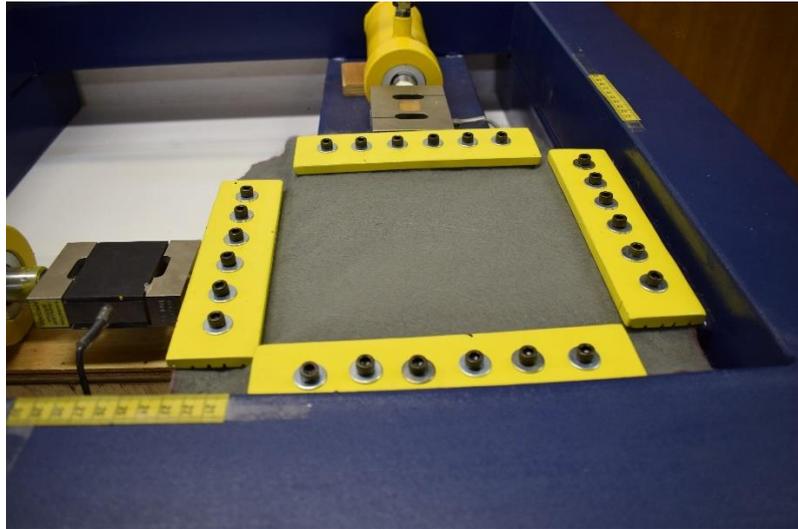


Figura 4.5. Amostra fixada no equipamento de tração bidirecional.

- 4) Fixar a moldura, seguindo modelo similar ao usado no ensaio em uma direção;
- 5) Para os ensaios secos, o espécime – fixado na moldura – foi levado diretamente à célula de ensaio. Para os ensaios saturados o espécime foi colocado em um recipiente contendo etanol durante 1 hora para garantir completa saturação; posteriormente foi levado à célula de ensaio. Os ensaios úmidos foram realizados em até 15 minutos após a retirada da amostra do recipiente com etanol.

4.4 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) SEM CONFINAMENTO

Os procedimentos seguidos nos ensaios de BBP sem confinamento foram:

- 1) Colocação do espécime de geotêxtil sobre a placa perfurada na base da célula;
- 2) Fechamento da parte superior e inferior da célula solidárias de forma a impedir qualquer vazamento de ar (ver Figura 4.4);
- 3) Verificação se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;

- 4) Aplicação de valores conhecidos de pressão gradativamente até a pressão máxima;
- 5) Coleta de dados de fluxo de ar para cada pressão conhecida – amostra seca;
- 6) Redução da pressão e remoção do espécime da célula;
- 7) Saturar completamente o geotêxtil, submergindo-o no líquido de saturação (etanol) por um período de uma hora;
- 8) Colocar o geotêxtil saturado na célula;
- 9) Fechamento da parte superior e inferior da célula solidárias de forma a impedir qualquer vazamento de ar;
- 10) Verificação se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;
- 11) Aplicação de valores conhecidos de pressão gradativamente até a pressão máxima;
- 12) Coleta de dados de fluxo de ar para cada pressão conhecida – amostra úmida;
- 13) Redução da pressão e remoção do espécime da célula.

Para a saturação das amostras foi usado etanol como líquido de saturação, cuja tensão superficial foi calculada segundo o trabalho de Perez *et al.* (2010). Baseados na literatura e ensaios de laboratório estes autores desenvolveram um modelo ajustado para o cálculo da tensão superficial do etanol em função da temperatura (entre 0 e 60 °C), resultando na seguinte equação:

$$\sigma_1 = 0,0244 * e^{-0,0046t} \quad (4.1)$$

Onde σ_1 é a tensão superficial do etanol (N/m) e t é a temperatura (°C).

Com os dados dos ensaios secos e úmidos foram plotados os gráficos, conforme orientação da norma ASTM 6767 (ASTM, 2014).

4.5 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) COM CONFINAMENTO

Os procedimentos seguidos nos ensaios de BBP com confinamento foram:

- 1) Colocação do espécime de geotêxtil sobre a placa perfurada na base da célula;
- 2) Colocação das telas metálicas (com malha espaçada de 4,2 mm) para homogeneizar o fluxo de ar dentro da célula (Figura 4.6). O cilindro hidráulico aplica o carregamento na placa de compressão, que por sua vez está encostada nas malhas metálicas. As malhas ficam em contato direto com o geotêxtil e assim o confinamento é aplicado no espécime ensaiado;

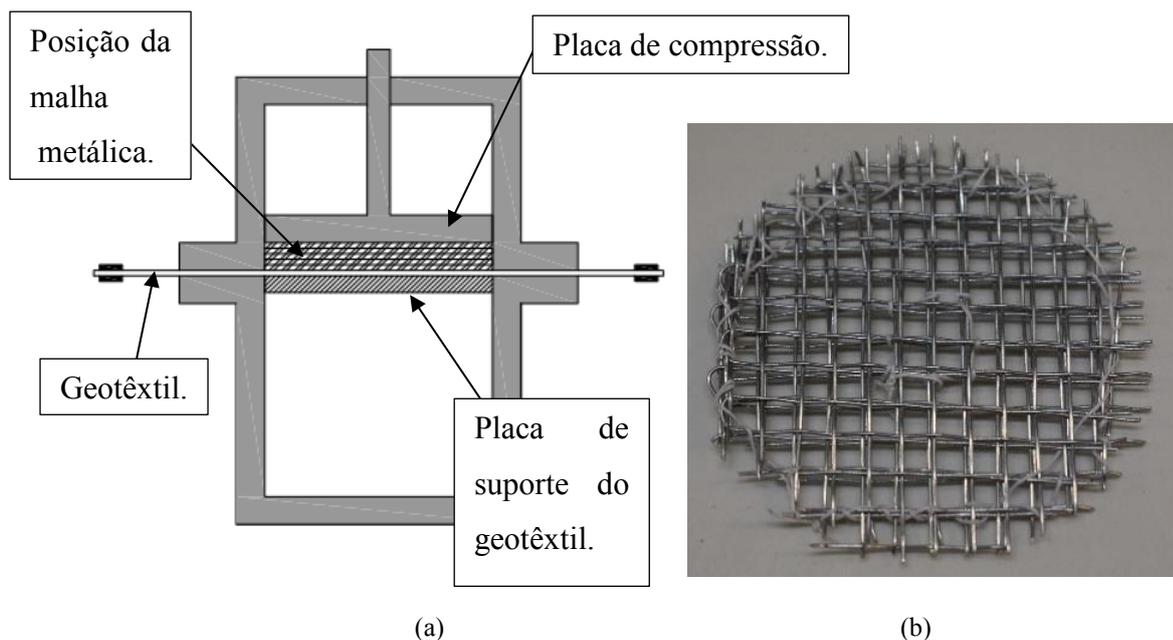


Figura 4.6. (a) Esquema de posição da malha metálica e (b) detalhe das telas metálicas.

- 3) Fechamento da parte superior e inferior da célula solidárias de forma a evitar qualquer vazamento de ar;
- 4) Acoplamento do sistema de aplicação de carga junto à célula de ensaio – ver Figura 3.14;
- 5) Verificação se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na

fita métrica;

- 6) Aplicação de valores conhecidos de pressão gradativamente até a pressão máxima;
- 7) Coleta de dados de fluxo de ar para cada pressão conhecida – amostra seca;
- 8) Redução da pressão e remoção do espécime da célula;
- 9) Saturar completamente o geotêxtil, submergindo-o no líquido de saturação (etanol) por um período de uma hora;
- 10) Colocar o geotêxtil saturado na célula;
- 11) Fechamento da parte superior e inferior da célula solidárias de forma a evitar qualquer vazamento de ar;
- 12) Verificação se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;
- 13) Aplicação de valores conhecidos de pressão gradativamente até a pressão máxima;
- 14) Coleta de dados de fluxo de ar para cada pressão conhecida – amostra úmida;
- 15) Redução da pressão e remoção do espécime da célula.

Com os dados dos ensaios secos e úmidos foram plotados os gráficos, conforme orientação da norma ASTM 6767 (ASTM, 2014).

4.6 PREPARAÇÃO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO MICROESFERAS DE VIDRO

O ensaio para determinação da abertura de filtração utilizando microesferas de vidro foi realizado com o intuito de obter uma comparação para os resultados encontrados no ensaio de ponto de bolha. As microesferas utilizadas foram as descritas no tópico 3.1.2 desta dissertação. O procedimento utilizado é descrito a seguir:

1) Colocar 30 gramas de microesferas de vidro descritas na Tabela 3.2 dentro da célula de ensaio (Figura 4.7);



Figura 4.7. Microesferas posicionadas para ensaio.

2) Fechar a célula de ensaio;

3) Aplicar a vibração (Figura 4.8) nos três pontos indicados – região próxima aos parafusos de fixação – por 5 minutos em cada ponto. No total, a amostra foi vibrada por 15 minutos. A frequência de vibração foi de aproximadamente 2500 ciclos/min – dado obtido junto ao fabricante do massagedor;

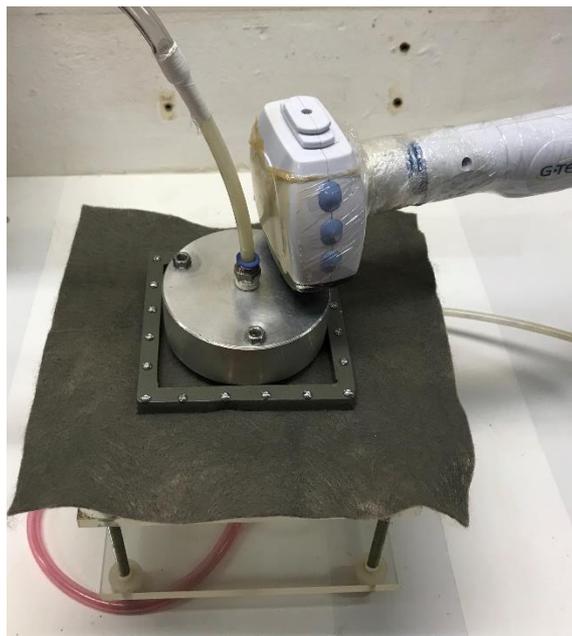


Figura 4.8. Posição de vibração da célula de ensaio.

- 4) Coletar as esferas de vidro que ficaram acima do geotêxtil;
- 5) Coletar as esferas de vidro que atravessaram o geotêxtil;
- 6) Realizar ensaio de granulometria no material passante pelo geotêxtil conforme NBR 7.181 (ASTM, 2016).

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios para determinação da curva de distribuição de poros foram realizados nas instalações do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. O equipamento foi montado considerando o procedimento previsto na norma ASTM 6767-11 (ASTM, 2014) e tendo como referência do trabalho desenvolvido por Eun & Tinum (2011), Lima (2014), Silva (2014) e Trejos (2016).

Para obter resultados confiáveis dos ensaios de ponto de bolha, foi realizada a calibração do procedimento utilizando um material de abertura conhecida – tela da peneira #170, (abertura: 0,090mm segundo a norma E 11, ASTM 2013). A calibração foi realizada nas duas células de ensaio. Os ensaios foram repetidos por três vezes (em cada célula) para aferir a acurácia.

A Figura 5.1 mostra os valores de vazão de ar obtidos através do ensaio de ponto de bolha com a peneira, e a Figura 5.2 apresenta a distribuição dos tamanhos das aberturas da tela considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha realizados na célula sem confinamento.

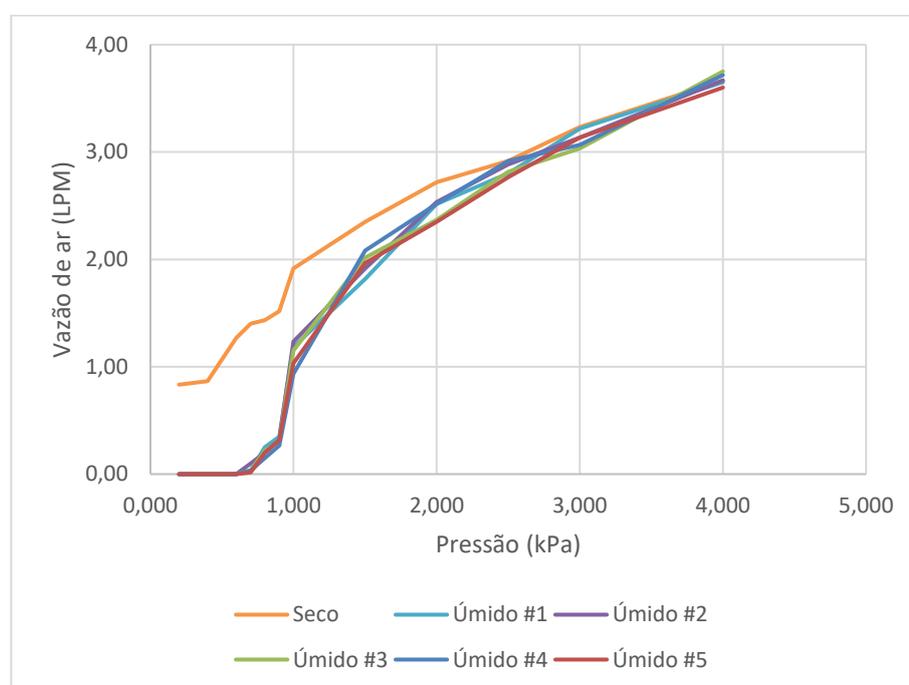


Figura 5.1. Vazão de ar versus pressão peneira #170 – célula sem confinamento.

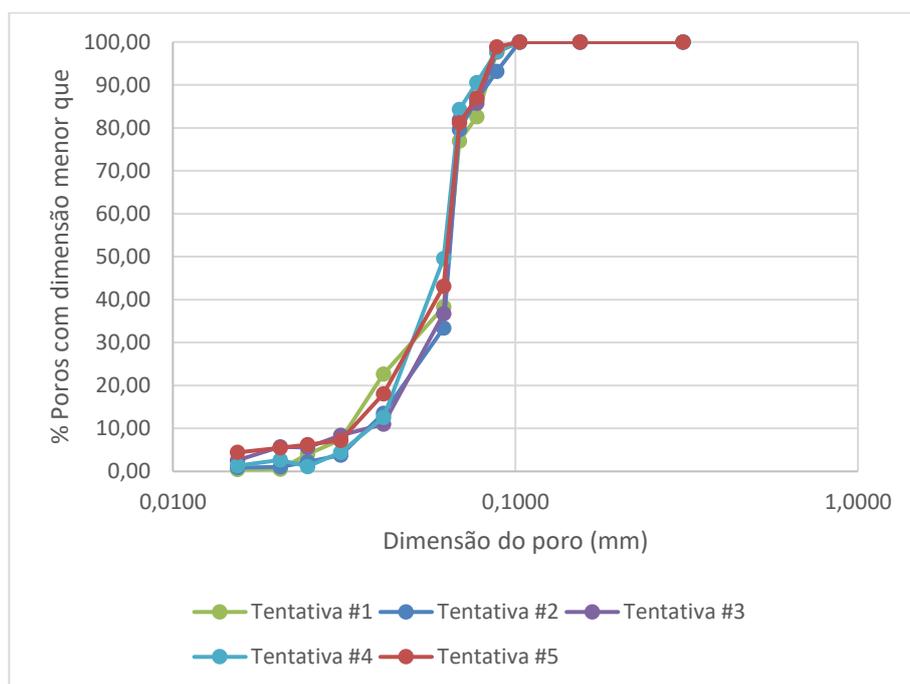


Figura 5.2. Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170 – célula sem confinamento.

Os valores das aberturas de filtração obtidas da Figura 5.2 são apresentadas na Tabela 5.1, na qual é possível observar que os ensaios apresentam resultados satisfatórios.

Tabela 5.1. Aberturas de filtração peneira #170 – célula sem confinamento.

Tentativa	O ₉₈ (mm)	O ₉₅ (mm)
1	0,091	0,086
2	0,099	0,092
3	0,090	0,086
4	0,090	0,084
5	0,087	0,085
Média	0,0912	0,0864

Portanto, pode-se considerar $O_{98} = 0,0912$ mm (média de todos os ensaios) para a peneira #170, que de acordo com a norma E11 (ASTM, 2013) deve ser $0,090\text{mm} \pm 0,032\text{mm}$. Todos os cinco resultados também estão dentro da margem de erro.

A Figura 5.3 mostra os valores de vazão de ar obtidos pelo ensaio de ponto de bolha com a peneira, e a Figura 5.4 apresenta a distribuição dos tamanhos das aberturas da tela considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha realizados na célula com confinamento.

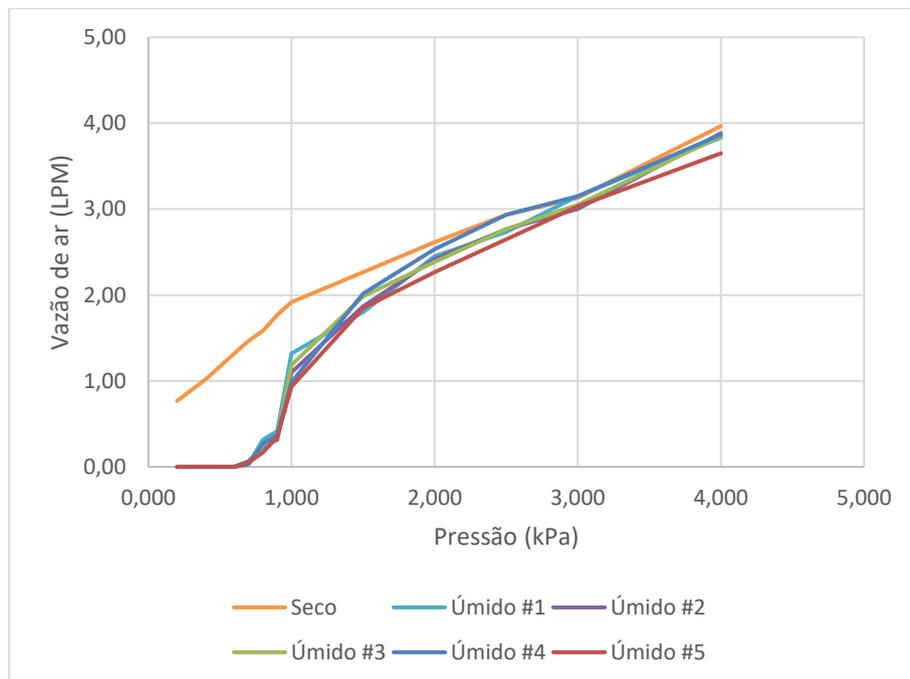


Figura 5.3. Vazão de ar versus pressão peneira #170 – célula com confinamento.

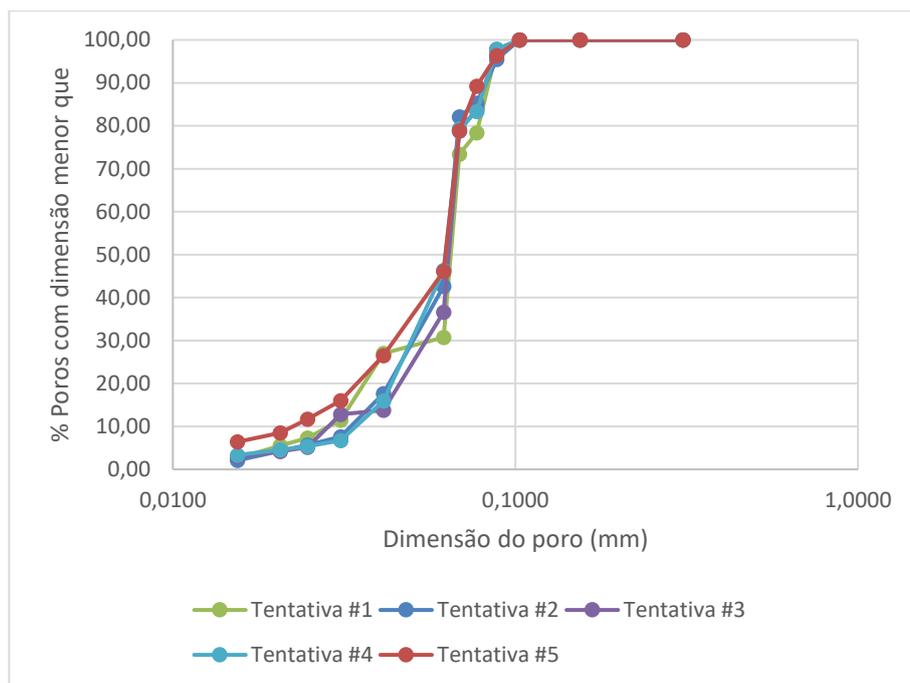


Figura 5.4. Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170 – célula com confinamento.

