

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

**ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB CONFINAMENTO**

ANDRESSA MESSIAS DA SILVA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 247/2014

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2014

AGRADECIMENTOS

É de conhecimento de todos que a realização de um trabalho experimental exige muito tempo, paciência, dedicação e, principalmente, ajuda. Ajuda de pessoas que foram essenciais não apenas para realização deste trabalho, mas também para meu amadurecimento acadêmico e pessoal. Pessoas estas que foram indispensáveis e que se não estivessem presentes, não seria possível a realização desta obra.

Agradeço primeiramente à Deus que me criou e que vem me guiando todos os dias da minha vida, Ele tornou possível a realização de tudo e que colocou as pessoas certas na minha vida. Agradeço aos meus pais Abias e Josefa; e irmãos Anderson, Alysson e Andrews; donos do meu coração e de toda a minha mais profunda admiração. Meus queridos e amados sempre dispostos a me ajudar, não importando o momento, dificuldade ou distância. Agradeço ao meu amado Agustín que sempre me reservou palavras de atenção, amor e carinho, se fazendo presente sendo paciente e me dando ânimo durante toda a árdua trajetória, não importando a distância. Agradeço aos meus queridos amigos e irmãos de coração Yuri e Erich por trilharem comigo toda a jornada do mestrado me ajudando nas horas de grande desespero e dúvidas, estando ao meu lado em praticamente todos os momentos, fazendo o processo se tornar o mais prazeroso possível. Agradeço à Ivone e Maria Felix que cuidaram de mim durante todo o processo, sendo extremamente prestativas e me tratando como uma filha.

Devo sinceros agradecimentos à todos professores do mestrado, por se oferecerem com toda calma tentando nos passar da melhor forma o conhecimento adquirido por eles. Agradeço ao professor Manoel por me ajudar na escolha do mestrado em Geotecnia, algo que hoje vejo como uma ótima decisão. Agradeço imensamente ao meu querido orientador, o professor Ennio, extremamente prestativo, presente e eficiente, sempre esclareceu minhas dúvidas com calma, paciência e atenção. Sem ele nada disso seria possível.

Agradeço à Janaina Tatto pelo material fornecido e pela compreensão na hora de me ensinar a utilizar os equipamentos durante a execução dos ensaios. Agradeço ao Jaime Obando por sempre estar presente, com muita paciência para me aconselhar e me ajudar com materiais como o cilindro hidráulico e a estrutura de reação. Agradeço ao seu João por me doar madeira para usar como base do meu manômetro. Agradeço ao seu Silvio por me ajudar com seu

conhecimento, além disso me ajudar a perfurar placas de madeira. Agradeço aos técnicos Simon, Thiago e Jonas por me ajudarem quando eu já não tinha mais forças e por me animarem nos momentos de trabalho no laboratório. Agradecimentos especiais ao Simon que me salvou da picada de um escorpião, sem ele não tenho certeza se estaria aqui hoje para contar a história.

Agradeço imensamente à empresa Fluke por oferecer desconto na compra do equipamento Fluke 922, que foi essencial na medição de fluxo de ar, temperatura e pressão. Este equipamento foi fundamental para obtenção dos resultados. Isso mostra a relevância do incentivo que empresas privadas dão à instituições de pesquisa brasileiras.

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

**ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB CONFINAMENTO**

ANDRESSA MESSIAS DA SILVA

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

APROVADA POR:

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

**GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS, D.Sc. (UPE/POLI)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 11 DE DEZEMBRO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, ANDRESSA MESSIAS DA. S586a	
Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento / Andressa Messias da Silva – 2014.	
xxi, 129 p., : il.; 30 cm	
Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2014.	
Orientação: Ennio Marques Palmeira.	
Inclui bibliografia.	
1. Geossintéticos	2. Geotêxteis
3. Filtros e filtração	4. Drenagem
I. Palmeira, Ennio Marques	II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MESSIAS DA SILVA, A. (2014). Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 247/2014, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Andressa Messias da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento.

GRAU / ANO: Mestre / 2014

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.

Andressa Messias da Silva
Setor de Mansões Park Way Qd. 29, Cj:4, Lt:2, Cs:G
CEP: 71746-004 - Brasília/DF - Brasil

“Assim como o ferro sem exercício se oxida, assim como a água se putrefaz, e, no frio, gela, assim também a mente humana, não exercitada, se arruína”

Leonardo da Vinci

Visando sanar os erros na estimativa da capacidade de retenção dos geotêxteis com relação ao confinamento da amostra, foram realizados estudos que tratam da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos de poliéster de 200, 300 e 400 g/m². As atividades propostas foram de natureza experimental e visaram a determinação da abertura de filtração de geotêxteis sob tensão confinante. O equipamento utilizado foi o Teste do Ponto de Bolha, ou *Bubble Point Test* (BBP), que obtém a abertura de filtração do geotêxtil com maior acurácia em relação aos métodos usuais e é um equipamento sofisticado que utiliza o método de intrusão de poros. Esta dissertação explica o funcionamento do equipamento, cita os procedimentos da norma ASTM D6767, mostra alguns casos em que este já foi utilizado e apresenta os materiais empregados. A metodologia expõe os procedimentos básicos de ensaio, tais como: a preparação da amostra de geotêxtil, os procedimentos do ensaio de BBP, os procedimentos do ensaio de aplicação de tensão normal. Análises de espessura sob variação de tensão normal também foram feitas e proporcionaram a avaliação da influência do confinamento do geotêxtil. Assim, foi possível verificar o comportamento de abertura de filtração do geotêxtil como se ele estivesse submetido à determinada tensão normal. Estes valores de abertura de filtração podem ser relevantes para os projetistas que se preocupam com possibilidade de bloqueamento (cegamento) e colmatação dos poros do geotêxtil. Com os dados fornecidos, pode-se realizar uma estimativa com maior acurácia para o cálculo dos critérios de filtro dependendo de cada obra. Isto evitaria a realização de projetos muito conservadores e auxiliaria na escolha do geotêxtil com a abertura de filtração adequada para cada tipo de solo e tensão submetida.

ABSTRACT

In order to correct the errors about estimating the capacity of geotextiles related to the confinement of the sample, studies dealing with the filtration opening size were made in polyester geotextiles with 200, 300 and 400 g/m². The proposed activities were experimental and sought to determine the filtration opening size of geotextiles under confined stress. The equipment used was the *Bubble Point Test* (BBP), which measures the filtration opening size with greater accuracy than the traditional methods and it is a sophisticated device that uses the method of pore intrusion. This dissertation explains the operation of the equipment, the standard procedures by ASTM D6767, some cases where this equipment has been used and indicates the employed materials. The methodology sets the basic testing procedures, such as: sample preparation, the procedures for the test of normal tension, the BBP test procedures. Analysis of thickness variation under normal stress were also made and provided the evaluation of the influence that confinement makes on the sample. Therefore it was possible to verify the behavior of the filtration opening size as if it were submitted to normal stress. These values of filtration opening size may be relevant to the engineers who are concerned with the possibility of blocking (blinding) and clogging the pores of the geotextile. With the data provided in this paper it is possible achieve a more accurate estimation for the calculation of filter criteria depending on each work. This could prevent the realization of very conservative projects and should support in the selection of geotextile with the appropriate filtration opening size to each case of soil and tension.

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO E GEOTÊXTIL	3
2.2	GEOSSINTÉTICOS: RESUMO HISTÓRICO	4
2.3	CONSUMO MUNDIAL DE GEOSSINTÉTICOS.....	4
2.4	CLASSIFICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	6
2.5	FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	8
2.6	PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS EM SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO.....	10
2.6.1	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	10
2.6.2	PROPRIEDADES HIDRÁULICAS.....	22
2.6.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	31
2.6.3.1	CRITÉRIOS DE FILTRO	32
2.6.3.2	CRITÉRIO DE RETENÇÃO	32
2.6.3.3	CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE.....	38
2.6.3.4	CRITÉRIO ANTI-COLMATAÇÃO	39
2.6.3.5	CRITÉRIO DE DURABILIDADE	41
2.6.3.6	COLMATAÇÃO BIOLÓGICA	41
2.7	APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM.....	42
2.7.1	BARRAGEM DE VALCROS – FRANÇA	42
2.7.2	BARRAGEM DE TUCURUÍ – PARÁ / BRASIL.....	43
2.7.3	BARRAGEM DE REJEITOS DA COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM	44
2.8	EQUIPAMENTO DO BUBBLE POINT TEST (BBP)	45

2.9	EQUIPAMENTO BUBBLE POINT TEST – LIMA (2014)	53
2.10	RESULTADOS DO BUBBLE POINT TEST – LIMA (2014).....	56
3	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	62
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	62
3.1.1	GEOTÊXTEIS.....	62
3.2	ADAPTAÇÕES REALIZADAS NO EQUIPAMENTO BUBBLE POINT TEST 64	
3.3	EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE TENSÃO NORMAL	71
3.4	EQUIPAMENTO DO BUBBLE POINT TEST COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTIL.....	72
4	METODOLOGIA DA PESQUISA	74
4.1	PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO	74
4.1.1	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTIL	74
4.1.2	PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DO BUBBLE POINT TEST.....	78
4.2	PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE APLICAÇÃO DE TENSÃO NORMAL 79	
4.3	PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE BUBBLE POINT TEST COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTIL	81
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	83
5.1	ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO NOVO MANÔMETRO SENDO ÁGUA O FLUIDO DE SATURAÇÃO	83
5.2	ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO O FLUKE 922 SENDO ÁGUA O FLUIDO DE SATURAÇÃO	89
5.3	ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO O FLUKE 922 COM ETANOL COMO FLUIDO DE SATURAÇÃO.....	98
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ABERTURA DE FILTRAÇÃO – ÁGUA VERSUS ETANOL	107
5.5	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE ESPESSURA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL.....	107

5.6 AVALIAÇÃO DE ESPESSURA MÉDIA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL.....	110
5.7 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO GEOTÊXTIL	111
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Peso específico dos materiais poliméricos (modificado de Shukla, 2002).	12
Tabela 2.2 Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000b).	33
Tabela 2.3 Critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b).	39
Tabela 2.4 Tabela de fluidos de saturação utilizados no Bubble Point* (ASTM, 2011).	53
Tabela 2.5 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis (Lima, 2014)..	60
Tabela 3.1 Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados	62
Tabela 3.2 Especificações do Fluke 922	67
Tabela 5.1 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.....	89
Tabela 5.2 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.....	97
Tabela 5.3 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.....	106
Tabela 5.4 Comparação entre resultados de abertura de filtração – água versus etanol.....	107
Tabela 5.5 Verificação da não influência da tela metálica e da costura na obtenção de dados de abertura de filtração.	111
Tabela 5.6 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis simulando diversas tensões.	120
Tabela 5.7 Comparação dos valores de abertura de filtração sob confinamento em relação à faixa granulométrica de solo.	121
Tabela 5.8 Variação percentual de diminuição da abertura de filtração em função do aumento de confinamento.	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de classificações dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).	7
Figura 2.2 Esquema de funções dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).	9
Figura 2.3 Aplicações de geotêxteis em obras de filtração e drenagem: (a) drenagem subsuperficial, (b) adensamento de solo mole, (c) barragem de terra (Gardoni, 2000).	10
Figura 2.4 Variação da espessura com a tensão (modificado de Faure <i>et al.</i> , 1990).	11
Figura 2.5 Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com a tensão vertical (modificado de Giroud, 1996).	13
Figura 2.6 Tamanho de constrição em arranjos de esferas (modificado de Kenney <i>et al.</i> , 1984).	13
Figura 2.7 Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).	14
Figura 2.8 Caminhos de filtração (modificado de Giroud <i>et al.</i> , 1998).	15
Figura 2.9 Curva de distribuição de tamanhos de constrição (C) e curva de distribuição de tamanhos de abertura (O) para um geotêxtil não tecido (Giroud <i>et al.</i> , 1998).	16
Figura 2.10 Curvas de distribuição do tamanho de abertura: (1) infinitamente espesso; (2) espesso; (3) fino; (4) infinitamente fino (Giroud <i>et al.</i> , 1998).	17
Figura 2.11 Representação gráfica das extensões teóricas propostas por Giroud (1996). Onde: (n) = porosidade do geotêxtil; (M_A) = gramatura do geotêxtil; (ρ_f) = massa específica de fibras; (d_f) = diâmetro das fibras do geotêxtil.	19
Figura 2.12 Curvas típicas do ensaio pelo porosímetro.	22
Figura 2.13 Propriedades hidráulicas do geotêxtil não tecido (modificado de Gardoni, 1995).	24
Figura 2.14 Variação da transmissividade de geotêxteis sob condições de tensão de compressão. Onde: i) <i>thickness</i> = espessura; ii) <i>transmissivity test</i> = ensaio de transmissividade; iii) <i>image analyser</i> = analisador de imagens; iv) <i>permittivity test</i> = ensaio de permeabilidade; v) <i>bubble point test</i> = teste do ponto de bolha; vi) <i>normal stress</i> = tensão	