Os valores das aberturas de filtração obtidas da Figura 5.4 são apresentadas na Tabela 5.2, na qual é possível observar que os ensaios também apresentam resultados satisfatórios.

Tabela 5.2. Aberturas de filtração peneira #170 – célula com confinamento.

Tentativa	O_{98} (mm)	O_{95} (mm)
1	0,090	0,086
2	0,096	0,087
3	0,089	0,085
4	0,089	0,086
5	0,094	0,086
Média	0,0916	0,0858

Portanto, pode-se considerar $O_{98} = 0,0916$ mm (média de todos os ensaios) para a peneira #170,

que de acordo com a norma E11 (ASTM, 2013) deve ser $0,090\text{mm} \pm 0,032\text{mm}$. Todos os cinco resultados também estão dentro da margem de erro.

5.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TRACIONAMENTO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO

5.1.1 GEOTÊXTIL TRACIONADO EM UMA DIREÇÃO

Primeiramente foram realizados ensaios de ponto de bolha para espécimes virgens de todas as amostras com a finalidade de se ter um valor de comparação e poder avaliar a influência da tração na abertura de filtração dos diferentes geotêxteis. Para cada ensaio, foram traçadas curvas com os valores de vazão de ar, de maneira similar a Figura 5.1, e posteriormente foram obtidas a partir de curvas de distribuição dos poros. As deformações estudadas foram 5%, 10% e 20%.

As Figuras 5.5 a 5.7 mostram a influência da tração unidirecional na curva de distribuição dos poros para os geotêxteis G1 a G3, cujas propriedades foram apresentadas na Tabela 3.1. As Tabelas 5.3 e 5.4 sumarizam os valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os espécimes sem solicitação e tracionados em uma direção, que mostram o aumento de O_{98} e O_{95} com o aumento do nível de deformação do geotêxtil.

Os ensaios mostram que os geotêxteis com menor gramatura possuem valores de abertura de filtração maiores que aqueles com maior gramatura.

Os resultados permitem observar que o acréscimo na deformação aumentou o valor da abertura de filtração. Em situações reais, caso essa observação não seja considerada, o geotêxtil poderá permitir a passagem de grãos com diâmetro maiores do que os assumidos no projeto, podendo causar piping.

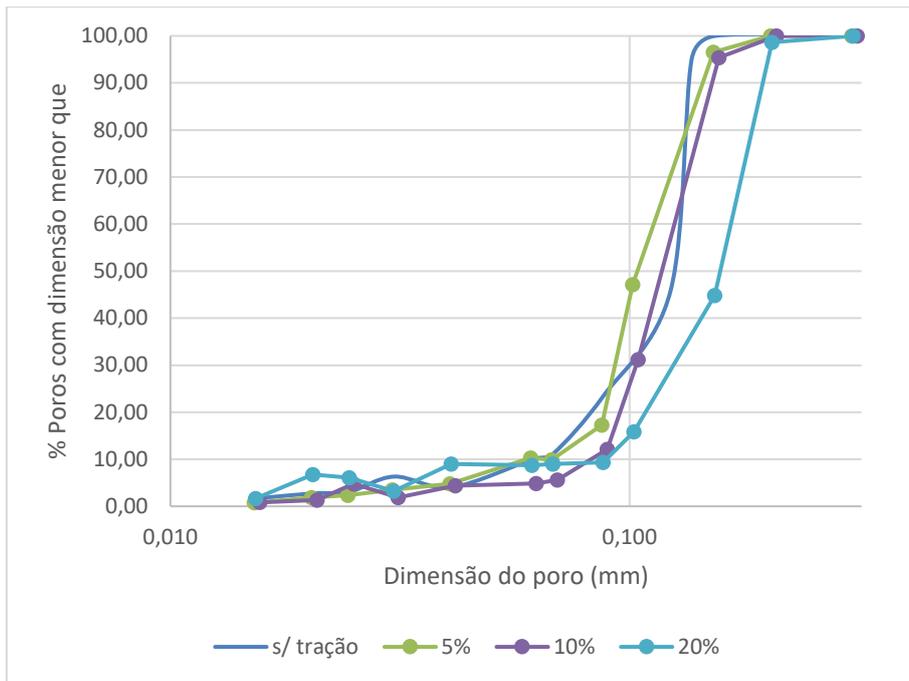


Figura 5.5. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) tracionado unidirecionalmente.

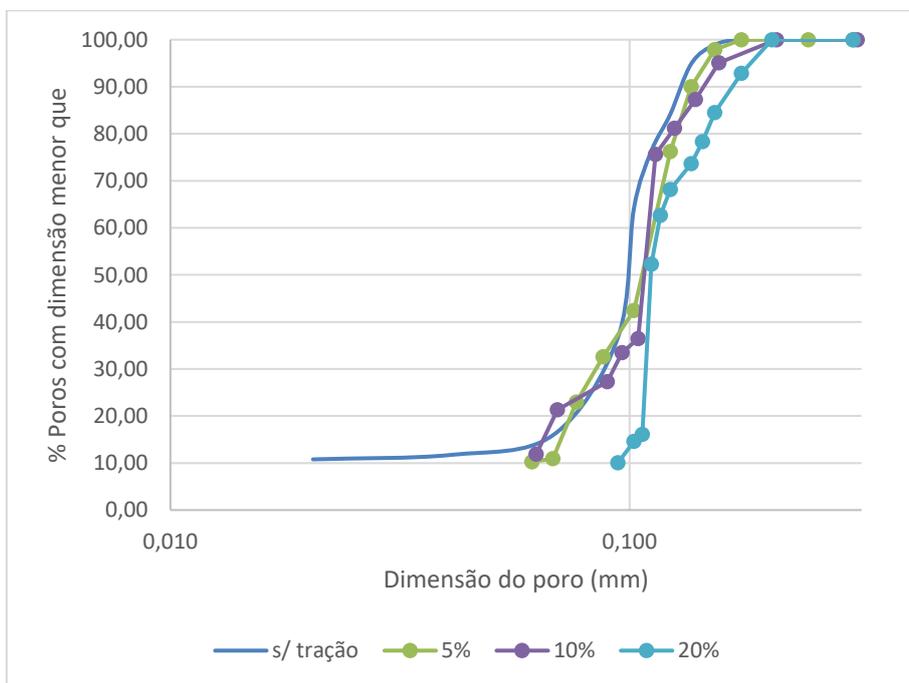


Figura 5.6. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) tracionado unidirecionalmente.

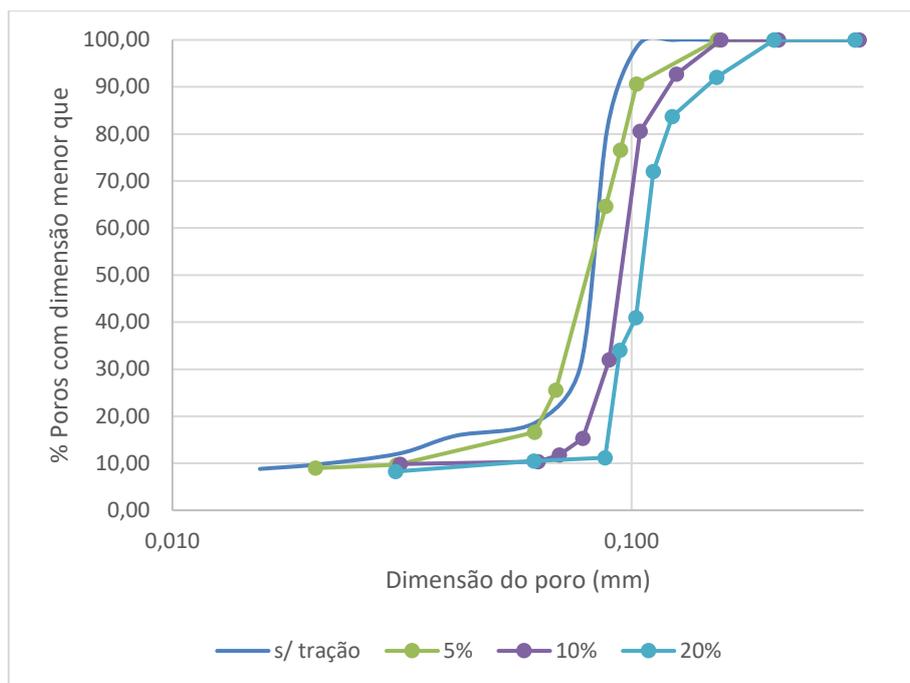


Figura 5.7. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) tracionado unidirecionalmente.

Tabela 5.3. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção.

Deformação	O_{98} (mm)		
	G1	G2	G3
0	0,147	0,139	0,108
5%	0,174	0,154	0,140
10%	0,186	0,176	0,147
20%	0,204	0,194	0,182

Tabela 5.4. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção.

Deformação	O_{95} (mm)		
	G1	G2	G3
0	0,137	0,130	0,106
5%	0,151	0,148	0,127
10%	0,152	0,155	0,140
20%	0,201	0,180	0,168

5.1.2 GEOTÊXTIL TRACIONADO EM DUAS DIREÇÕES

A sequência de ensaios foi a mesma adotada no estudo da influência da tração em uma direção. Primeiramente, foram realizados ensaios de ponto de bolha para espécimes virgens de todas as amostras, com a finalidade de ter um valor de comparação e poder avaliar a influência da tração na abertura de filtração dos geotêxteis. Posteriormente, foram realizados os ensaios aumentando o nível de deformações. As deformações estudadas também foram 5%, 10% e 20% e, nestes casos, a deformação foi a mesma nas duas direções.

As Figuras 5.8 a 5.10 mostram a influência da tração bidirecional na curva de distribuição dos poros para os geotêxteis G1 a G3. As Tabelas 5.5 e 5.6 resumem os valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os espécimes sem solicitação e tracionados em duas direções, que mostram o aumento de O_{98} e O_{95} com o aumento do nível de deformação do geotêxtil.

A análise dos dados obtidos permite assimilar que o valor da abertura de filtração também cresce com o aumento da deformação. Pode-se perceber que nas situações em que o geotêxtil foi solicitado bidirecionalmente, os tamanhos dos poros são ainda maiores que no caso em o material foi solicitado somente em uma direção.

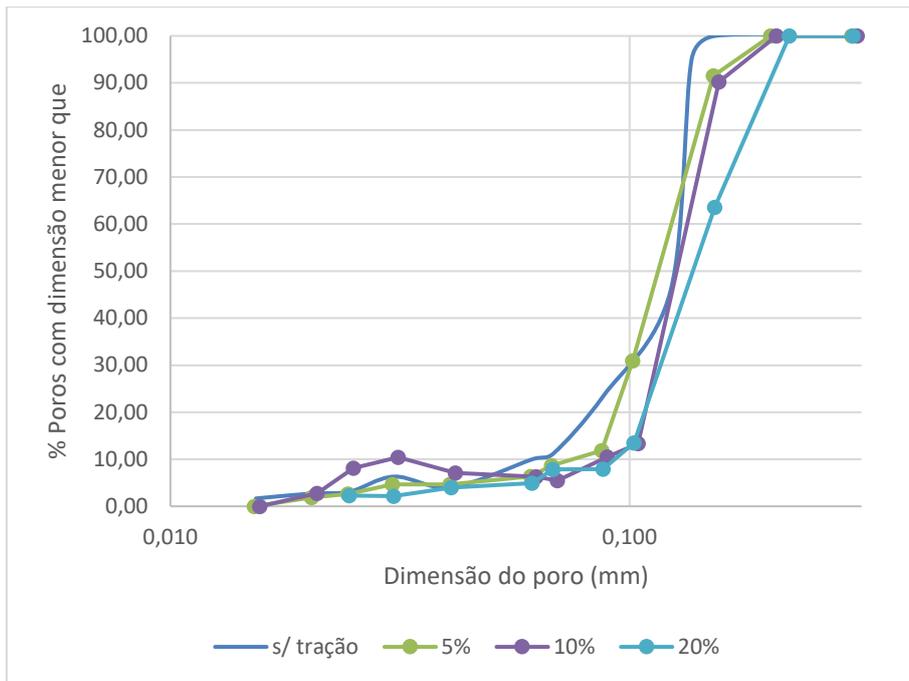


Figura 5.8. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) tracionado bidirecionalmente.

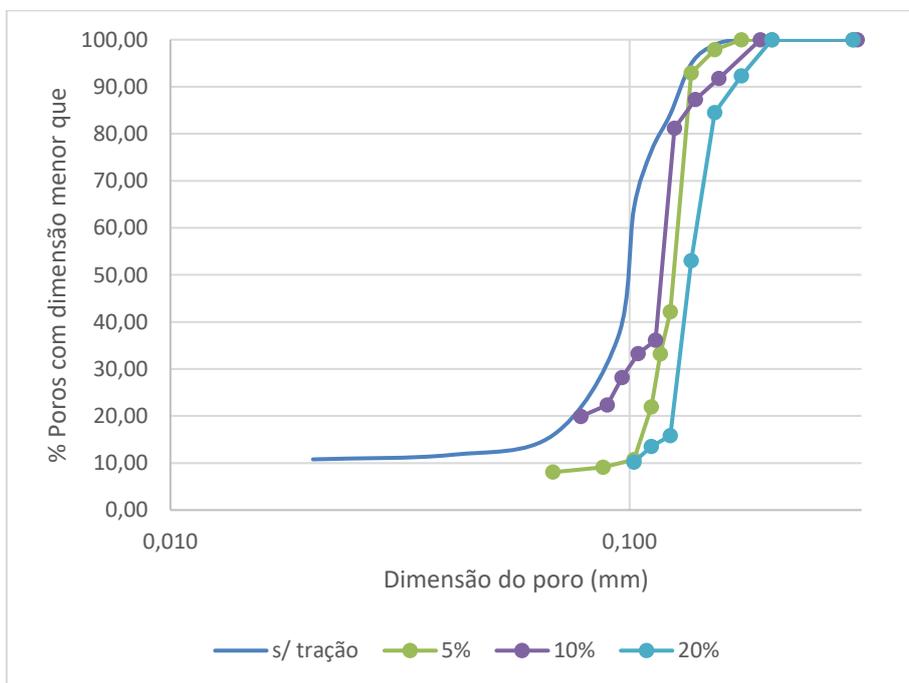


Figura 5.9. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) tracionado bidirecionalmente.

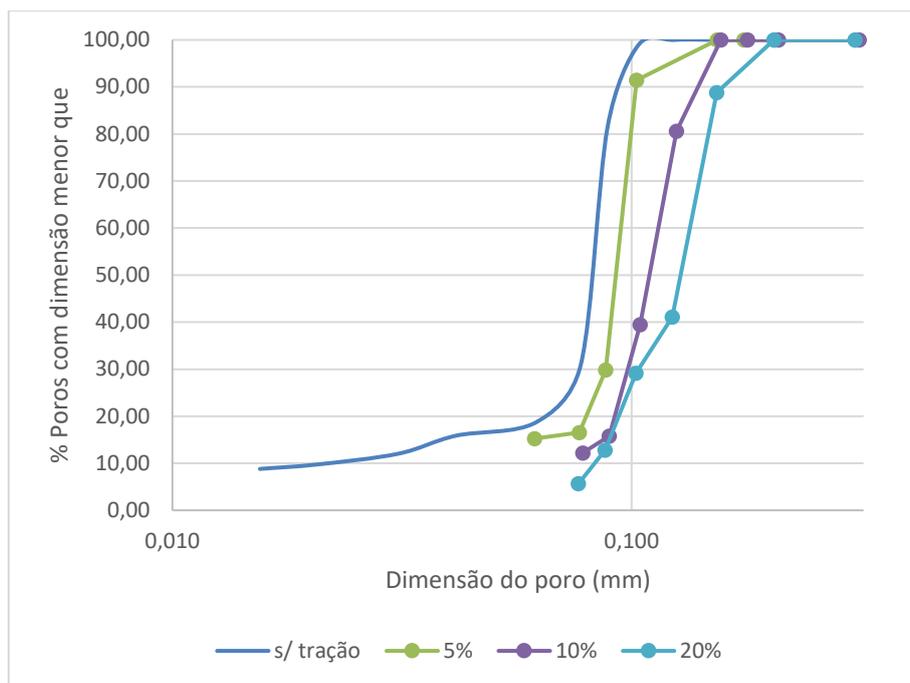


Figura 5.10. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) tracionado bidirecionalmente.

Tabela 5.5. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções.

Deformação	O_{98} (mm)		
	G1	G2	G3
0	0,147	0,139	0,108
5%	0,191	0,163	0,144
10%	0,198	0,182	0,155
20%	0,219	0,196	0,184

Tabela 5.6. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções.

Deformação	O_{95} (mm)		
	G1	G2	G3
0	0,137	0,130	0,106
5%	0,173	0,151	0,132
10%	0,182	0,170	0,151
20%	0,213	0,186	0,175

5.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM UMA DIREÇÃO E DUAS DIREÇÕES

Os resultados obtidos indicam que a deformação do geotêxtil tracionado leva a maiores valores da abertura de filtração; quanto maior for a deformação, maior é abertura.

Ao comparar os resultados obtidos por meio dos ensaios com o geotêxtil tracionado em uma direção e o tracionado em duas direções, a abertura de filtração é maior nas situações de solicitação bidirecional, como mostrado nas Figuras 5.11 e 5.12. No entanto, as diferenças foram menores no caso do geotêxtil de menor gramatura (G3).

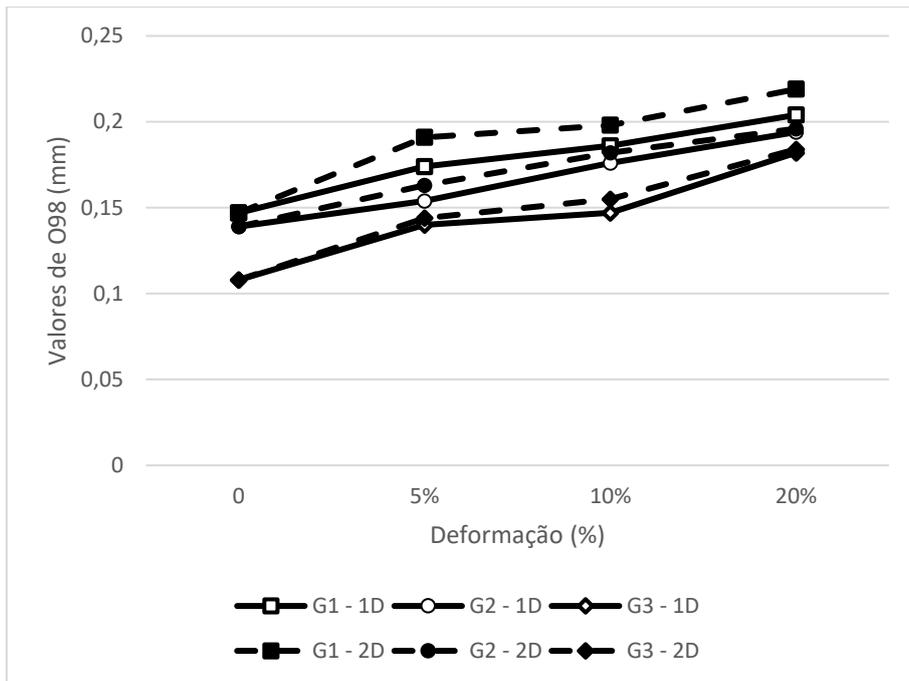


Figura 5.11. Variação do O_{98} com o nível de deformação.