normal; vii) <i>geotextile GA</i> = geotêxtil de 200 g/m ² ; viii) <i>geotextile GB</i> = geotêxtil de 400 g/m ² e ix) <i>geotextile GC</i> = geotêxtil de 600 g/m ² (Gardoni & Palmeira, 1998 e Gardoni & Palmeira, 1999).....	25
Figura 2.15 Leis de permeabilidade propostas para os geotêxteis (Gardoni, 2000).	30
Figura 2.16 Anisotropia de permeabilidade (modificado de Gardoni et al., 1999).....	31
Figura 2.17 Mecanismos de colmatação em filtros de geotêxtil (Palmeira & Gardoni, 2000b).	37
Figura 2.18 Formação de arcos de partículas (modificado de John, 1987 <i>apud</i> Tatto, 2010).	37
Figura 2.19 Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987 <i>apud</i> Tatto, 2010).	38
Figura 2.20 Condição de colmatação física dos geotêxteis (modificado de Hoare, 1982).	40
Figura 2.21 Distribuição do tamanho de partículas de solo.	40
Figura 2.22 Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure et al., 1999).....	43
Figura 2.23 Detalhe da colocação do geotêxtil na barragem de Tucuruí (modificado de Dib & Aguiar, 1986).	44
Figura 2.24 Esquema da seção típica da barragem B-5 (modificado – Montez, 1987).	45
Figura 2.25 Abertura de filtração por intrusão de poros (Palmeira, 2012). Normas de referência: Normas ISO, ASTM 4751.....	45
Figura 2.26 Equipamento do BBP (Eun & Tinjium, 2011).	46
Figura 2.27 Esquema do equipamento para ensaio do Ponto de Bolha (Modificado de ASTM, 2011).....	47
Figura 2.28 Esquema da célula para ensaio do Ponto de Bolha (Modificado de ASTM, 2011).	48
Figura 2.29 Curvas obtidas em testes de ponto de bolha (modificado de Eun & Tinjium, 2011)	50
Figura 2.30 Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha. (modificado de Eun & Tinjium, 2011).....	51
Figura 2.31 Equipamento para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos montado por Lima (2014).	54

Figura 2.32 Detalhes da célula utilizada por Lima (2014) no ensaio de ponto de bolha: (a) célula vazia com a placa perfurada (b) amostra de geotêxtil instalada na célula.	55
Figura 2.33 Fluxômetro utilizado para medição do fluxo de ar – em litros por minuto (LPM) – usado no ensaio do <i>Bubble Point</i>	56
Figura 2.34 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ² (Lima, 2014).....	57
Figura 2.35 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ² (Lima, 2014).....	57
Figura 2.36 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ² (Lima, 2014).....	58
Figura 2.37 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ² (Lima, 2014).....	58
Figura 2.38 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ² (Lima, 2014).....	59
Figura 2.39 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m ² (Lima, 2014).....	59
Figura 3.1 Geotêxteis em bobinas (esquerda) e geotêxteis utilizados como amostra (direita).62	
Figura 3.2 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).....	63
Figura 3.3 Válvula para controle de pressão instalada no Bubble Point Test.....	64
Figura 3.4 Manômetro de ramo aberto construído em laboratório com capacidade de 2 m.c.a.	65
Figura 3.5 Detalhe do manômetro: ambos meniscos se encontram na altura de 1000 mm e indicam o estado inicial do manômetro, onde a pressão é zero.	66
Figura 3.6 Medidor digital Fluke 922	67
Figura 3.7 Placa perfurada com diâmetros variados: A = 2mm; B = 3mm e C = 4mm.....	68
Figura 3.8 Equipamento montado para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos.	69
Figura 3.9 Fonte de ar limpo e pressurizado	69
Figura 3.10 Célula onde é ensaiada a amostra de geotêxtil.	70