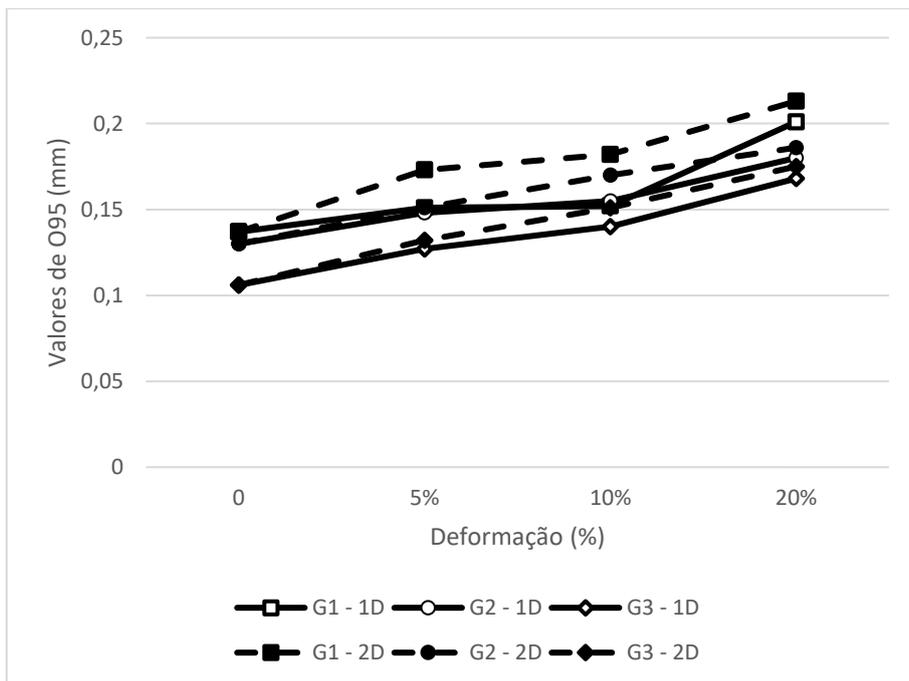


Figura 5.12. Variação do O_{95} com o nível de deformação.

Com as curvas obtidas, também foi possível obter valores de O_{50} , O_{30} e O_{10} que são apresentados na Tabela 5.7.

Os gráficos 5.13 e 5.14 também apresentam a variação dos dados obtidos de O_{50} e O_{30} . É possível observar a tendência dos tamanhos dos poros serem maiores nas situações em que a deformação é maior. De maneira geral, as taxas de crescimento de O_{50} e O_{30} com a deformação foram menores que as obtidas para O_{98} e O_{95} . Contudo, ao analisar os dados de O_{10} , percebe-se que os dados nem sempre apresentam a mesma tendência, explicitando a necessidade de um estudo melhor das aberturas dos poros menores.

Tabela 5.7. Valores de O_{50} , O_{30} , O_{10} .

Deformação (%)		O_{50} (mm)			O_{30} (mm)			O_{10} (mm)		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
1D	0	0,124	0,106	0,093	0,098	0,095	0,090	0,061	0,063	0,066
	5	0,134	0,125	0,095	0,093	0,108	0,093	0,068	0,076	0,071
	10	0,140	0,130	0,103	0,103	0,116	0,100	0,083	0,087	0,077
	20	0,139	0,135	0,120	0,127	0,121	0,106	0,089	0,092	0,081
2D	0	0,124	0,106	0,093	0,098	0,095	0,090	0,061	0,063	0,066
	5	0,137	0,126	0,101	0,101	0,116	0,094	0,076	0,077	0,044
	10	0,143	0,129	0,109	0,116	0,119	0,095	0,088	-	0,062
	20	0,158	0,142	0,125	0,119	0,139	0,106	0,093	0,090	0,033

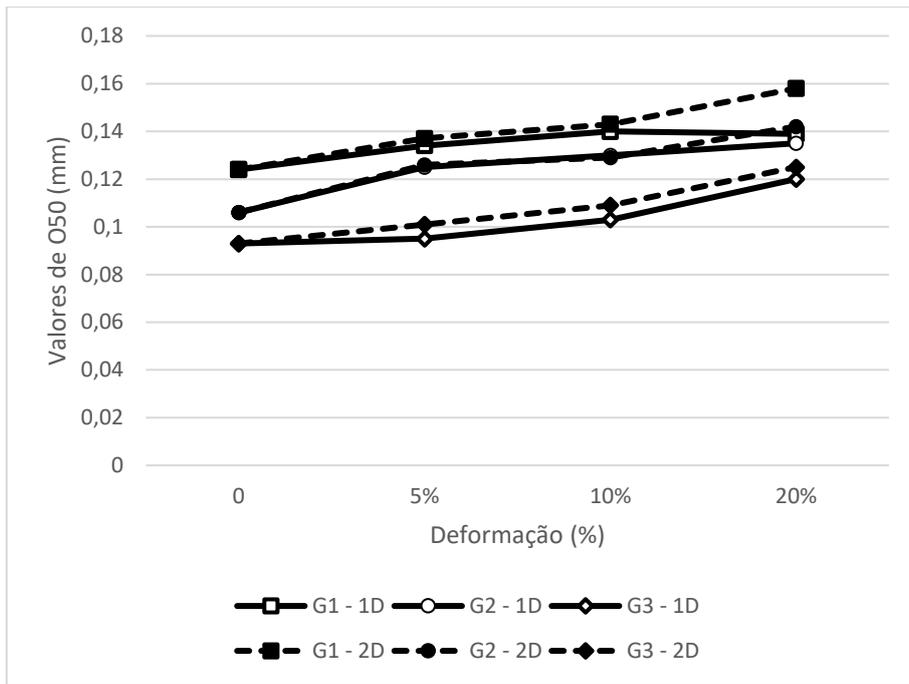


Figura 5.13. Variação do O_{50} com o nível de deformação.

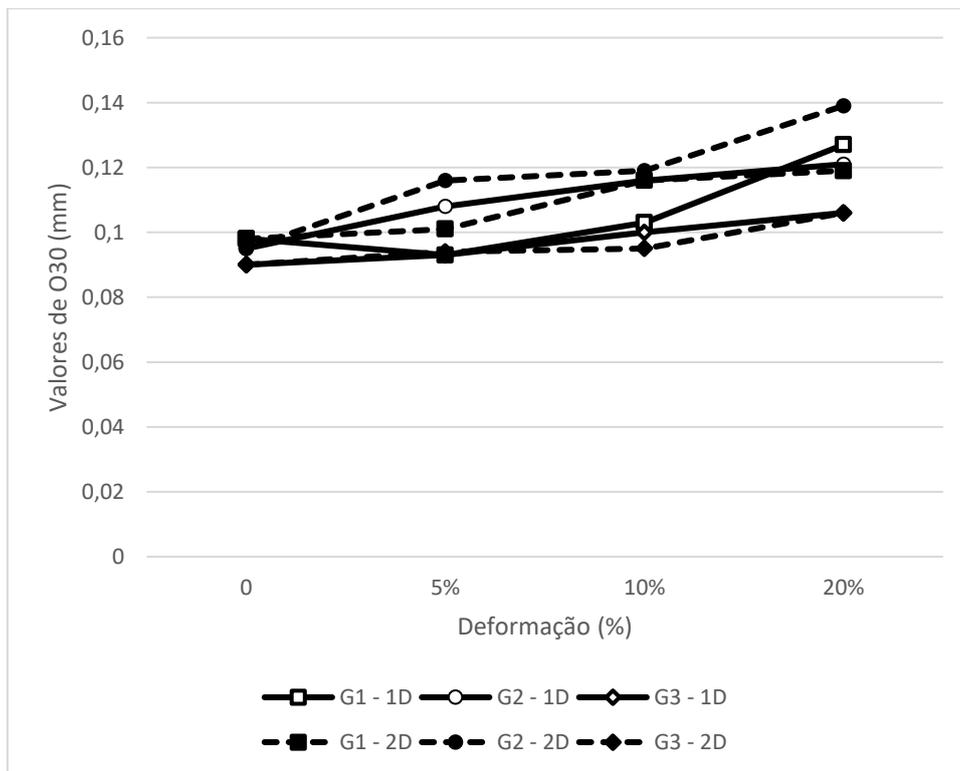


Figura 5.14. Variação do O_{30} com o nível de deformação.

A Tabela 5.8 exibe o aumento da abertura de filtração com o aumento da deformação. O resultado é apresentado de forma percentual em relação à situação sem tracionamento, onde observaram-se aumentos de até 70%. Os valores apresentados realçam mais uma vez a importância de realizar ensaios e entender a situação real em que o geotêxtil será submetido antes do dimensionamento final do filtro. A maior variação foi encontrada para o geotêxtil de maior gramatura (G3 – 600 g/m).

Tabela 5.8. Variação percentual de aumento da abertura de filtração em função do aumento da deformação.

Deformação (%)		O ₉₈ (mm)			O ₉₅ (mm)		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3
		Variação percentual (%)			Variação percentual (%)		
1D	5	18,37	10,79	29,63	10,22	13,85	19,81
	10	26,53	26,62	36,11	10,95	19,23	32,08
	20	38,78	39,57	68,52	46,72	38,46	58,49
2D	5	29,93	17,27	33,33	26,28	16,15	24,53
	10	34,69	30,94	43,52	32,85	30,77	42,45
	20	48,98	41,01	70,37	55,47	43,08	65,09

5.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO

Para a avaliação da influência do confinamento, foram utilizados espécimes de geotêxteis comprimidos conforme descrito no item 3.2.4. Os geotêxteis sem solicitação e tracionados foram submetidos à quatro valores de tensão de compressão (10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa). A avaliação do confinamento em amostras tracionadas em uma e duas direções também foi estudada.

As Figura 5.15 a 5.18 mostram a influência do confinamento na curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1, sem e com deformação de tração. As curvas mostram que o aumento da tensão de confinamento diminui o valor das aberturas de filtração.

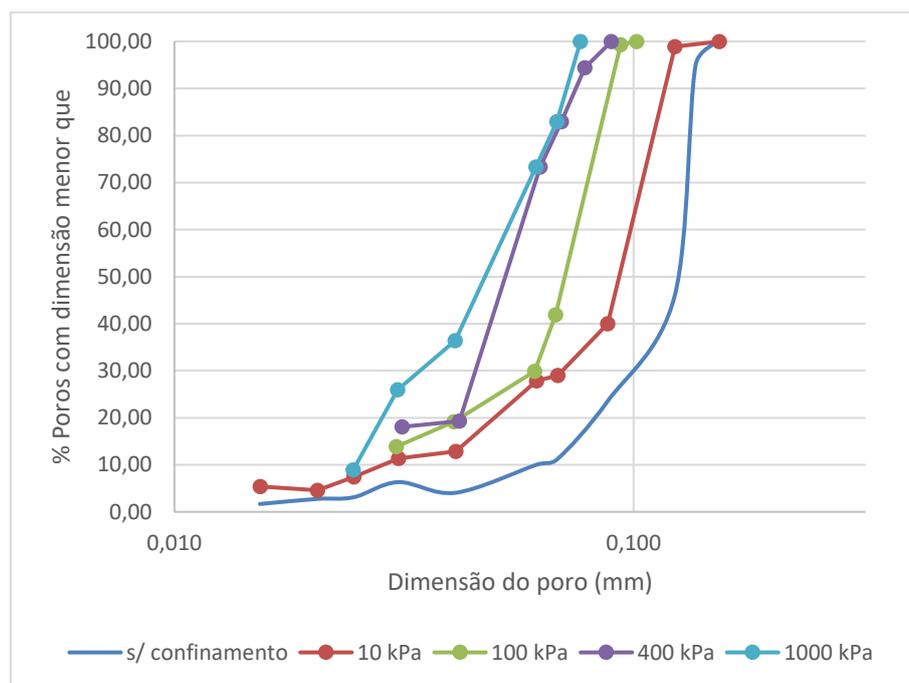


Figura 5.15. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, sem deformação.

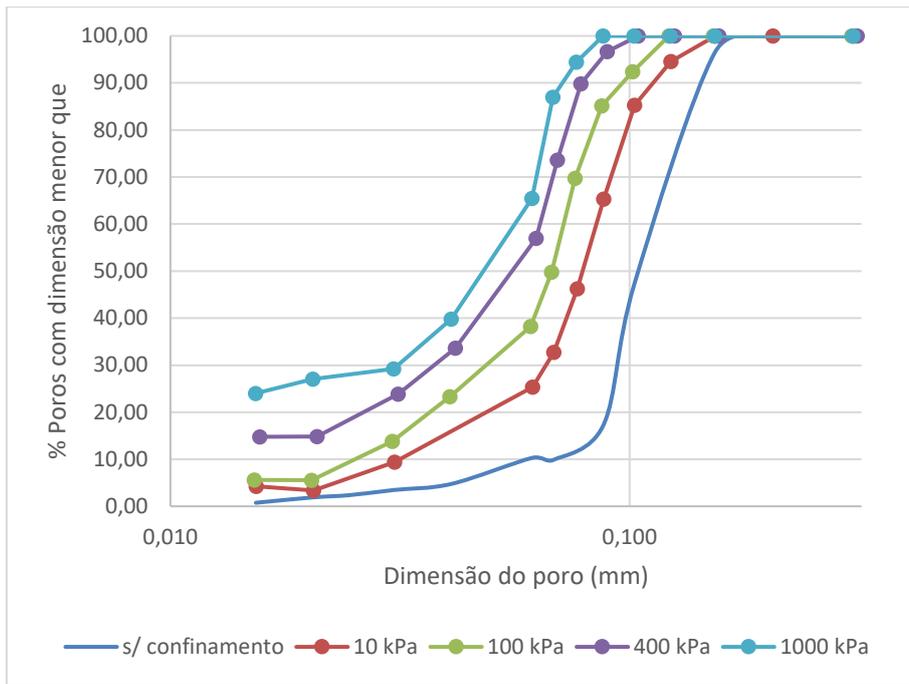


Figura 5.16. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.

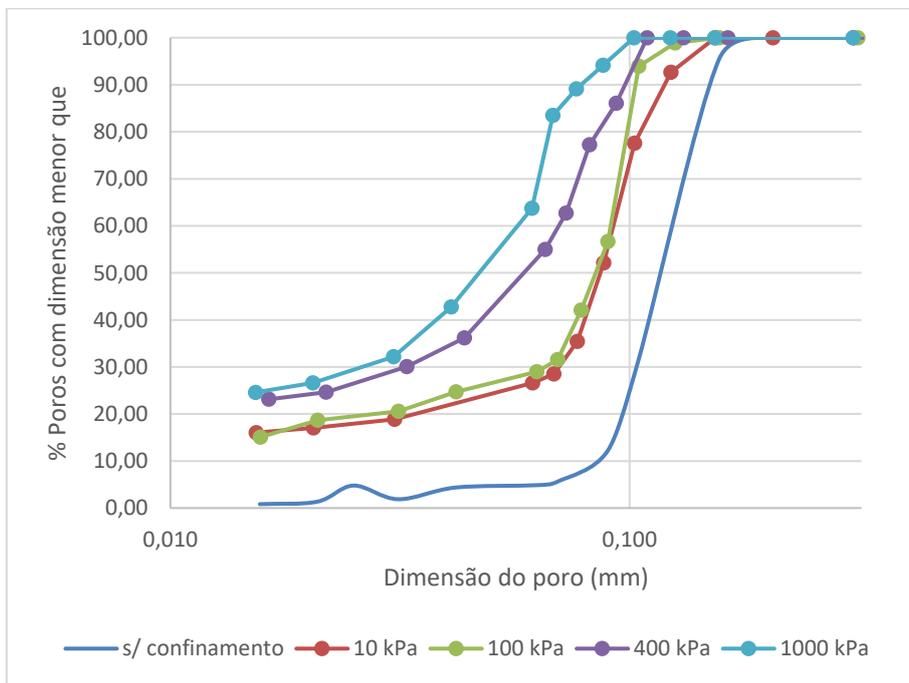


Figura 5.17. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em uma direção.

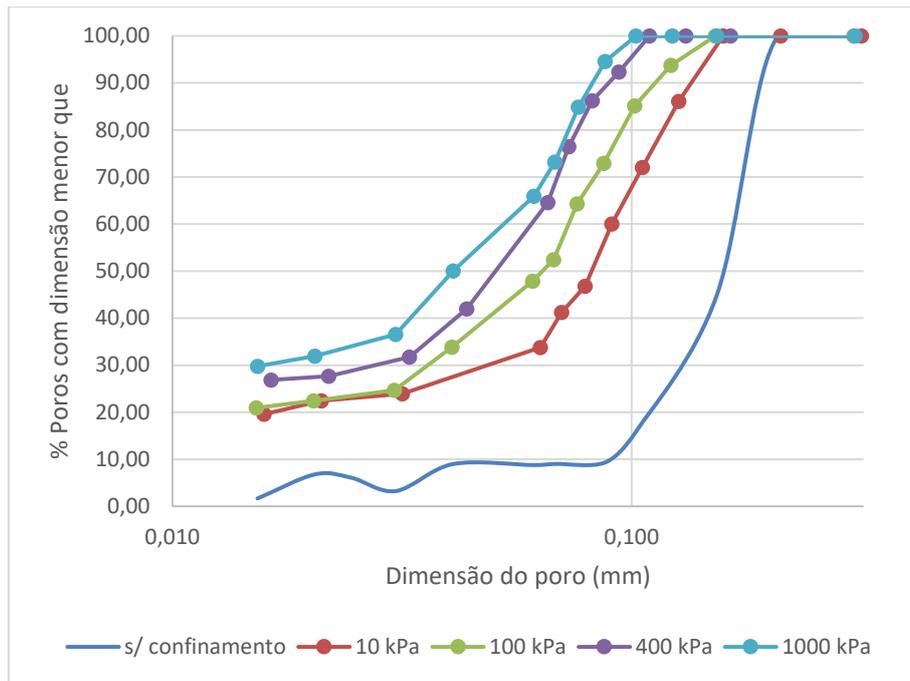


Figura 5.18. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.

As Figuras 5.19 a 5.26 apresentam os mesmos tipos de resultados obtidos para os demais geotêxteis ensaiados (G2 e G3), tracionados em uma direção. De forma geral, quanto maior a compressão sofrida pelo geotêxtil (ou maior a tensão normal equivalente), menor as dimensões dos seus poros.

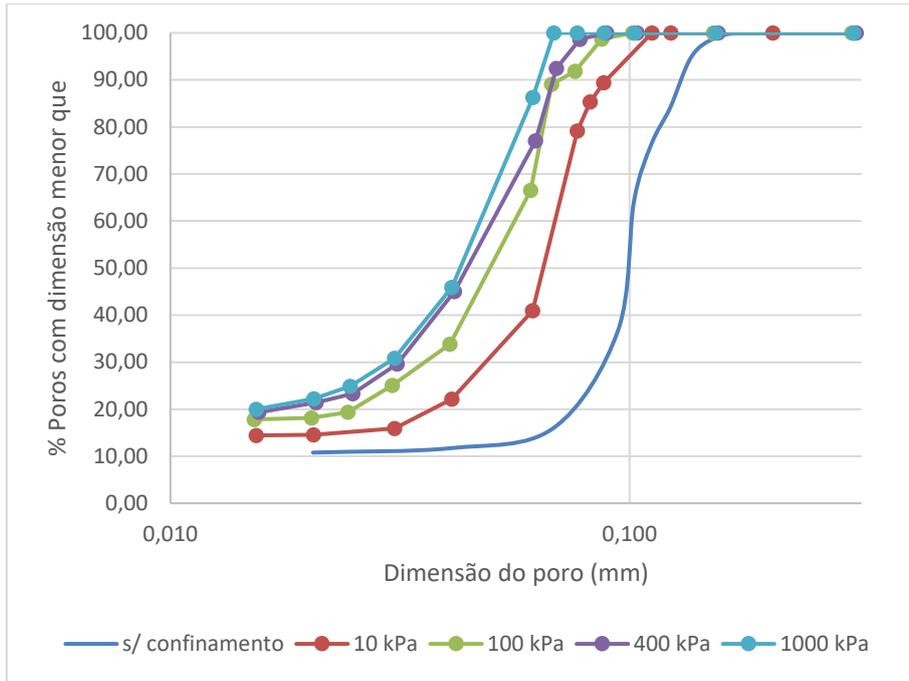


Figura 5.19. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, sem deformação de tração.