Figura 3.11 Dois o’rings posicionados externamente à célula.....	70
Figura 3.12 Coletor de Fluido de saturação à esquerda e Fluke 922 à direita.	71
Figura 3.13 Esquema do equipamento de aplicação de tensão normal (modificado de Tatto, 2010).....	72
Figura 3.14 Telas perfuradas superior e inferior ao geotêxtil para controle da espessura das amostras – durante a realização do ensaio de Bubble Point – simulando diversas tensões. Nas ilustrações também se verifica geotêxtil costurado à tela e agulha utilizada no processo.	73
Figura 4.1 Amostragem de geotêxtil: a) amostra sem irregularidades; b) marcação de 196 quadrados de 150 x 150 mm; c) identificação dos quadrados com números; d) recorte das amostras com números obtidos aleatoriamente.....	76
Figura 4.2 Espécimes de geotêxtil identificados.....	76
Figura 4.3 Identificação das áreas de menor gramatura.....	76
Figura 4.4 Saturação do espécime de geotêxtil em água destilada.	78
Figura 4.5 Esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão (Tatto, 2010).....	80
Figura 5.1 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ²	84
Figura 5.2 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ²	85
Figura 5.3 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ²	86
Figura 5.4 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ²	87
Figura 5.5 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ²	88
Figura 5.6 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m ²	89
Figura 5.7 Vazão de ar versus pressão – Peneira #200.	90
Figura 5.8 Curva de distribuição das aberturas da peneira #200.	91
Figura 5.9 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ²	92
Figura 5.10 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ²	93
Figura 5.11 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ²	94
Figura 5.12 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ²	95
Figura 5.13 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ²	96

Figura 5.14 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m ²	97
Figura 5.15 Vazão de ar versus pressão – Peneira #200.	99
Figura 5.16 Curva de distribuição das aberturas da peneira #200.	100
Figura 5.17 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ²	101
Figura 5.18 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ²	102
Figura 5.19 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ²	103
Figura 5.20 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ²	104
Figura 5.21 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ²	105
Figura 5.22 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m ²	106
Figura 5.23 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 = 200 g/m ²	108
Figura 5.24 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G2 = 300 g/m ²	108
Figura 5.25 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G3 = 400 g/m ²	109
Figura 5.26 Variação da espessura média com a tensão normal para G1 = 200 g/m ² , G2 = 300 g/m ² e G3 = 400 g/m ² (escala horizontal logarítmica).	110
Figura 5.27 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ² confinado.....	112
Figura 5.28 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 200 g/m ² confinado.	113
Figura 5.29 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ² simulando variação de tensão normal.....	114
Figura 5.30 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 300 g/m ² confinado.	115
Figura 5.31 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ² simulando variação de tensão normal.....	116
Figura 5.32 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 400 g/m ² confinado.	117
Figura 5.33 Variação da abertura de filtração O ₉₈ com a tensão normal (escala linear).....	118
Figura 5.34 Variação da abertura de filtração O ₉₈ com a tensão normal (escala logarítmica).	118
Figura 5.35 Variação da abertura de filtração O ₉₅ com a tensão normal (escala linear).....	119

Figura 5.36 Variação da abertura de filtração O_{95} com a tensão normal (escala logarítmica).
..... 119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO.....	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AOS.....	<i>Apparent Opening Size</i> ou abertura de filtração
ASTM.....	<i>American Society of Testing and Materials</i>
BBA.....	<i>BBA NONWOVENS (Fiberweb)</i>
BBP	<i>Bubble Point</i>
C'_u	Coefficiente linear de uniformidade do solo
C_0	Tamanho da menor constrição do geotêxtil
C_{100}	Tamanho da maior constrição do geotêxtil
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
C_D	Coefficiente de arraste
CFGG	<i>French Committee on Geotextiles and Geomembranes</i>
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_{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_c	Distância média entre as constrições
D_c	Constrição ou a menor abertura em um canal de fluxo
D_e	Diâmetro das esferas
d_f	Diâmetro das fibras do geotêxtil
DF.....	Distrito Federal
D_G	Tamanho mínimo do solo
D_I	Tamanho indicativo de solo de base protegido
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FOS.....	<i>Filtration Opening Size</i> ou Abertura de Filtração
g	Aceleração da gravidade
GCL.....	Geocomposto argiloso
GMP	Ensaio para verificação da granulometria do material passante
GR	<i>Gradient Ratio</i> ou Ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes

i	Gradiente hidráulico
I_D	Densidade relativa
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
k_{GT}	Permeabilidade do geotêxtil
k_n	Coefficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
k_p	Coefficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil
k_s	Permeabilidade do solo
L	Comprimento das fibras do geotêxtil
LPM	Litros por minuto
m^2	Metro quadrado
M_A	Gramatura - massa por unidade de área
m.c.a.	Metro de coluna de água
MEV	Microesferas de vidro
mm	Milímetro
N	Número que depende do critério utilizado
NBR	Norma Brasileira
n_{GT}	Porosidade do geotêxtil
O_0	Tamanho da menor abertura de filtração
O_{100}	Tamanho da maior abertura de filtração
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
OP-X	Nome comercial antigo do geotêxtil não tecido
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PT	Poliéster
R_{eg}	Número de Reynolds do meio permeável
S	Grau de saturação
SDC	<i>Sample Delivery Controller</i>
S_s	Superfície específica dos sólidos - relação entre a área do sólido e seu volume

SUCS.....	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
t_{GT}	Espessura da amostra medida
UBC.....	<i>University of British Columbia</i>
UnB	Universidade de Brasília
USACE.....	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
v	Velocidade aparente de fluxo
V	Volume total do geotêxtil
V_v	Volume de vazios do geotêxtil
β	Fator de forma, função da tortuosidade do meio
γ	Peso específico total do geotêxtil
γ_f	Peso específico das fibras
η_w	Viscosidade do fluido
θ	Conteúdo volumétrico de água
ν	Viscosidade cinemática
ρ_f	Massa específica de fibras
ρ_w	Massa específica da água
ξ	Parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio
ψ	Permissividade do geossintético

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O geotêxtil, material sintético utilizado amplamente em projetos de filtros, reforço de solos, obras de contenção, canais e áreas verdes, tem contribuído para solucionar, principalmente, os problemas de drenagem profunda e sub-superficial de rodovias. Este material atua na natureza como um complemento sem, contudo, causar impactos ao meio ambiente. 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.