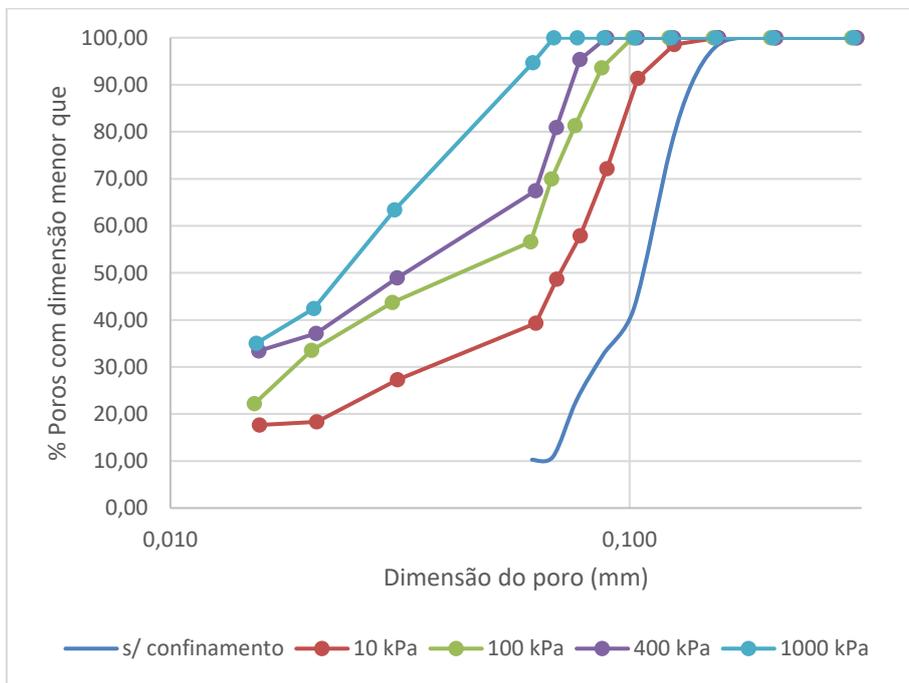


Figura 5.20. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.

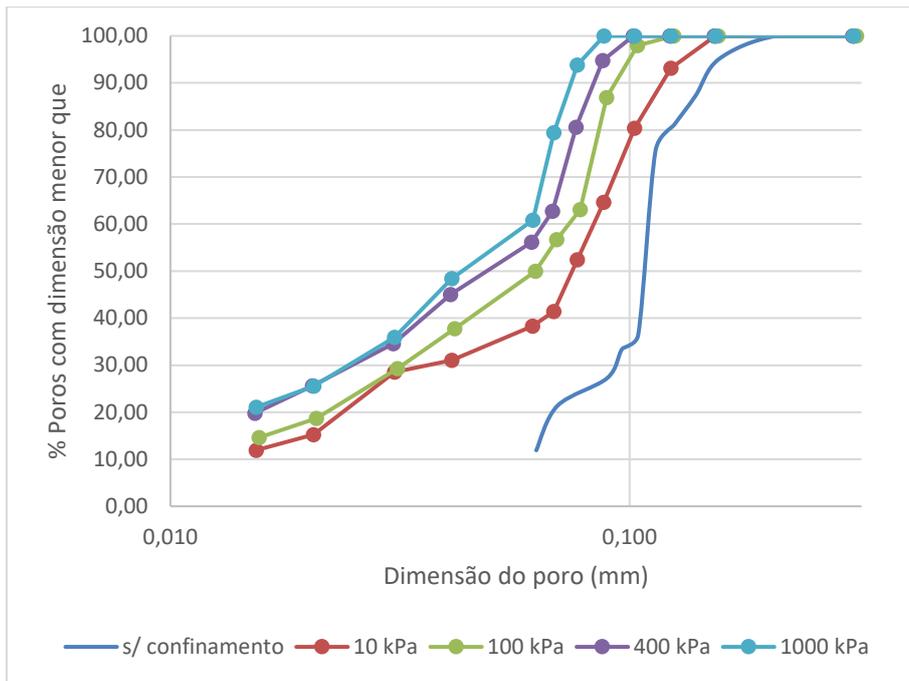


Figura 5.21. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em uma direção.

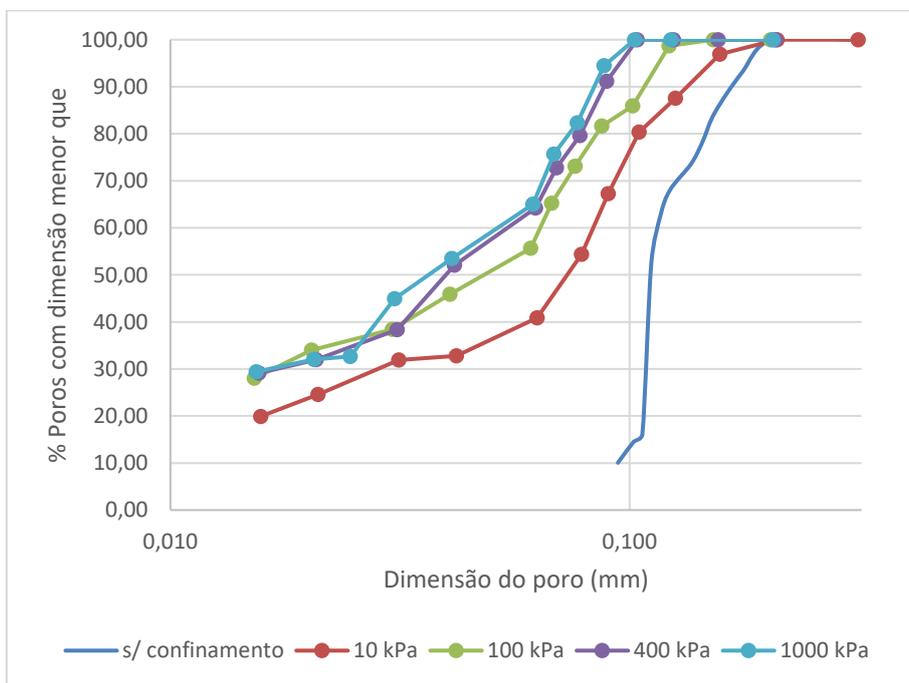


Figura 5.22. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.

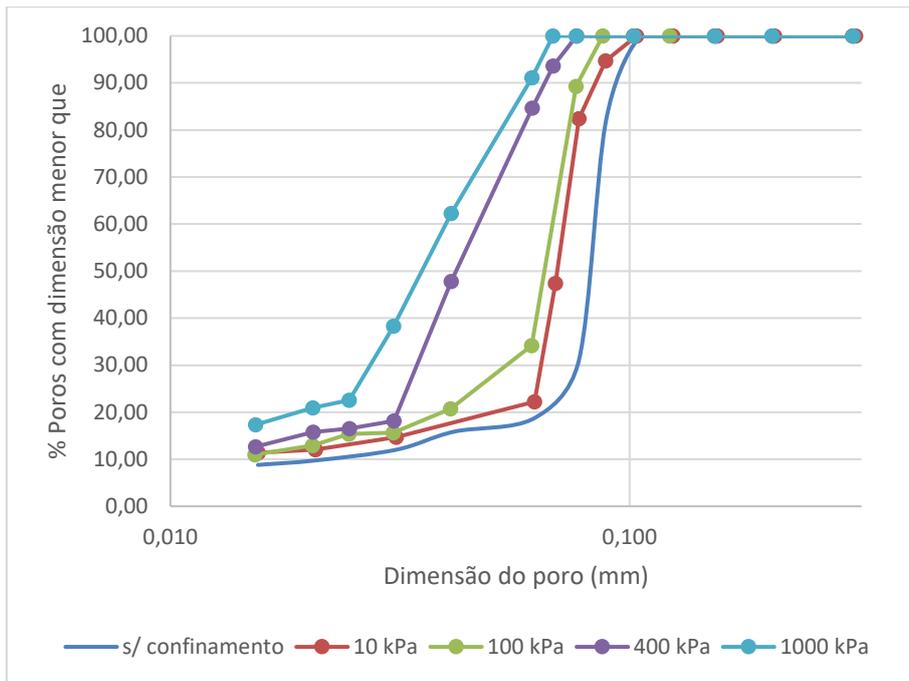


Figura 5.23. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, sem deformação de tração.

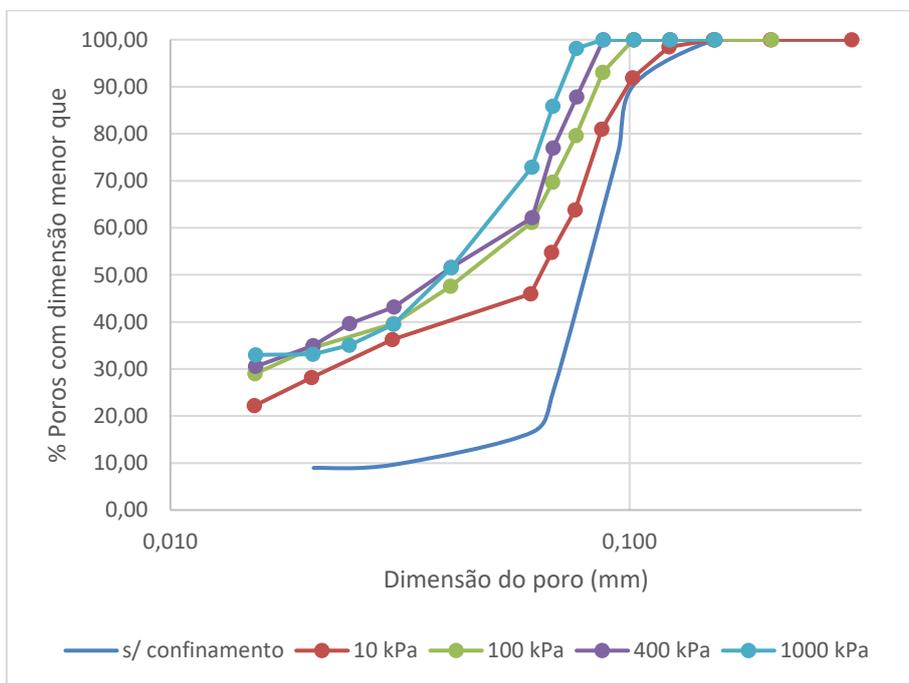


Figura 5.24. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção.

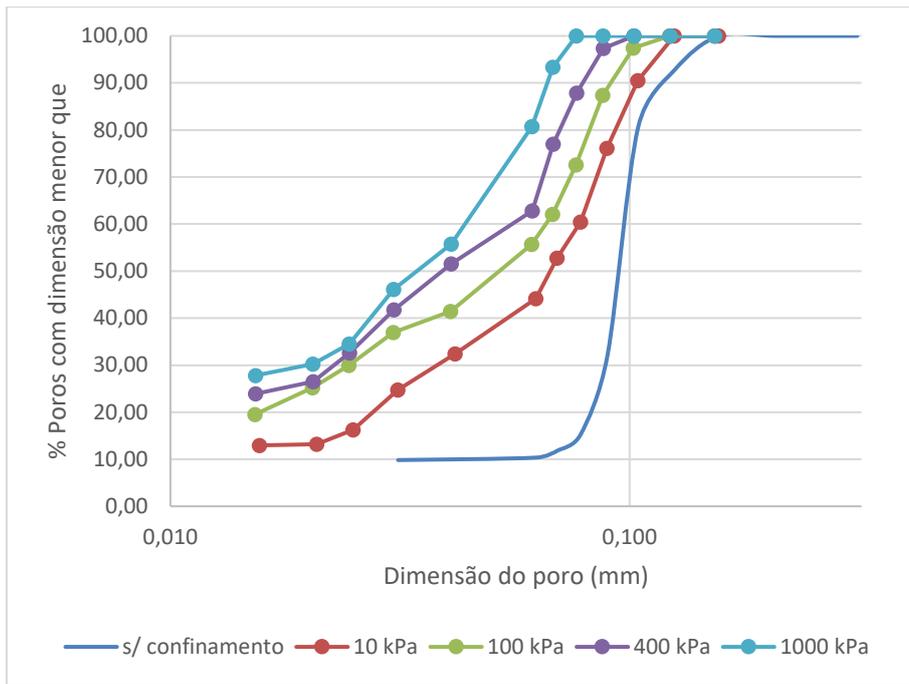


Figura 5.25. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em uma direção.

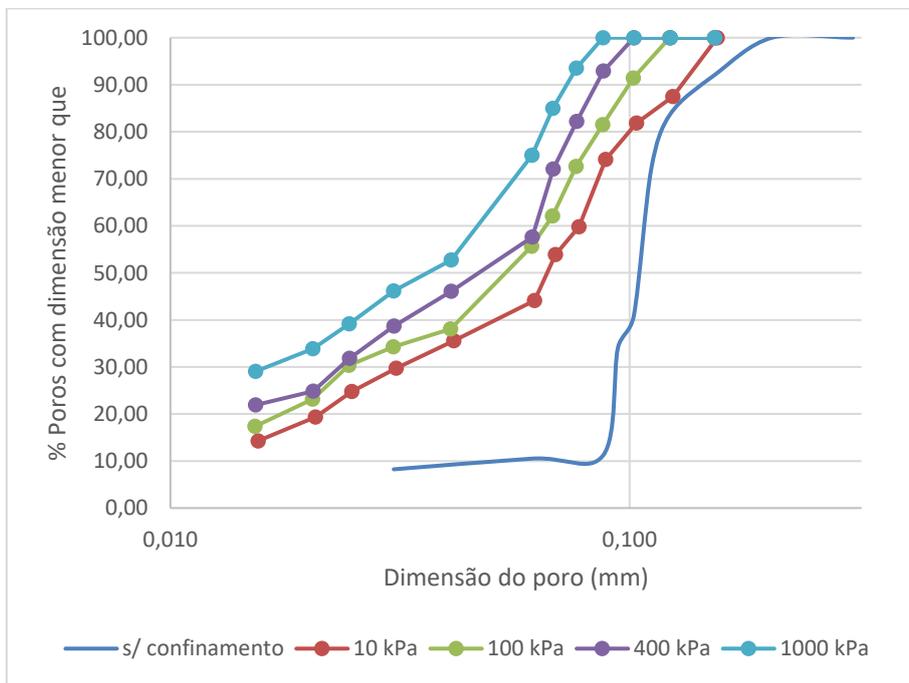


Figura 5.26. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em uma direção.

As Figuras 5.27 a 5.35 apresentam os mesmos tipos de resultados obtidos para todos os geotêxteis ensaiados (G1, G2 e G3), tracionados em duas direções. De forma geral, pode-se perceber que para um mesmo valor de tensão de confinamento e de deformação, a abertura de filtração é maior quando o geotêxtil é tracionado de maneira bidirecional. É possível concluir também que, mantendo o valor da deformação, quanto maior a compressão sofrida pelo geotêxtil (ou maior a tensão vertical aplicada), menor as dimensões dos poros.

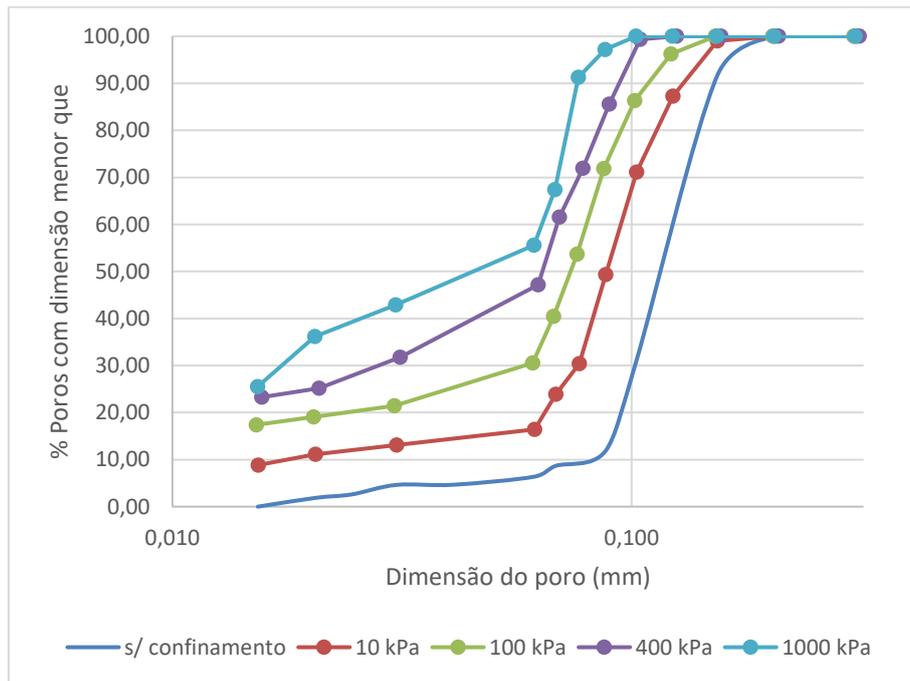


Figura 5.27. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções.

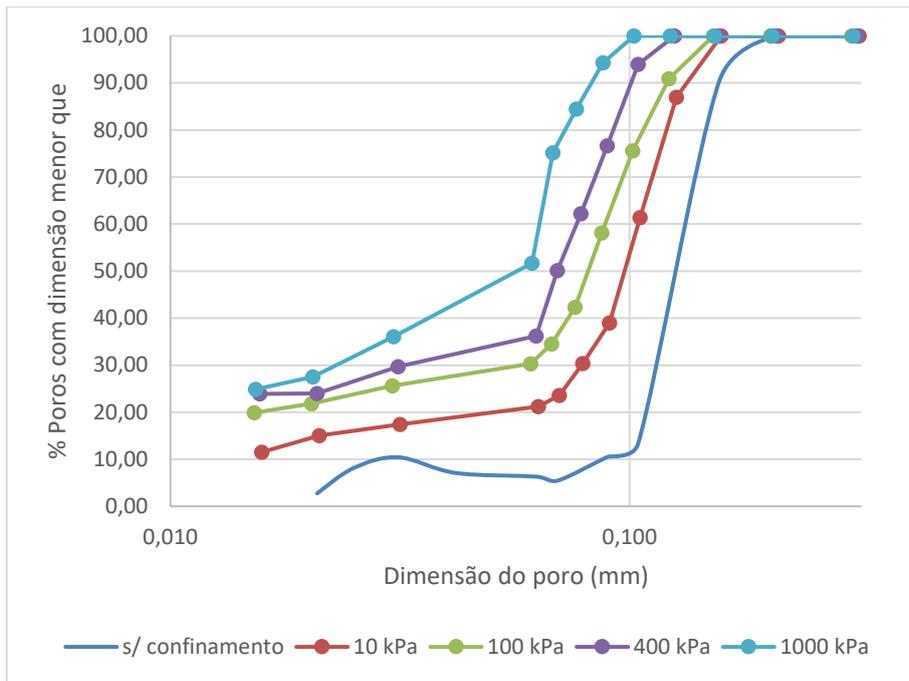


Figura 5.28. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.