Para o seu perfeito funcionamento como elemento filtrante, é de fundamental importância o conhecimento da dimensão dos poros e da abertura de filtração do geotêxtil. As técnicas atuais para a determinação destas grandezas se baseiam em ensaios sem confinamento da amostra do geotêxtil, o que não reproduz as reais condições deste material em campo, dado que o mesmo trabalha enterrado. Isto pode provocar consideráveis erros na estimativa da capacidade de retenção de filtros geotêxteis e, assim, conduzir a projetos muito conservadores ou sob condições irreais no que se refere à possibilidade de colmatação do filtro.

Visando sanar esses erros na estimativa da capacidade de retenção dos geotêxteis em função do confinamento da amostra, foram realizados os estudos dessa dissertação, baseada nos seguintes questionamentos: (1) *Qual a variação nas principais propriedades de retenção dos geotêxteis devido ao confinamento da amostra?* (2) *Os projetos realizados atualmente são muito conservadores?*

1.2 OBJETIVOS

As atividades propostas foram de natureza experimental e visaram como objetivo geral a determinação da abertura de filtração de geotêxteis sob tensão utilizando equipamento específico para o ensaio disponível no Laboratório de Geotecnia. Diferentes condições de ensaios e tipos de materiais foram empregados.

Para execução dos experimentos utilizou-se o equipamento chamado Teste do Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*). Desta forma objetivos específicos consistiram em analisar as diversas variáveis do sistema filtrante utilizando geotêxtil não tecido em diversas condições de confinamento. Durante a realização dos ensaios foi possível variar diversos parâmetros, entre eles: gramatura do geotêxtil, tensão normal, diâmetro, espessura e curva de distribuição de poros do geotêxtil.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação é composta por 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma descrição sucinta da dissertação, mostrando a introdução ao tema, a motivação da pesquisa, os objetivos gerais e específicos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica que serviu como embasamento teórico para um melhor entendimento do tema de estudo e dos próximos capítulos. Este capítulo se inicia com uma breve introdução teórica que trata das propriedades básicas dos geotêxteis: história, consumo, classificações, funções, propriedades hidráulicas e mecânicas. Ainda na introdução teórica, a dissertação mostra a utilização prática da aplicação de geotêxteis em obras de filtração e drenagem. O Capítulo 3 apresenta os equipamentos e os materiais utilizados nos ensaios, suas especificações e propriedades. Neste capítulo, é possível obter informações sobre as mudanças realizadas no equipamento do *Bubble Point Test*. No Capítulo 4 é possível verificar a metodologia empregada na pesquisa, onde são descritos os procedimentos para a preparação do geotêxtil e posterior obtenção da curva de distribuição de poros do geotêxtil. O Capítulo 5 descreve os resultados e as análises, levando-se em conta a variação do confinamento e da gramatura do geotêxtil nos resultados obtidos. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreender de forma mais ampla as atividades do presente trabalho, faz-se necessário apresentar o embasamento teórico sobre o tema. Nessa parte da dissertação, apresenta-se: as definições do material geotêxtil e dos geossintéticos, um breve resumo histórico dos geossintéticos, o atual consumo de geossintéticos no mundo, a classificação e funções dos geossintéticos, a aplicação de geotêxteis em sistemas de drenagem e filtração, o conceito de abertura de filtração, a discussão de critérios de projeto e os equipamentos desenvolvidos para ensaios em laboratório.

2.1 DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO E GEOTÊXTIL

A palavra ‘geossintético’ surgiu da necessidade de se agrupar um conjunto de produtos industrializados, sintéticos e naturais, utilizados na resolução de problemas no ramo da geotecnia. Segundo a ASTM D4439 (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, estes 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).

Segundo Gardoni (1995), os geotêxteis são tecidos permeáveis compostos por fibras sintéticas, flexíveis e finas. Acrescentando aditivos químicos a um polímero, é possível obter um produto que reúna as características adequadas ao processo de fabricação do geotêxtil, podendo o mesmo sofrer amolecimento ou endurecimento sob a ação do calor ou resfriamento, respectivamente (Ingold & Miller, 1988).

No entanto, os geossintéticos, não ficam restritos às fibras constituídas por material plástico, pois existem as fibras naturais, como a juta e o algodão, que podem formar os geotêxteis naturais. Em vários países da Ásia, como, por exemplo, a Índia, o geotêxtil de juta é usado intensamente em quase todas as modalidades da engenharia devido à facilidade de obtenção e do seu baixo custo. Com o tratamento da fibra de juta, visando retardar o ataque biológico, suas propriedades como geotêxtil têm sido potencializadas e comprovadas por inúmeros estudos de laboratório (Rao *et al.*, 1994).

2.2 GEOSSINTÉTICOS: RESUMO HISTÓRICO

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

Segundo Bessa da Luz (2004), após a Segunda Grande Guerra, com o desenvolvimento da indústria petroquímica e a consequente disseminação dos produtos plásticos, iniciou-se a "Era dos Geossintéticos". Alguns anos depois, iniciou-se o desenvolvimento de uma gama fantástica de produtos plásticos e/ou correlatos que tem ajudado a Engenharia Civil a se modernizar, no sentido de melhoria da qualidade, aumento da vida útil da obra, melhor trabalhabilidade, maior rapidez e menores custos.

Na década de 70 existiam apenas poucos tipos de geotêxteis disponíveis. Em 2003 já haviam mais de 250 tipos diferentes de materiais à venda nos Estados Unidos. Já em todo o mundo, este número provavelmente já era superior a 400. O tamanho do mercado de geotêxteis, tanto em termos de produção de metros quadrados quanto seu valor em dólares, indica o tamanho da sua influência. Em 1991, mais de 300 milhões de metros quadrados de geotêxteis e materiais relacionados, como geogrelhas, foram vendidos na América do Norte (Holtz, 2003).