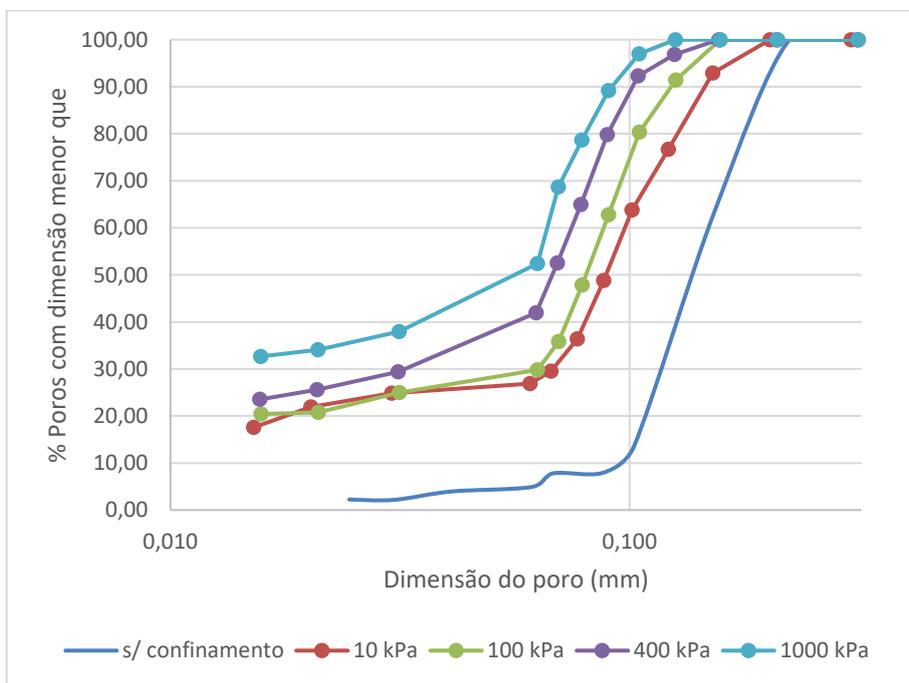


Figura 5.29. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.

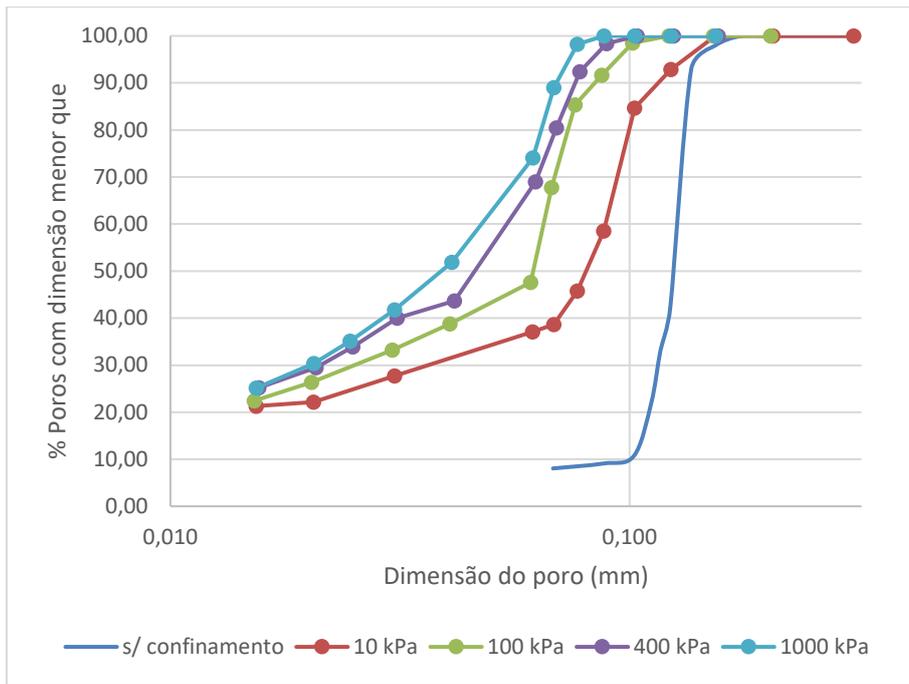


Figura 5.30. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em em duas direções.

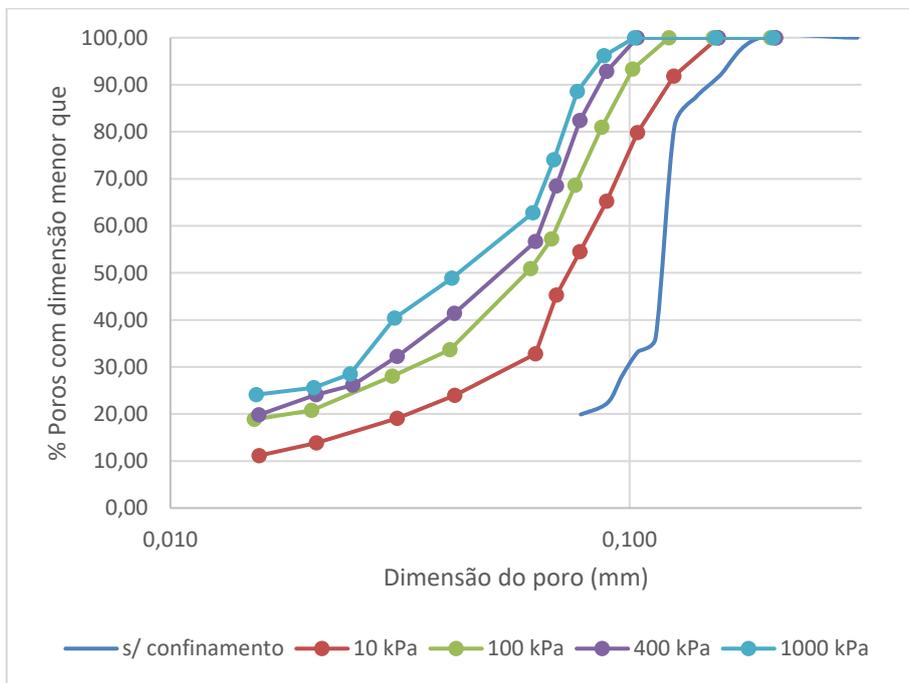


Figura 5.31. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.

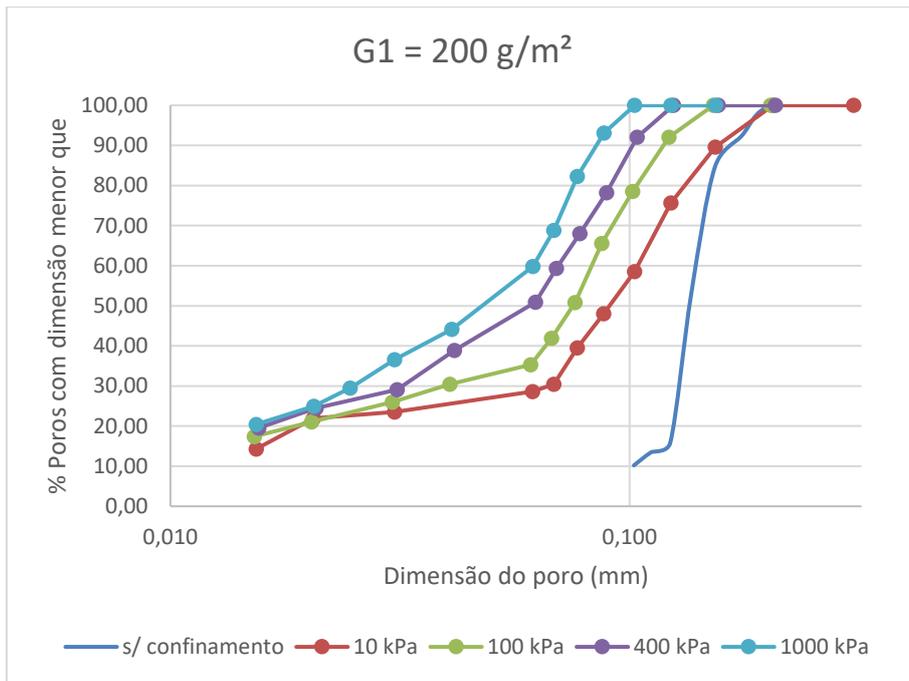


Figura 5.32. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.

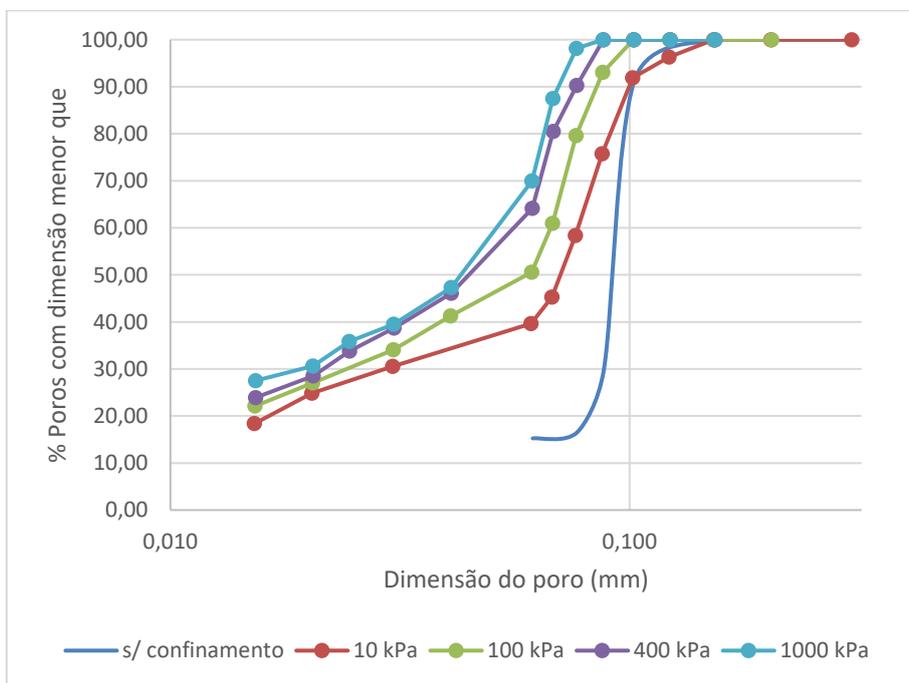


Figura 5.33. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções.

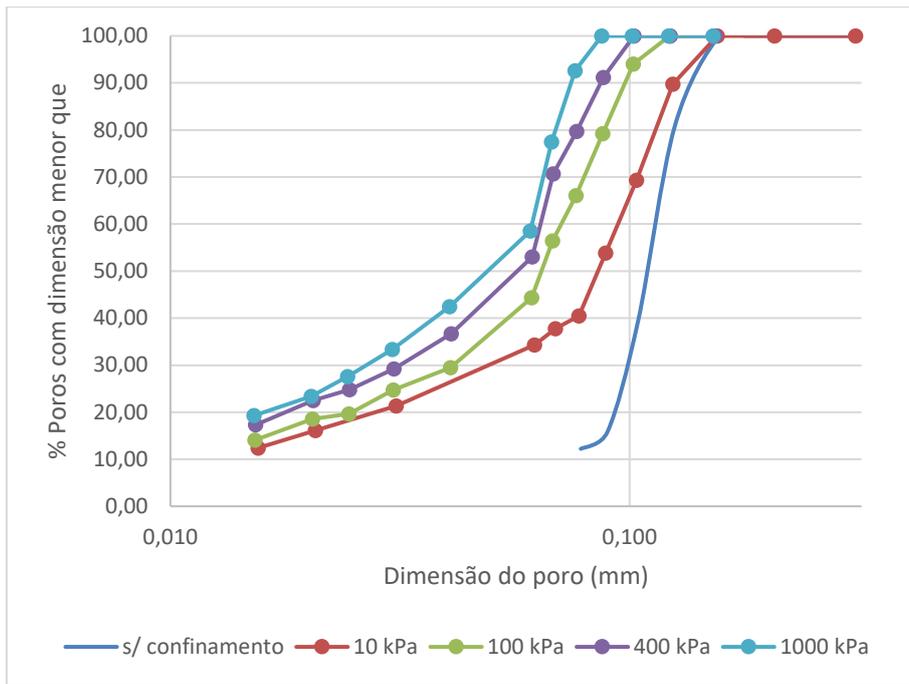


Figura 5.34. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 10%, tracionado em duas direções.

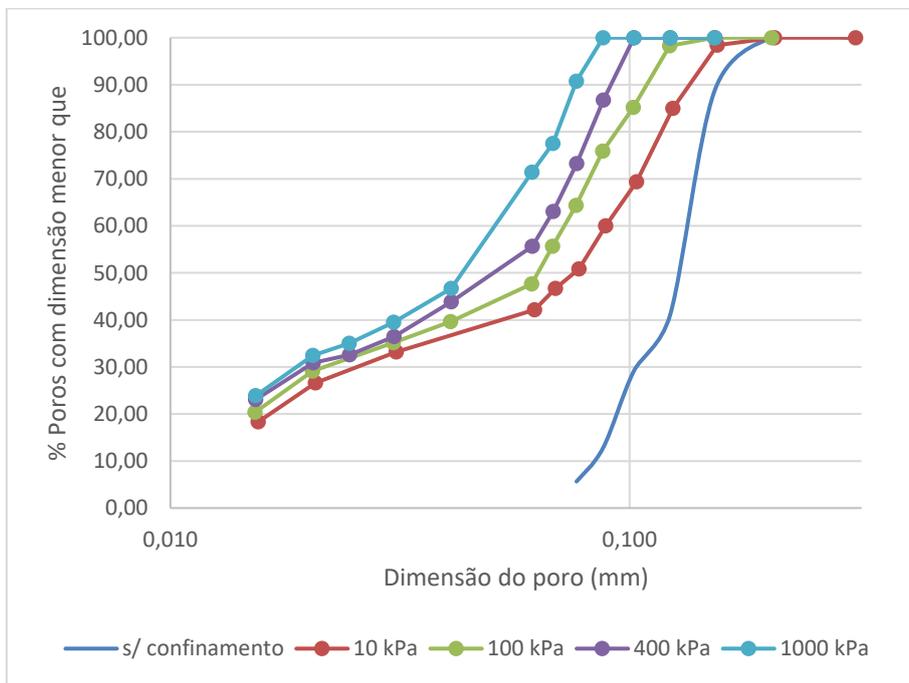


Figura 5.35. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) confinado, com deformação de 20%, tracionado em duas direções.

As Tabelas 5.9 a 5.12 resumem os valores de O_{98} e O_{95} obtidos considerando o confinamento e a deformação para cada combinação estudada.

As informações exibidas nas tabelas mostram que para uma mesma tensão de confinamento o tamanho dos poros continua aumentando em função da deformação de tração. Para uma mesma deformação de tração, mostram que com o aumento da tensão vertical o tamanho dos poros diminui.

Entretanto, como as solicitações mecânicas estudadas (deformação e confinamento) influenciaram de forma oposta os geotêxteis. Pode-se constatar que o geotêxtil G1 indeformado apresenta o valor de O_{98} sob 100 kPa de confinamento similar ao valor de O_{98} quando deformado em 10% de deformação em uma direção e sob 1000 kPa de confinamento.

Outro exemplo similar pode ser dado ao comparar dados do geotêxtil G2: os valores de O_{95} no caso do material deformado em 10% de deformação em uma direção e sob 100 kPa de tensão vertical são praticamente iguais ao do mesmo material sob 20% de deformação em duas direções e 1000 kPa de confinamento. Essas observações mostram a importância de se considerar as solicitações mecânicas a que o geotêxtil estará submetido em campo.

Tabela 5.9. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção e confinados.

Tensão (kPa)	O_{98} (mm)											
	G1				G2				G3			
	Deformação (%)				Deformação (%)				Deformação (%)			
	0	5	10	20	0	5	10	20	0	5	10	20
0	0,147	0,174	0,186	0,204	0,139	0,154	0,176	0,194	0,108	0,140	0,147	0,182
10	0,123	0,137	0,146	0,154	0,107	0,125	0,144	0,164	0,096	0,129	0,134	0,146
100	0,094	0,117	0,124	0,140	0,087	0,093	0,104	0,120	0,079	0,090	0,103	0,114
400	0,085	0,095	0,101	0,106	0,073	0,082	0,092	0,101	0,075	0,082	0,089	0,098
1000	0,076	0,086	0,096	0,092	0,069	0,065	0,086	0,084	0,064	0,069	0,075	0,083

Tabela 5.10. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em uma direção e confinados.

Tensão (kPa)	O_{95} (mm)											
	G1				G2				G3			
	Deformação (%)				Deformação (%)				Deformação (%)			
	0	5	10	20	0	5	10	20	0	5	10	20
0	0,137	0,151	0,152	0,201	0,130	0,148	0,155	0,171	0,106	0,127	0,140	0,168
10	0,121	0,126	0,132	0,141	0,100	0,112	0,126	0,141	0,090	0,118	0,124	0,133
100	0,092	0,106	0,108	0,124	0,084	0,089	0,099	0,114	0,075	0,087	0,099	0,108
400	0,082	0,083	0,089	0,097	0,069	0,076	0,087	0,094	0,070	0,079	0,085	0,092
1000	0,074	0,078	0,089	0,082	0,067	0,062	0,082	0,079	0,060	0,066	0,071	0,079

Tabela 5.11. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções e confinados.

Tensão (kPa)	O_{98} (mm)											
	G1				G2				G3			
	Deformação (%)				Deformação (%)				Deformação (%)			
	0	5	10	20	0	5	10	20	0	5	10	20
0	0,147	0,191	0,196	0,219	0,139	0,163	0,182	0,196	0,108	0,144	0,155	0,184
10	0,123	0,143	0,150	0,167	0,107	0,148	0,154	0,170	0,096	0,133	0,142	0,154
100	0,094	0,137	0,144	0,154	0,087	0,101	0,115	0,131	0,079	0,093	0,108	0,122
400	0,085	0,100	0,121	0,127	0,073	0,089	0,097	0,115	0,075	0,086	0,097	0,100
1000	0,076	0,089	0,098	0,108	0,069	0,076	0,093	0,098	0,064	0,076	0,080	0,086

Tabela 5.12. Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis tracionados em duas direções e confinados.

Tensão (kPa)	O_{95} (mm)											
	G1				G2				G3			
	Deformação (%)				Deformação (%)				Deformação (%)			
	0	5	10	20	0	5	10	20	0	5	10	20
0	0,137	0,173	0,182	0,213	0,130	0,151	0,170	0,186	0,106	0,132	0,151	0,175
10	0,121	0,136	0,141	0,157	0,100	0,125	0,142	0,162	0,090	0,123	0,138	0,150
100	0,092	0,120	0,135	0,138	0,084	0,097	0,107	0,127	0,075	0,089	0,104	0,116
400	0,082	0,097	0,109	0,123	0,069	0,083	0,091	0,108	0,070	0,084	0,095	0,097
1000	0,074	0,081	0,089	0,096	0,067	0,074	0,082	0,096	0,060	0,074	0,078	0,084

As Figuras 5.36 e 5.41 exemplificam a tendência dos valores da abertura de filtração diminuir com o confinamento e aumentar com a deformação, elaborados a partir das Tabelas 5.9 a 5.12. Os ensaios realizados demonstraram que a abertura de filtração é maior no caso do geotêxtil tracionado em duas direções do que em uma direção.