2.3 CONSUMO MUNDIAL DE GEOSSINTÉTICOS

Devido ao fato de geossintéticos serem soluções mais simples em termos técnicos e mais econômicos do que as soluções tradicionais, estes vêm se consolidando como importantes

materiais de construção em vários países ao redor do mundo, o que interfere positivamente na demanda destes produtos.

As atuais pesquisas de mercado indicam a tendência de aumento do consumo anual de geossintéticos. De acordo com Freedonia (2013), a demanda mundial de geossintéticos deverá subir cerca de 9% ao ano, totalizando 5,3 bilhões de m² em 2017.

O aumento de demanda de geossintéticos será beneficiado com o acréscimo de recursos em construção de obras e estradas. Nesse cenário, a crescente preocupação em relação à proteção do meio ambiente e uma maior consciência das vantagens de desempenho dos geossintéticos em suas diversas aplicações impulsionarão a utilização desses materiais. No caso de rodovias, por exemplo, as precauções em relação a possível infiltração de materiais perigosos no solo, bem como o interesse em evitar a erosão e promover a redução dos gastos de manutenção em estradas, irão promover a maior aplicação de geossintéticos nestes tipos de obras.

O mercado da construção civil foi responsável por cerca de um terço das vendas mundiais de geossintéticos em 2012. Além de ser o maior, este mercado deverá registrar os ganhos mais rápidos até 2017. O crescimento foi auxiliado pela expansão contínua da indústria da construção civil em todo o mundo e manteve os investimentos, mesmo em áreas afetadas pela recessão global de 2009 (Freedonia, 2013).

Segundo Freedonia (2013), a China será responsável por cerca de metade de toda a demanda global de geossintéticos em 2017. Isso decorre do avanço de mercado na região asiática, o qual será impulsionado pelo rápido desenvolvimento do mercado chinês, com o consequente aumento do uso de geossintéticos.

Os Estados Unidos são o maior mercado nacional de geossintéticos do mundo, correspondendo a mais de um quinto da demanda mundial em 2012, o que reflete o grande peso desse mercado na economia dos Estados Unidos. Além de ter um admirável setor de construção civil e uma extensa infraestrutura de transporte, os Estados Unidos têm regulamentos de controle ambiental relativamente conservadores em matéria de questões de contenção, os quais continuarão a favorecer o uso de geossintéticos até 2017 (Freedonia, 2013).

2.4 CLASSIFICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem ser classificados genericamente em categorias 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.

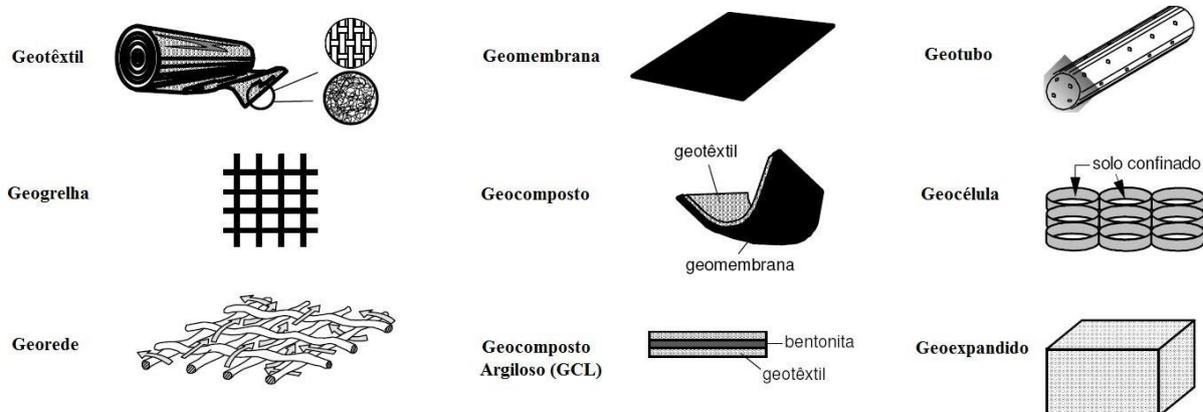


Figura 2.1 Esquema de classificações dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).

2.5 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Atualmente, são numerosas as aplicações dos geossintéticos. Dentre as principais funções que eles exercem pode-se citar (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 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 das estradas.

Filtração: nesse caso, o geossintético desempenha papel similar a 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 ou em associação com o solo para a melhoria das propriedades de resistência e de deformação do solo natural. Por exemplo, geotêxteis são usados na massa de solo de forma a possibilitar paredes de solo reforçado verticais ou aproximadamente verticais. O emprego do reforço possibilita a construção de aterros sobre fundações em solos extremamente moles, bem como de muros íngremes impossíveis de serem viabilizados em solos não reforçados.

Contenção de fluidos e gases: o geossintético atua como uma barreira relativamente impermeável quando visa prover uma camada protetora contra danos ou contaminação de materiais ou geossintéticos subjacentes. Por exemplo, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (GCL) e geotêxteis revestidos são 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 da água. Por exemplo, mantas ou colchões de geossintéticos são 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.

As principais funções dos geotêxteis são apresentadas na Figura 2.2.

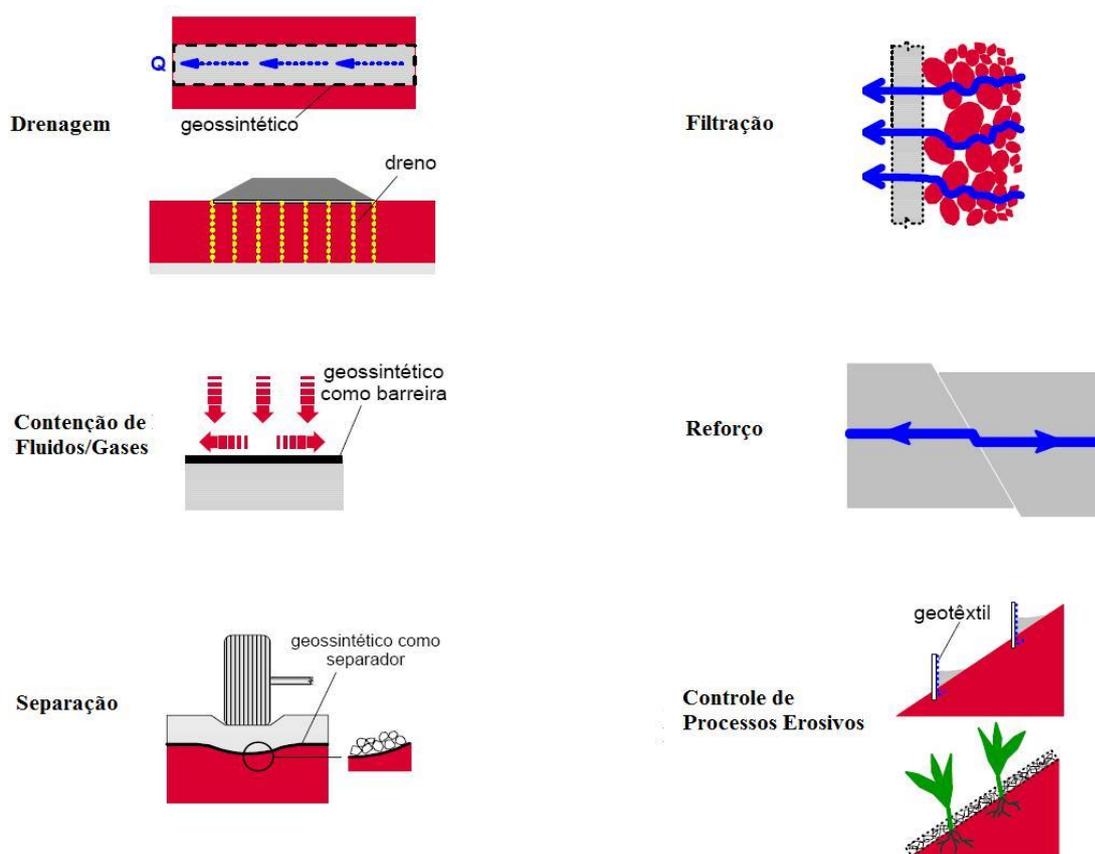


Figura 2.2 Esquema de funções dos geossintéticos (modificado de IGS, 2000 e Palmeira, 2000).

Estas são as funções básicas a que se destinam os geotêxteis, mas em aplicações de engenharia geotécnica, eles poderão servir para mais de uma função. Quando atua como filtro ou dreno, é importante que o geotêxtil possua também resistência suficiente à ruptura para manter a separação do solo com o material granular envolvido e facilitar o trabalho de instalação do sistema no solo (Hoare, 1982).

2.6 PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS EM SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO

Os geotêxteis podem ter a função 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 uma união máxima entre as partículas de solo.
- c) as aberturas do filtro de geotêxtil devem ser apropriadas.

A Figura 2.3 apresenta alguns exemplos de aplicações de geotêxteis em obras com a função de filtração e drenagem.

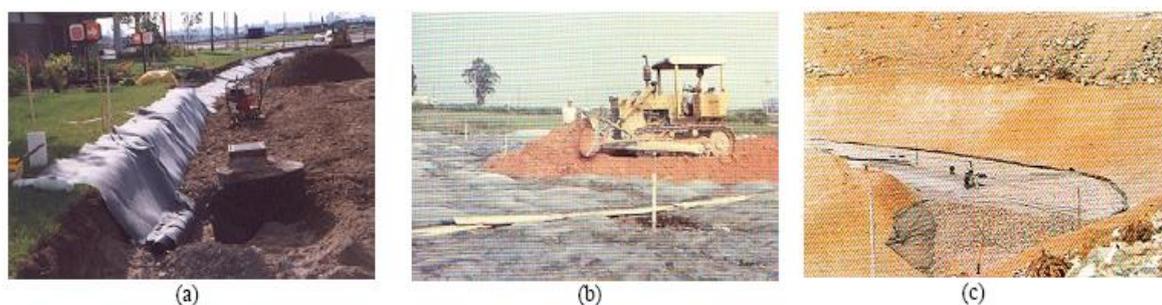


Figura 2.3 Aplicações de geotêxteis em obras de filtração e drenagem: (a) drenagem subsuperficial, (b) adensamento de solo mole, (c) barragem de terra (Gardoni, 2000).

2.6.1 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.

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 pré-estabelecidos, 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). O geotêxtil não tecido é um material com compressibilidade elevada e sua espessura é extremamente dependente da tensão normal aplicada. A espessura dos geotêxteis varia tipicamente de 0,2 a 10 mm, dependendo do produto. A Figura 2.4 exemplifica a dependência da espessura de um geotêxtil não tecido, com gramatura igual a 200 g/m^2 , em relação à tensão normal (Faure *et al.*, 1990).