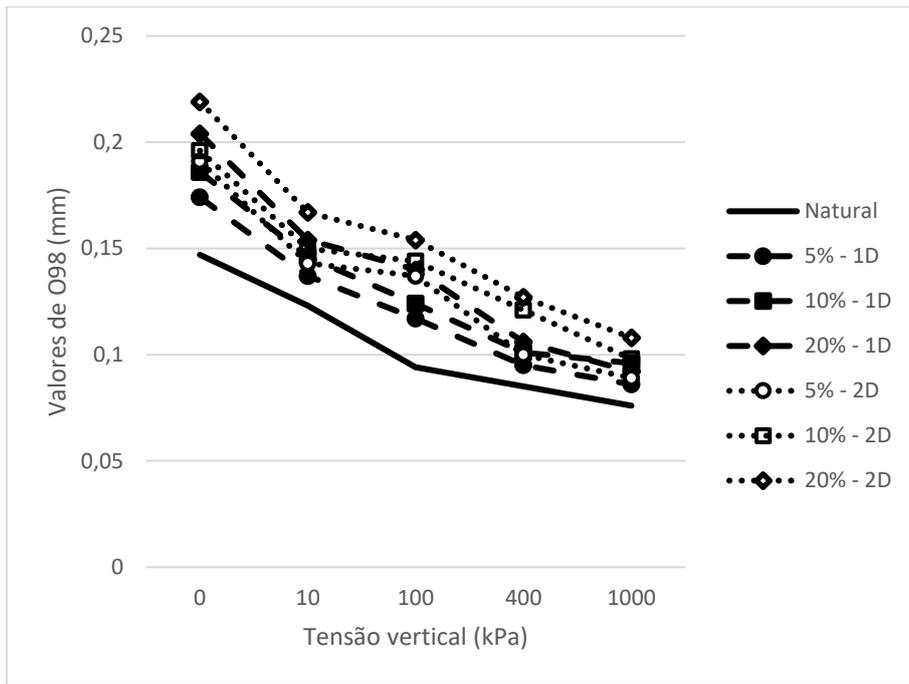


Figura 5.36. Variação de O_{98} (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G1.

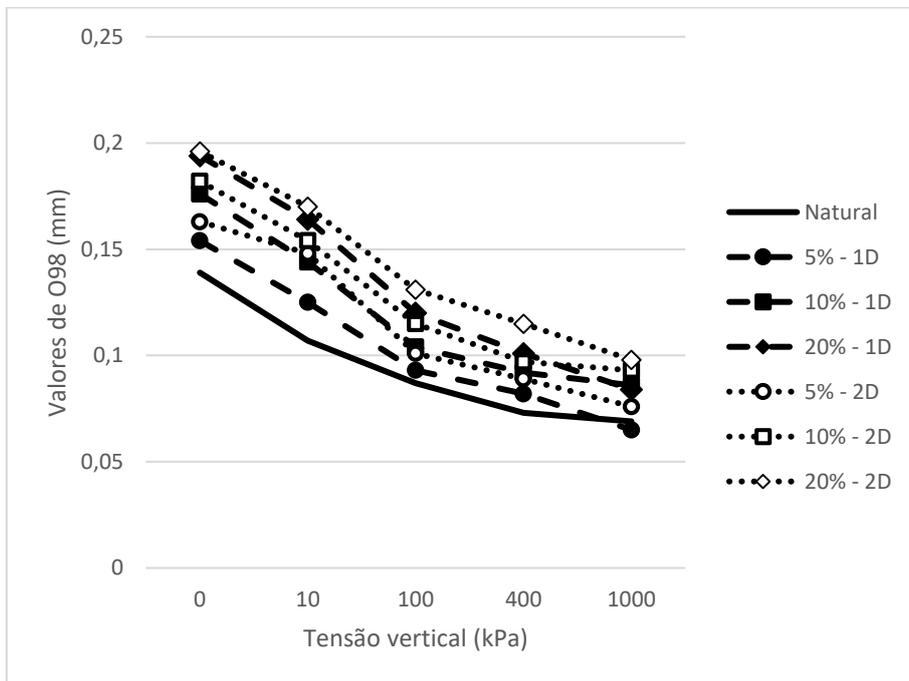


Figura 5.37. Variação de O_{98} (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G2.

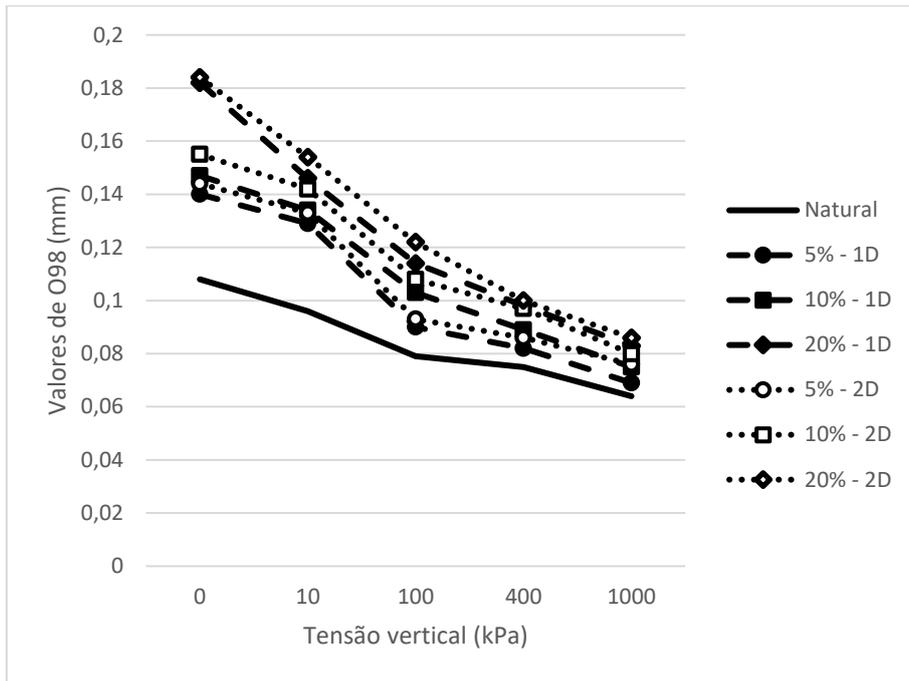


Figura 5.38. Variação de O₉₈ (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G3.

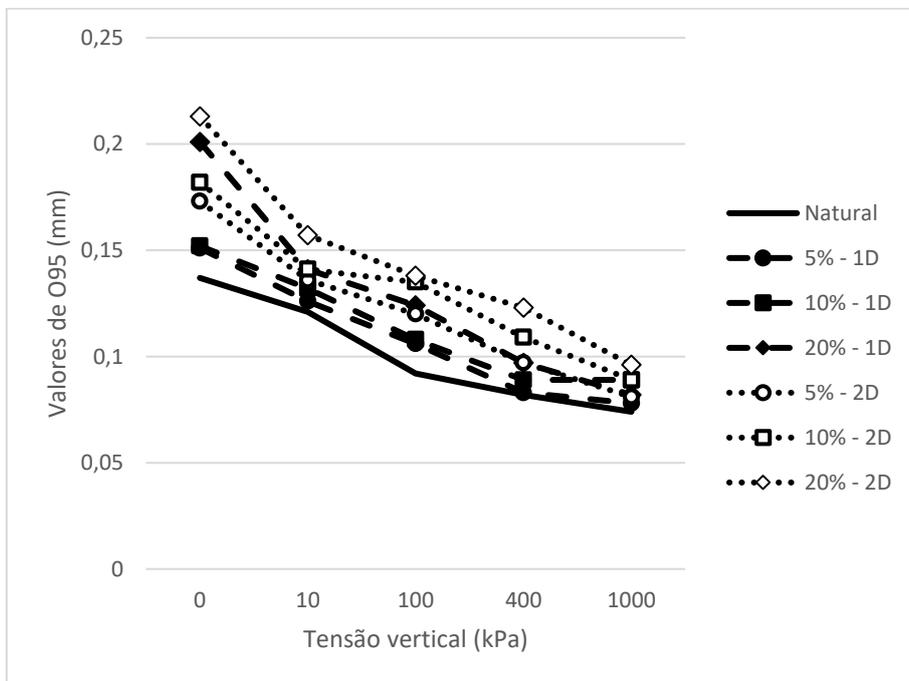


Figura 5.39. Variação de O₉₅ (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G1.

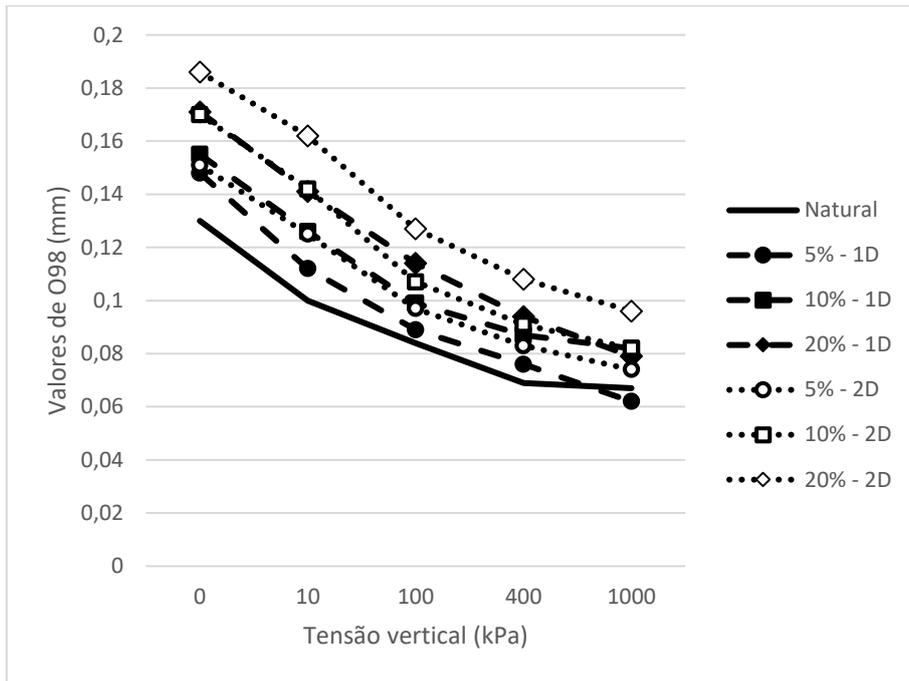


Figura 5.40. Variação de O_{95} (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G2.

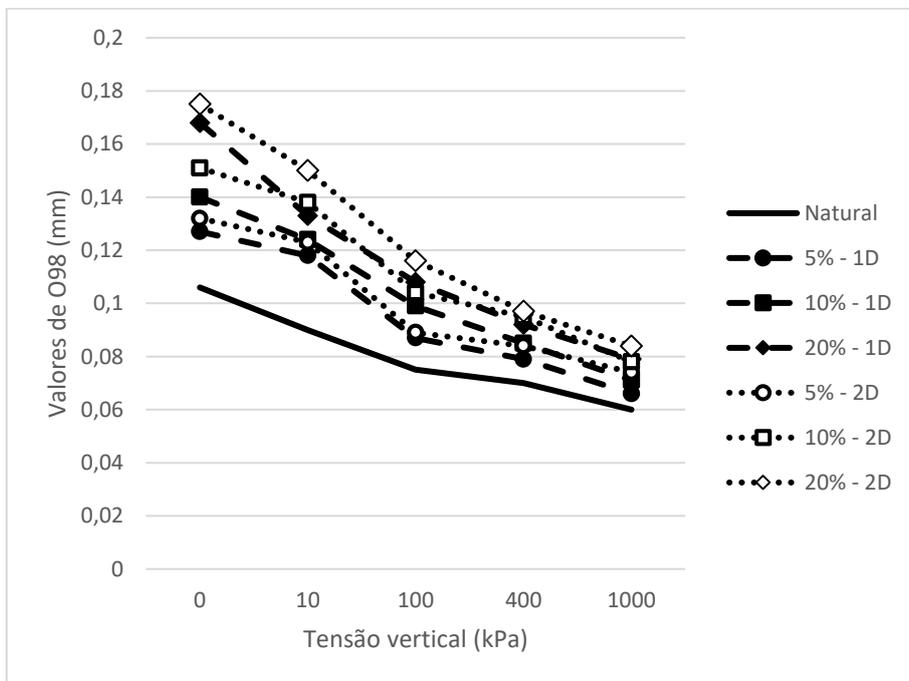


Figura 5.41. Variação de O_{95} (mm) em função do confinamento e da deformação de tração – G3.

5.3 AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO ATRAVÉS DOS ENSAIOS COM MICROESFERAS DE VIDRO

Os ensaios com as microesferas de vidro foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item 4.6. Ao total, foram realizados quinze ensaios.

As curvas de distribuição dos ensaios com o material G1 – sem solicitações; com 5% de deformação em uma direção; 5% de deformação em duas direções; sem deformação, confinado; e com 5% de deformação em uma direção, confinado – obtidas são apresentadas nas Figuras 5.42 a 5.46. As curvas dos demais ensaios são apresentadas no Anexo II.

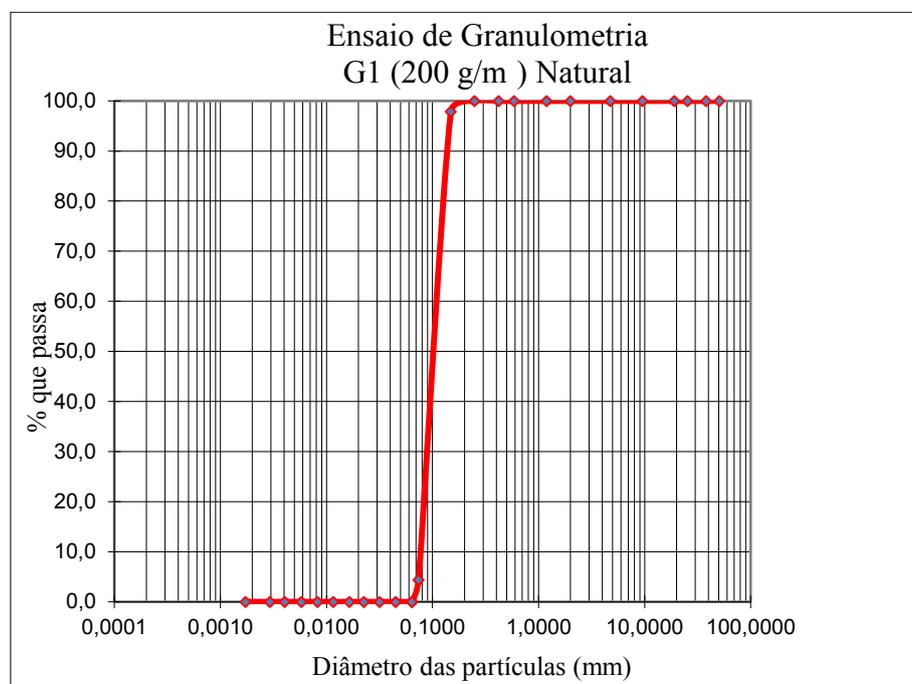


Figura 5.42. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) natural – ensaio com microesferas.

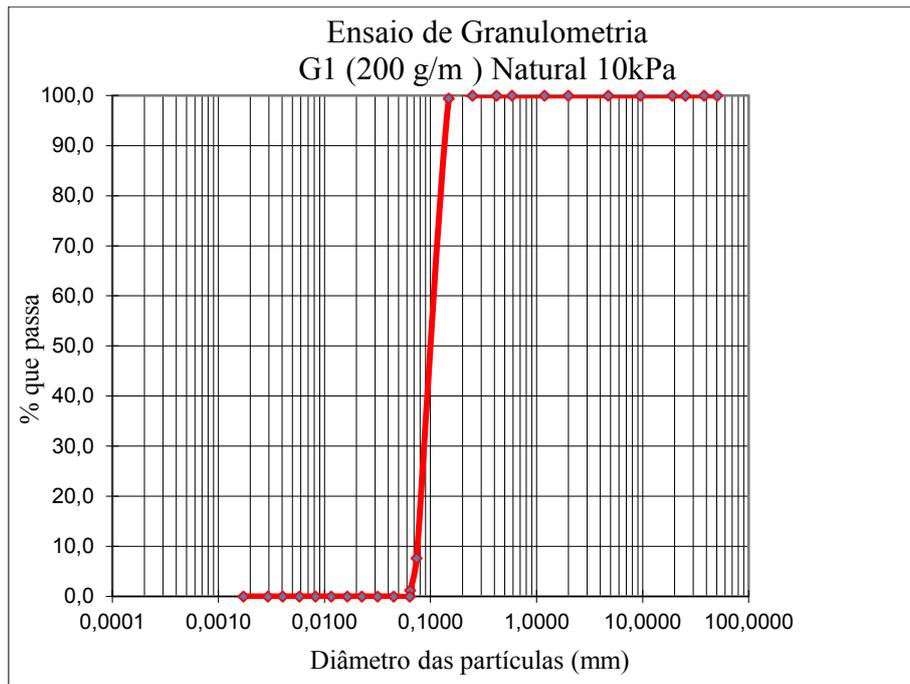


Figura 5.45. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, sem deformação – ensaio com microesferas.

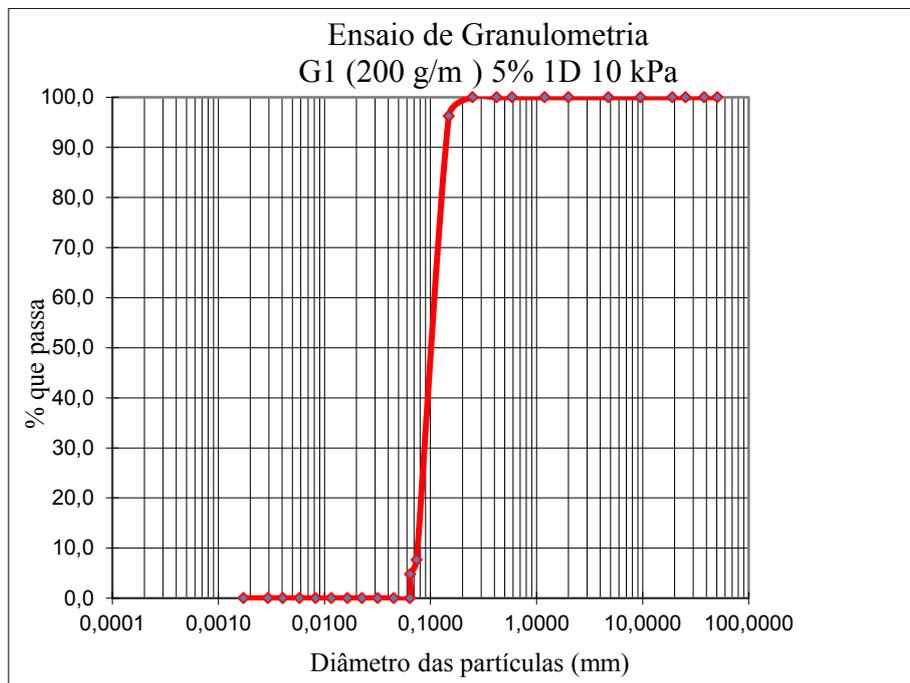


Figura 5.46. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.

Os valores de O_{98} e O_{95} encontrados são sumariados abaixo nas Tabelas 5.14 e 5.16. As Tabelas 5.15 e 5.17 repetem alguns dados também apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.11, com o intuito de facilitar as comparações. Os valores encontrados nos ensaios de ponto de bolha e os valores encontrados ensaios com microesferas de vidro mostraram-se satisfatoriamente similares, conforme mostra a Figura 5.47.

Ao analisar somente os níveis de deformação, a maior variação foi encontrada em situações que a deformação foi mais elevada. Ao comparar os três materiais, a maior variação foi encontrada no geotêxtil G3 – 600 g /m .

Tabela 5.13. Valores de O_{98} (mm) a partir dos ensaios com microesferas de vidro.

Tensão (kPa)	G1						G2			G3		
	Deformação (%)						Deformação (%)			Deformação (%)		
	Nat.	1D			2D		Nat.	1D	2D	Nat.	1D	2D
		5	10	20	5	10		5	5		5	5
0	0,150	0,160	0,180	0,190	0,180	0,190	0,130	0,140	0,160	0,100	0,130	0,140
10	0,130	0,150			0,150							

Tabela 5.14. Valores de O_{98} (mm) a partir dos ensaios de ponto de bolha - reprise.

Tensão (kPa)	G1						G2			G3		
	Deformação (%)						Deformação (%)			Deformação (%)		
	Nat.	1D			2D		Nat.	1D	2D	Nat.	1D	2D
		5	10	20	5	10		5	5		5	5
0	0,147	0,174	0,186	0,204	0,191	0,219	0,139	0,154	0,163	0,108	0,140	0,144
10	0,123	0,137			0,126							

Tabela 5.16. Valores de O_{95} (mm) a partir dos ensaios com microesferas de vidro.

Tensão (kPa)	G1						G2			G3			
	Deformação (%)						Deformação (%)			Deformação (%)			
	Nat.	1D			2D			Nat.	1D	2D	Nat.	1D	2D
		5	10	20	5	10	5		5	5		5	
0	0,140	0,140	0,150	0,180	0,160	0,190	0,120	0,140	0,140	0,090	0,100	0,110	
10	0,110	0,120			0,140								

Tabela 5.17. Valores de O_{95} (mm) a partir dos ensaios de ponto de bolha - reprise.

Tensão (kPa)	G1						G2			G3			
	Deformação (%)						Deformação (%)			Deformação (%)			
	Nat.	1D			2D			Nat.	1D	2D	Nat.	1D	2D
		5	10	20	5	10	5		5	5		5	
0	0,137	0,151	0,152	0,201	0,173	0,213	0,130	0,148	0,151	0,106	0,127	0,132	
10	0,121	0,126			0,136								

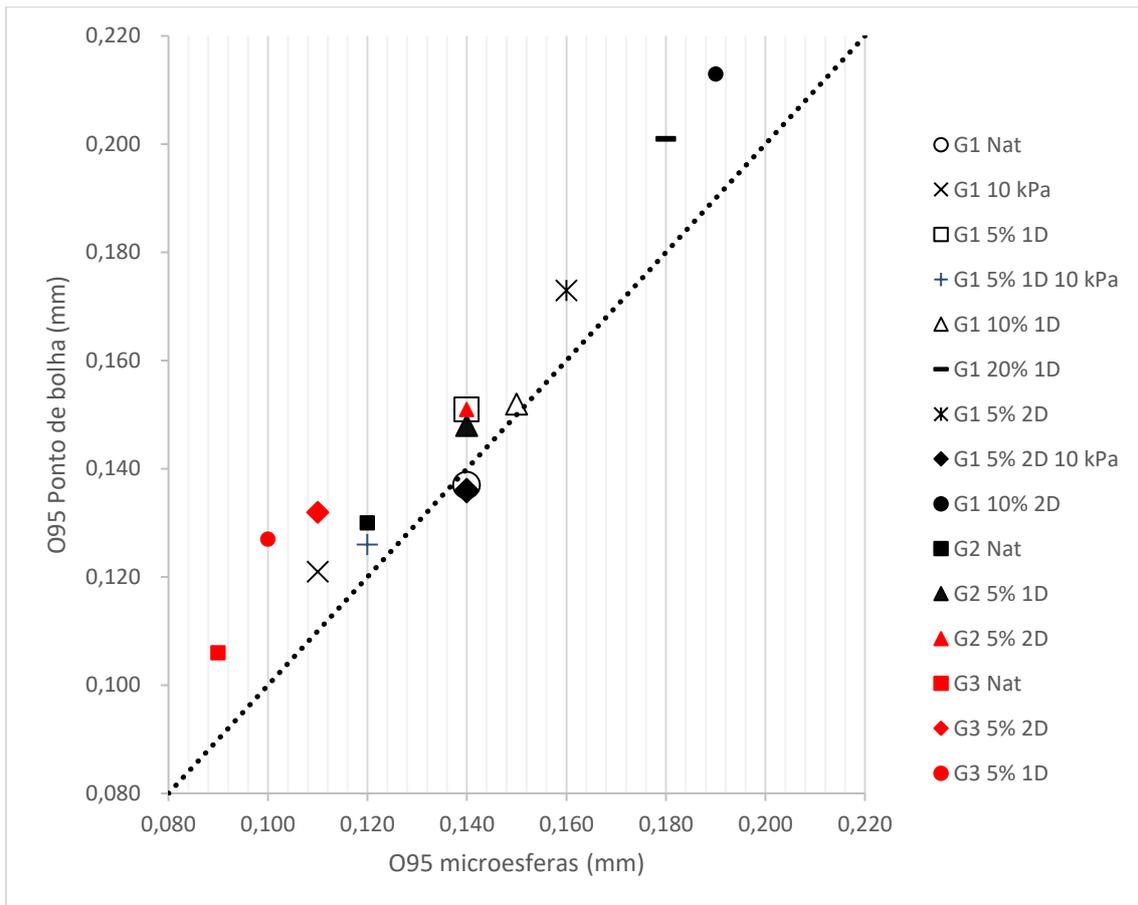


Figura 5.47. Comparação dos valores de O_{95} através dos ensaios com microesferas e O_{95} através dos ensaios de ponto de bolha.

6. CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÕES

O intuito de realização desta dissertação foi compreender melhor a influência de solicitações mecânicas a que os geotêxteis podem ser submetidos quando utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Durante a realização dos ensaios foi possível investigar como determinadas características (gramatura do geotêxtil, confinamento e deformação por tração do geotêxtil) podem afetar as dimensões dos poros dos geotêxteis não tecidos.

Os ensaios para determinação da distribuição de poros dos geotêxteis apresentaram resultados satisfatórios e, mostram a importância de se considerar situações próximas às de campo para melhor especificar filtros geotêxteis em projetos geotécnicos. Ao comparar-se os dados obtidos nos ensaios de ponto de bolha (BBP) com os ensaios de peneiramento com microesferas de vidro, nota-se que as respostas obtidas foram próximas.

Os tamanhos dos poros mostraram-se maiores para o geotêxtil com gramatura de 200 g/m (G1), seguido do geotêxtil com 300 g/m (G2) e por fim, o material com 600 g/m (G3).

Os ensaios também demonstraram que os geotêxteis G1, G2 e G3 quando submetidos a esforços de tração – deformações de 5%, 10% e 20% – apresentaram um aumento da abertura de filtração. O material G3 mostrou maior variação dos valores das aberturas do que os materiais G1 e G2, com aumentos do valor da abertura de filtração em torno de 70% quando aplicada uma deformação de 20% nas duas direções.

Os ensaios permitiram concluir também que um geotêxtil tracionado bidirecionalmente apresentou um valor de abertura de filtração maior do que aquele tracionado unidirecionalmente. O geotêxtil com 200 g/m (G1) apresentou maior variação entre os valores encontrados com deformação em uma direção e com deformação em duas direções. Neste caso, o valor obtido em ensaios com tração bidirecional foi aproximadamente 10% maior do que o obtido em ensaios com tração unidirecional. Os dados adquiridos mostraram-se mais coerentes com os resultados de Wu *et al.* (2008) do que de Wu & Hong (2017).

Quando os geotêxteis G1, G2 e G3 foram submetidos a esforços de confinamento – tensões verticais iguais a 10, 100, 400 e 1000 kPa – concluiu-se que, para uma dada deformação, a

abertura de filtração diminuiu quando se aumentou o confinamento.

No ponto de vista prático de realização dos procedimentos de ensaio de ponto de bolha, julga-se que uma automatização dos equipamentos de obtenção de dados de vazão de ar em conjunto com a pressão aplicada facilitará no desenho das curvas de distribuição dos poros. Quanto maior a quantidade de dados obtidos, menores serão as quantidades de interpolações nas curvas de vazão de ar, e de distribuição dos poros.

O andamento da pesquisa também permite concluir que o equipamento de tração desenvolvido cumpriu os objetivos estabelecidos. Algumas melhorias são sugeridas a seguir.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para pesquisas futuras, pode-se apontar:

- i) Melhorar a automatização do equipamento de ensaios;
- ii) Utilizar medidores de deformação mais precisos no equipamento de tração – a leitura com as réguas auxiliares e com as células de carga foram precisas, mas a inserção destes medidores permitirá leituras de deformações menores. Esta adaptação também permitirá o equipamento obter maior espaço livre entre as garras e os cilindros e conseqüentemente viabilizar leituras de deformações maiores que 20%;
- iii) Realizar ensaios no geotêxtil não tecido com deformações maiores que 20%, buscando entender o comportamento mais próximo à ruptura por tração;
- iv) Realizar ensaios de tração bidirecional no geotêxtil não tecido com deformações diferentes em cada direção;
- v) Realizar ensaios de peneiramento com solos e verificar se a influência da deformação e do confinamento se mantém semelhantes ao obtido em ensaios com microesferas de vidro;
- vi) Investigar a possibilidade de utilização de outros fluidos no ensaio de ponto de bolha;
- vii) Realizar ensaios para analisar a influência da deformação, do confinamento e da impregnação simultaneamente;

- viii) Realizar ensaios de porosimetria e comparar com os ensaios de ponto de bolha;
- ix) Realizar ensaios de microscopia nas amostras de geotêxtil tracionadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2013). Geossintéticos - Determinação da capacidade de fluxo no plano. NBR ISO 12958. ABNT, São Paulo, 9p.
- ABNT (2013). Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área. NBR ISO 9864. ABNT, São Paulo, 3p.
- ABNT (2013). Geossintéticos - Terminologia. NBR ISO 10318. ABNT, Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (2013). Geotêxteis - Determinação da espessura - Método de ensaio. NBR ISO 9863-1. ABNT, São Paulo, 2p.
- ABNT (2013). Geotêxteis – Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. NBR ISO 9862, Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT (2013). Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da abertura de filtração característica. NBR ISO 12956. ABNT, São Paulo, 7p.
- ABNT (2013). Geotêxteis e produtos correlatos — Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento. NBR ISO 11058. ABNT, São Paulo, 18p.
- ABNT (2016). Solo – Análise Granulométrica. NBR ISSO 7181, Rio de Janeiro, 12p.
- Aguiar, P.R. & Vertematti, J.C.(2004). Aplicações em filtração. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Vertematti (Ed.), Editora Edgar Blucher Ltda. ABINT, São Paulo, SP, pp. 175-196.
- ASTM (1991). Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes, ASTM D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216-218.
- ASTM (1994). Standard Terminology for Geosynthetics. Sponsored by ASTM Committee D4439-98 on Geosynthetics
- ASTM (2010). Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, ASTM D 5261. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 3p.
- ASTM (2011). Standard Test Method for Permittivity of Geotextiles Under Load, ASTM D 5493. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 5p.
- ASTM (2012). Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and

- Geomembranes, ASTM D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216-218.
- ASTM (2014). Standard test method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test, ASTM D 6767. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6p.
- Basham, D.L., Wright, J.W., Ferguson, K.I. & Moy, G.W. (2004). Engineering Use of Geotextiles. U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command & Air Force Civil Engineering Support Agency. TM 5-818-8/AFJMAN 32-1030. Washington, D.C., USA. 58 p.
- Bhatia, S.K., Smith, J.L. and Christopher, B.R. (1996). Geotextile Characterization and Pore Size Distribution: Part III. Comparison of Methods and Application to Design, Geosynthetics International, Vol. 3, No. 3, pp. 301-328.
- Campbell, R. P. & Wu, J. T. H. (1994). In-plane flow of four geosynthetics for landfill drainage. ASTM Geotechnical Testing Journal, 17(1): 3-16.
- Carrol, R. G. JR. (1983). Geotextile Filter Criteria in Design Parameters in Geotechnical Engineering. BGS, London, Vol. 2, pp. 121-129.
- Christopher, D. R. & Fischer, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. Geotextiles and Geomembranes, 11: 337-353.
- Corbet, S.P. (1993). The Design and Specification of Geotextiles and Geocomposites for Filtration and Drainage. Geotextiles in filtration and drainage. Corbet, S.P. & King, J. (Eds). Thomas Telford, London, UK, pp. 29-40.
- Costa, C. M., Lodi, P.C., Costa. Y.D. & Bueno, B.S. (2008). Avaliação de Recomendações Normativas sobre o Uso de Ensaio no Controle de Qualidade de Fabricação de Geossintéticos. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, pp. 158-169.
- Elton, D.J., Hayes, D.W., Adanur, S. (2006). Bubblepoint testing of geotextiles: apparatus and operation. ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 30, No. 1:1-8.
- Elton, D.J. & Hayes, D.W. (2007). The Bubblepoint Method for Characterizing Geotextile Pore Size. Geosynthetics in Reinforcement and Hydraulic Applications. ASCE, 10p.enoble 1, France, 344 p.
- Eun, J.W. & Tinjum, J.M. (2011). Variation in Air Entry Suction of Nonwoven Geotextiles

- with Pore Size Distribution. *Unsaturated Soils: Theory and Practice* - Jotisankasa, Sawangsuriya, Soralump and Mairaing (Editors), Kasetsart University, Thailand, p.p.553-558.
- Fischer, G.R., Holtz, R.D. and Christopher, B.R.(1995), "Characteristics of Geotextile Pore Structure", *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*, Bhatia, S.K. and Suits, L.D., Editors, ASTM Special Technical Publication 1281, proceedings of a symposium held in Denver, Colorado, USA, June 1995, in press.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1999). Transmissivity of geosynthetics under high normal stresses. *Geosynthetics'99*, Boston, Massachusetts, USA, 2: 769-782.
- Gardoni, M.G.. & Palmeira, E.M (2002). Microstructure and Pore Characteristics of Synthetic Filters Under Confinement. *Geotechnique*, Vol. 52, No. 6, p. 405-418.
- Gardoni, M. G. A. (1995). Avaliação da Aplicabilidade de Ensaio de Laboratório e Critérios de Filtros para a Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal. *Dissertação de Mestrado*, Publicação G.D.M-024A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 177 p.
- Gardoni, M. G. A. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. *Tese de Doutorado*, Publicação G.T.D-003A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313p.
- Gardoni, M. G. A., Palmeira, E. M. & Mlynarek, J. (2000). Influence of vertical stresses on the hydraulic behaviour of nonwoven geotextiles. *Proceedings of the Third International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering – GeoFilters'2000*, Warsaw, Poland, 1: pp.127-133.
- Giroud, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. *Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 3-27. BUSCAR EN 2005 PA VER SI TIENEN LO MISMO.
- Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. *Geofilters'96*. J. Lafleur & Rollin A.L. (eds.). Montreal. Quebec. Canada, pp. 565-678.
- Gourc, J. P. (1982). Quelques Aspects du Comportement des Géotextiles en Mécanique des

- Sols. Thesis Dr. Sciences, IRIGM, University Joseph Fourier, Grenoble, France, 250 pp.
- GMA, (2002). Handbook of Geosynthetics. Geosynthetics Materials Association. USA, 64p.
- Holtz, R.D, Christopher, B.R. & Berg, R.R. (1997). Geosynthetic Engineering. BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C., 452p.
- Holtz, R. D., Christopher, B. R. & Berg, R.R. (1998). Geosynthetic design and construction guidelines. Participant Notebook. U.S. Federal Highway Administration FHWA. Washington, D.C., pp. 31-54.
- IGS (2000). Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols. South Carolina, U.S.A. 17 p.
- John, N.W. (1987). Geotextiles. Blackie and Son. Glasgow, New York. USA. 347 p.
- Kenney, T.C.; Chahal, R.; Chiu, E.; Ofoegbu, G.I.; Orange, G.N. & Ume, CA. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, 22: 3243.
- Kenney, T.C. & Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal (22): 215–225.
- Koerner, R. M. (2005). Designing with Geosynthetics, fifth Edition, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, pp 29-157.
- Lafleur, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. Geotextiles and Geomembranes, (17), pp. 299-312.
- Lafleur, J. & Rollin, A. (1983). "Discussion of "Filter Criteria for Geotextiles: Relevance and Use" by Chris R. Lawson (October, 1982)." Journal of Geotechnical Engineering., 109(12), pp.1630–1632.
- Lima, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Muñoz, C.S. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 119p.
- Palmeira, E.M. (2003). Notas de Aula de Ensaio em Geossintéticos, Propriedades de Filtração, Determinação da Abertura de Filtração de Geotêxteis. Departamento de Engenharia Civil,

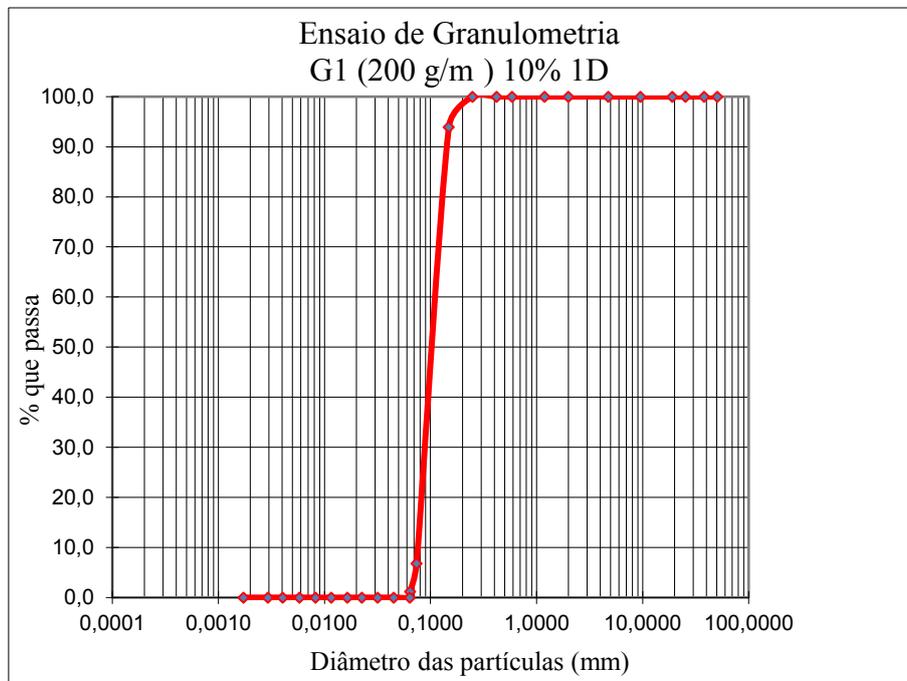
Universidade de Brasília, Brasília, DF, 39p.

- Palmeira, E.M. & Fannin, R.J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration – Keynote Lecture. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, vol. 3, pp. 853-870.
- Palmeira, E.M. Fannin, R.J. & Vaid, Y.P. (1996). A study on the behavior of soil-geotextile systems in filtration tests. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, December, p. 899-912.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2000a). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. Geosynthetics International 7 (4–6), 403–431.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2000b). Geotextiles in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges. In: Mallek, A. (Ed.), International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85–110.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. Geotextiles and Geomembranas 20(2), pp. 97-115.
- Palmeira, E.M., Gardoni, M.G. & Bessa da Luz, D.W. (2005). Alguns aspectos ligados ao comportamento de sistemas filtro-drenantes sintéticos em obras de estabilização de encostas. IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - Salvador-BA. Pp.287-300.
- Palmeira, E.M., Beirigo, E.A. & Gardoni, M.G. (2010). Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. Geotextiles and Geomenbranes, Vol. 28, N.2, pp. 136148.
- PAVCO . (2012). Manual de diseño con geosintéticos. Departamento de Ingeniería, 9ª edición, Colombia, 434p. Perez Ones, Osney; Diaz Rodriguez, Jorge; Zumalacarregui, Lourdes & Goza Leon, Osvaldo. Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (II). Rev.fac.ing.univ. Antioquia [online]. 2010, n.52, pp. 62-74. ISSN 0120-6230.
- Ribeiro, L.F., (2013). Notas de Aula de laboratório de geotecnia, ensaio de permeabilidade. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 14p.
- Rigo, J. M., Lhote, E, Rollin, A. L., Mlynarek, J., and Lombard, G. (1990). Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination, Geosynthetics: Microstructure and

- Performance, ASTM STP 1076, I. D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 90-101.
- Rollin, A.L. & Lombard, G.(1988). Mechanisms Affecting Long-Term Filtration Behavior of Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 7, pp. 119-145.
- Rollin, A. L., Masounave, J. & Dallaire, G. (1977). Study of the hydraulic properties of nonwoven fabrics. *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics Geotechnics*, Paris, pp. 201-206
- Rollin, A. L., Masounave, J. & Lafleur, J. (1982). Pressure drop through nonwoven geotextiles. A new analytical model. *Second International Conference on Geotextile*, Las Vegas, USA, pp. 161-166.
- Shober, W. & Teindl, H. (1979). Filter Criteria for Geotextiles. *Design Parameters Geotechnical Engineering*, BGS, London, 2: 121-129.
- Shukla, S. K. & Yin, J. H. (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. Taylor & Francis Group, London, UK, pp 47-96.
- Silva, A. M. (2014). Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento. Tese de mestrado, Publicação G.DM – 247/2014 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.
- Spada, J.L. (1991). Ensaio de Filtração em solos com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 180 p.
- Tatto, J. (2010). Comportamento Filtrante de Geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-186/10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.
- Trejos, H. (2016). Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-263/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.
- Vertematti, J.C. (2001). Curso básico de geotêxteis, ABINT, São Paulo, SP, pp.7-49.
- Wu, C.S., Hong, Y.S. (2017). The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and flow capability of needle-punched nonwoven geotextiles. *Geosynthetics International* 23, n° 6, 422 – 434.

Wu, C.S., Hong, Y.S., Wang, R.H. (2008). The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 250 – 262.

Os demais gráficos com os valores dos tamanhos dos poros obtidos através dos ensaios com microesferas são apresentados a seguir.



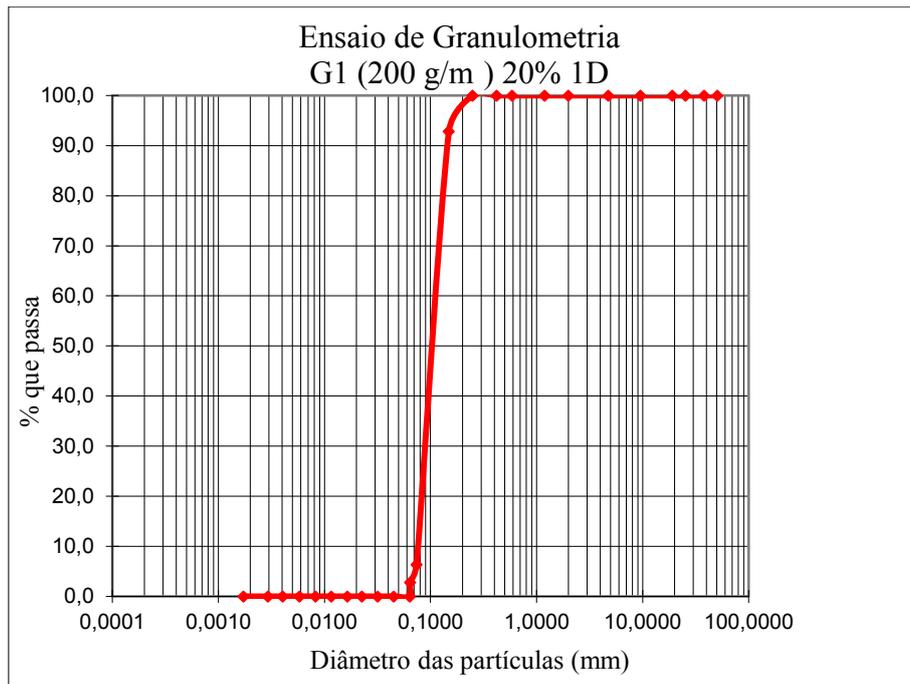


Figura II-2. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) com deformação de 20%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.

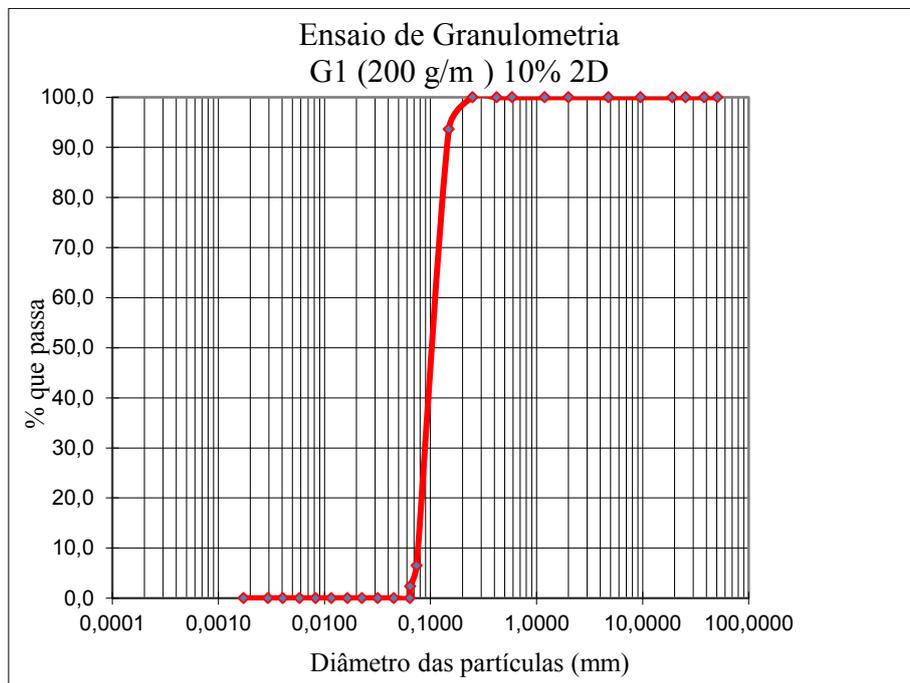


Figura II-3. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) com deformação de 10%, tracionado em duas direções – ensaio com microesferas.

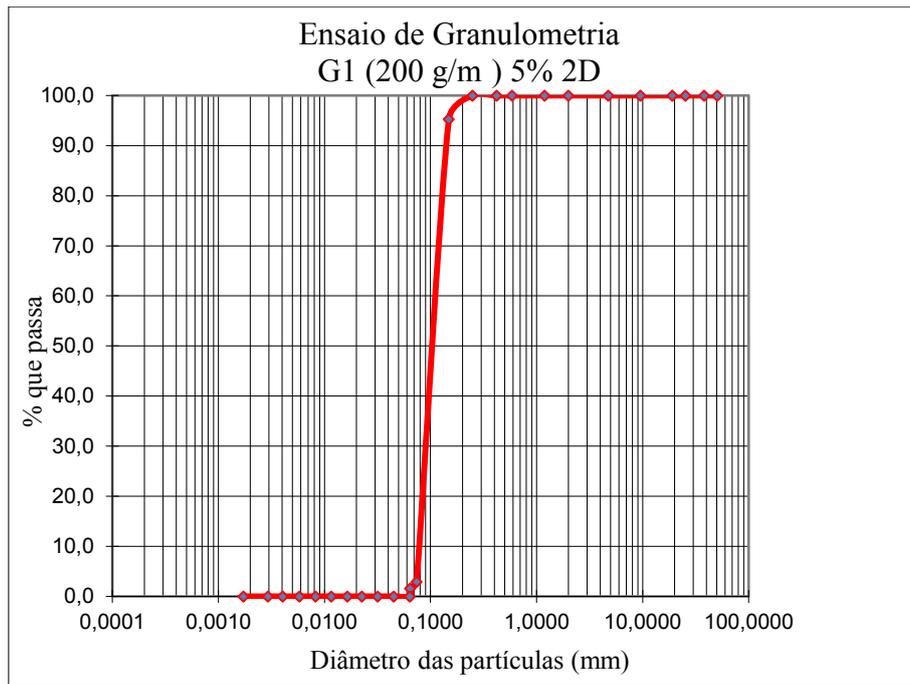


Figura II-4. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G1 (200 g/m) confinado, com deformação de 5%, tracionado em duas direções – ensaio com microesferas.

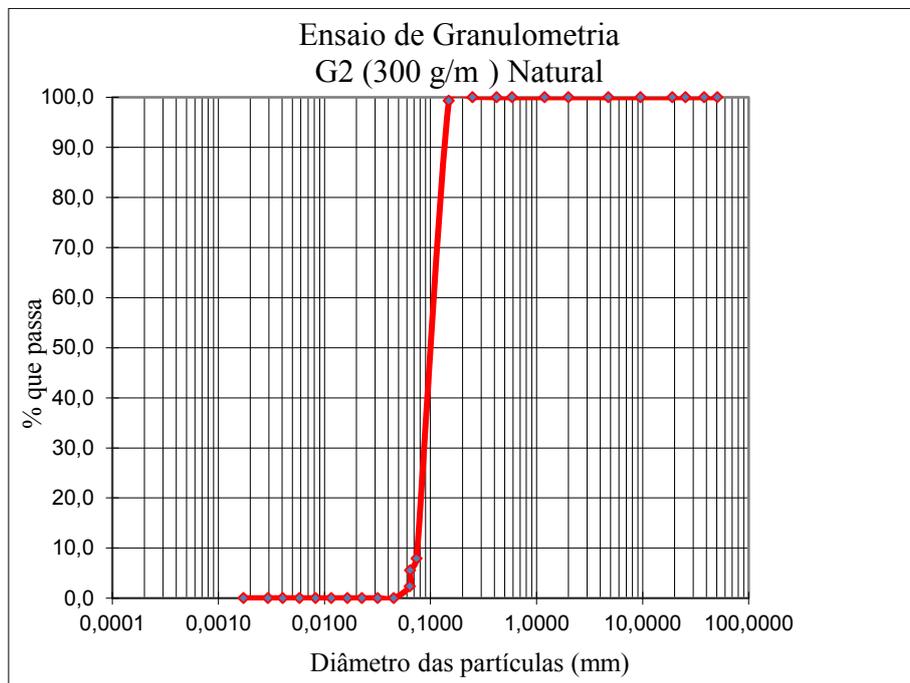


Figura II-5. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) natural – ensaio com microesferas.

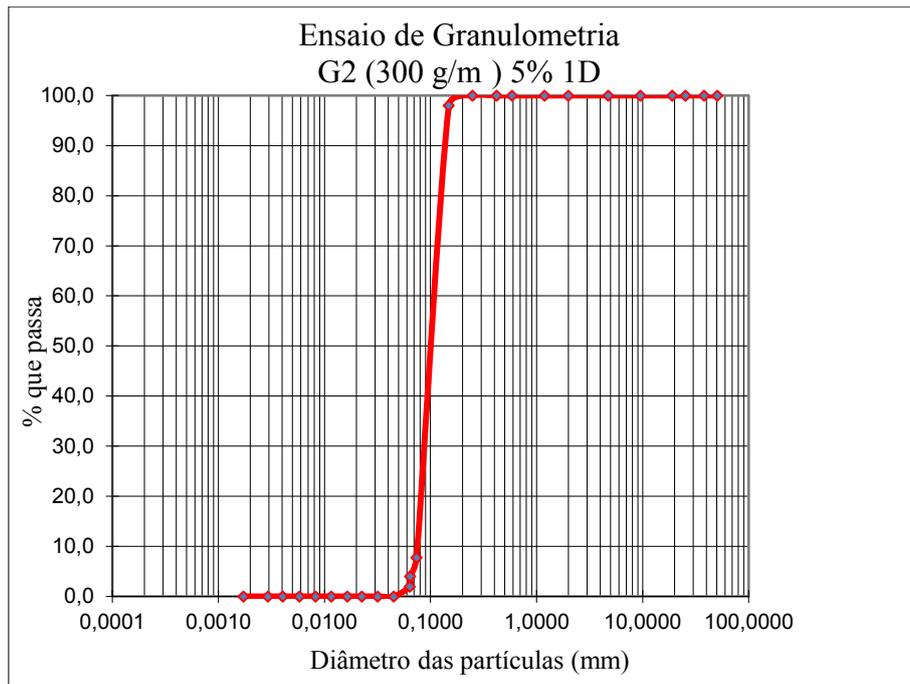


Figura II-6. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) com deformação de 5%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.

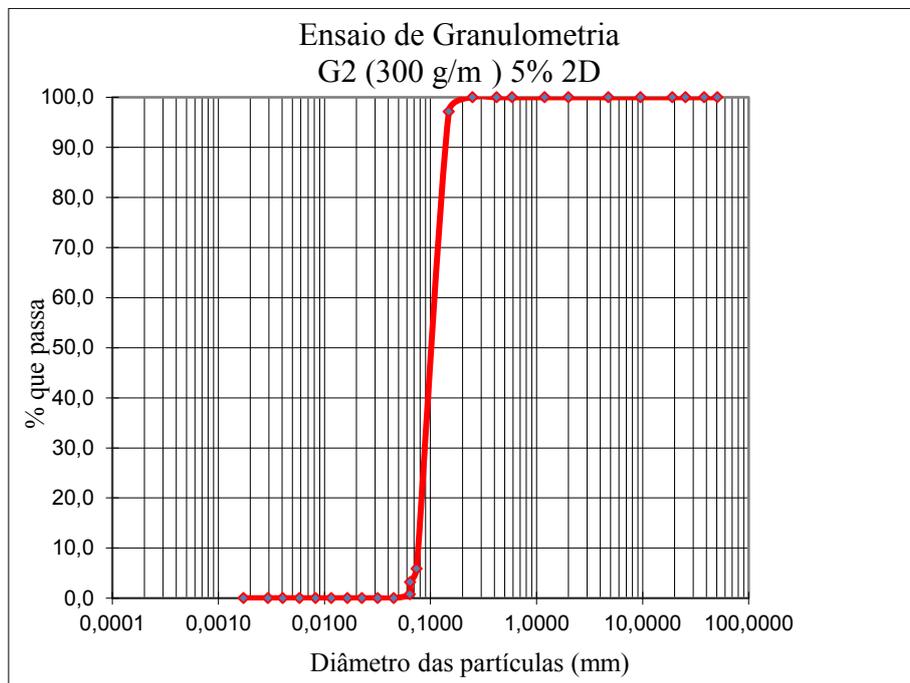


Figura II-7. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G2 (300 g/m) com deformação de 5%, tracionado em duas direções – ensaio com microesferas.

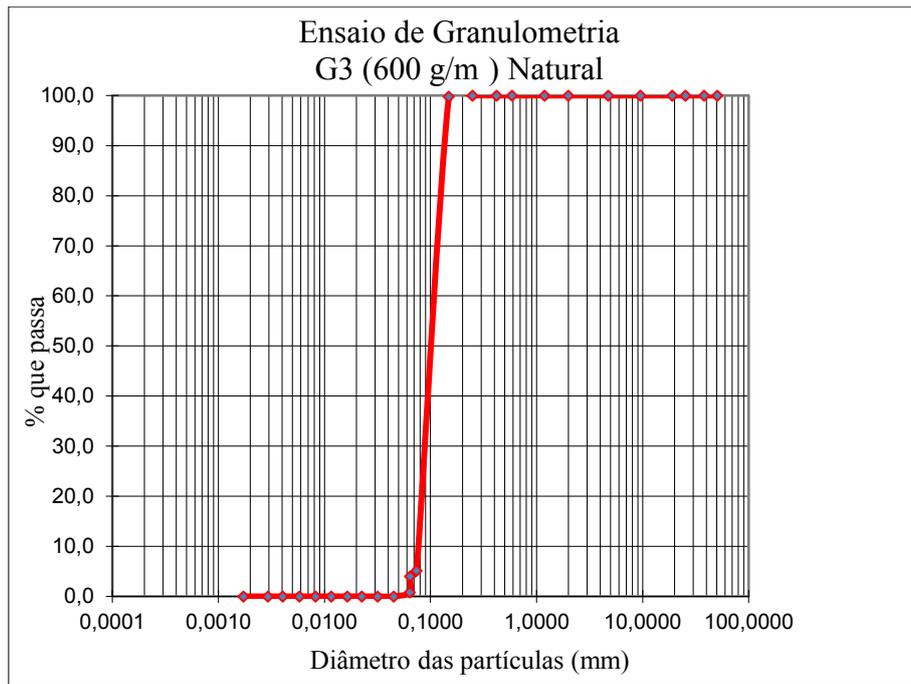


Figura II-8. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) natural – ensaio com microesferas.

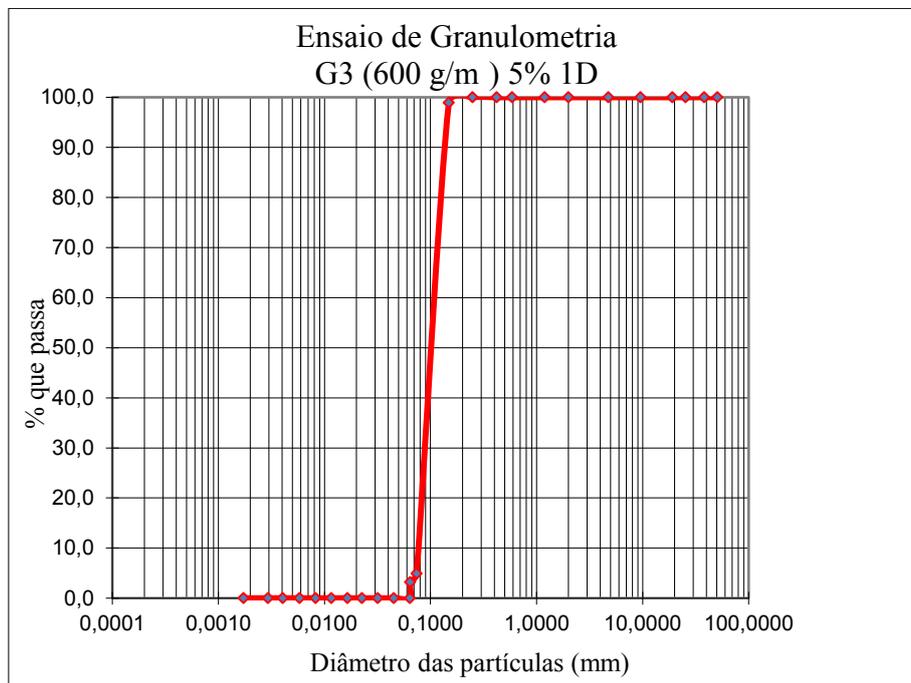


Figura II-9. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) com deformação de 5%, tracionado em uma direção – ensaio com microesferas.

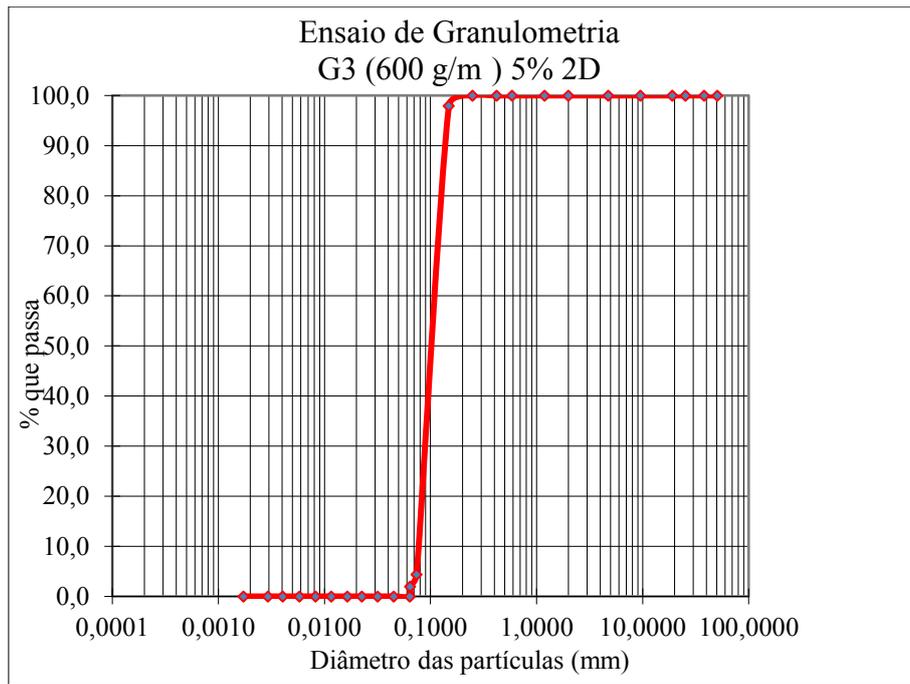


Figura II-10. Curva de distribuição dos poros do geotêxtil G3 (600 g/m) com deformação de 5%, tracionado em duas direções – ensaio com microesferas.