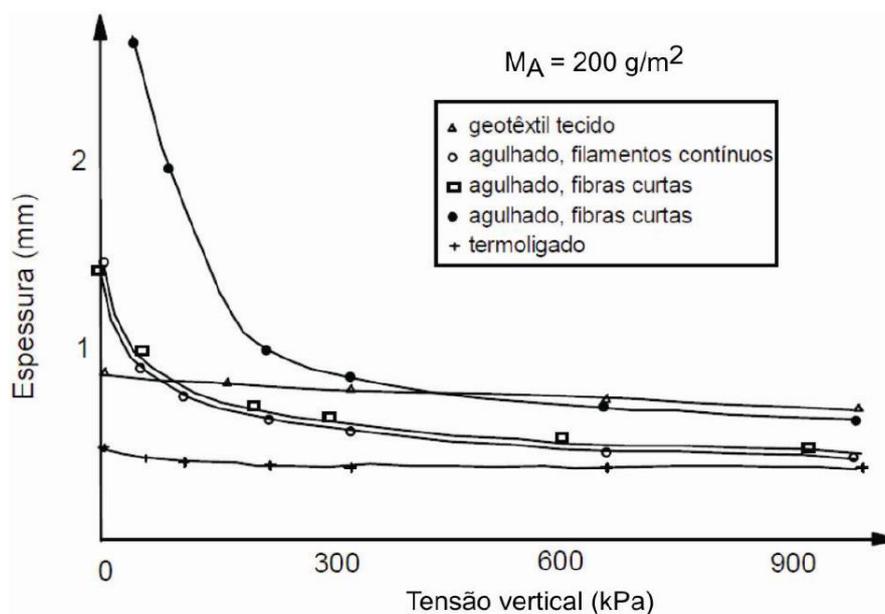


Figura 2.4 Variação da espessura com a tensão (modificado de Faure *et al.*, 1990).

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 2.1.

Tabela 2.1 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, como ilustrado na Figura 2.5. Giroud (1996) apresenta os seguintes valores típicos de porosidade de geotêxteis não tecidos não confinados:

$n_{GT} = 0.9$ para geotêxteis não tecidos agulhados (*needlepunched*);

$n_{GT} = 0.7$ para geotêxteis não tecidos termoligados (*heatbonded*).

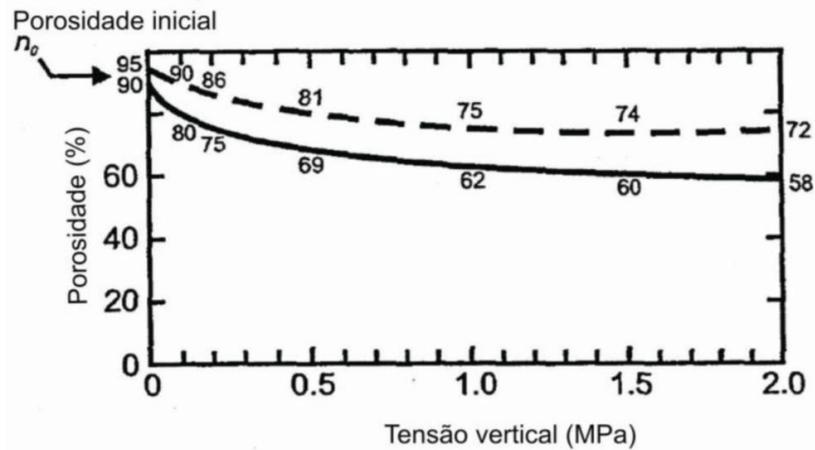


Figura 2.5 Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com a tensão vertical (modificado de Giroud, 1996).

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 constricção (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 2.6.

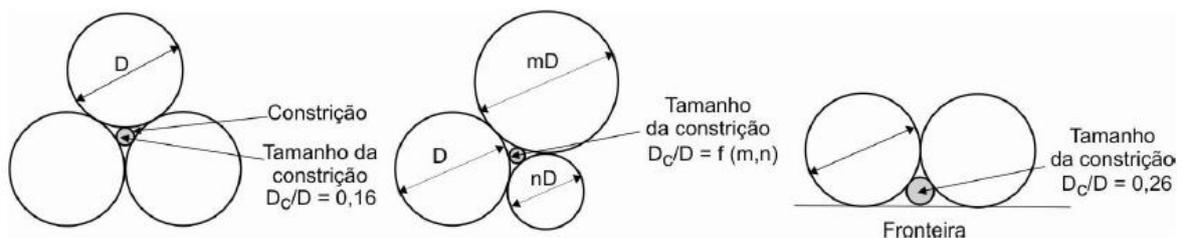


Figura 2.6 Tamanho de constricção em arranjos de esferas (modificado de Kenney *et al.*, 1984).

Devido à geometria tridimensional da manta de geotêxtil, o termo poro não é adequado para designar o espaço entre as fibras. O termo, denominado "*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 constricção será adotada nesta dissertação, significando o tamanho do estreitamento circular.

Assim, para o arranjo uniforme de esferas da Figura 2.6, onde $D_c = 0.16 D$, sendo D o diâmetro das esferas. Para arranjos de partículas mais espaçadas, pode-se antecipar que o tamanho de constrição será maior. Isto induz à constatação de que os tamanhos das constrições, apesar do tamanho dos poros, controlam a capacidade de filtração de um material.

O espaço vazio em um meio granular é uma rede contínua de poros interconectados (Kenney *et al.*, 1984). A Figura 2.6 apresenta um arranjo denso de esferas de diâmetros iguais a D com formato tetraédrico. O espaço entre quatro partículas, denominado poro, pode acomodar uma esfera de diâmetro $0,33 D$ e tem quatro entradas ou saídas, que permitem a passagem de esferas menores do que o diâmetro $0,16 D$. Estas aberturas formam constrições ao longo do caminho de fluxo através do material de filtro. Assim, uma clara distinção pode ser feita entre poros e constrições: um poro é um espaço volumétrico formado entre quatro ou mais partículas e a constrição é uma abertura conectando dois poros. Também no caso de um geotêxtil o significado de poro é diferente do de constrição, pois enquanto a constrição é estritamente definida, um poro é um volume localizado entre as fibras (Giroud *et al.*, 1998).

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 na 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 2.7.

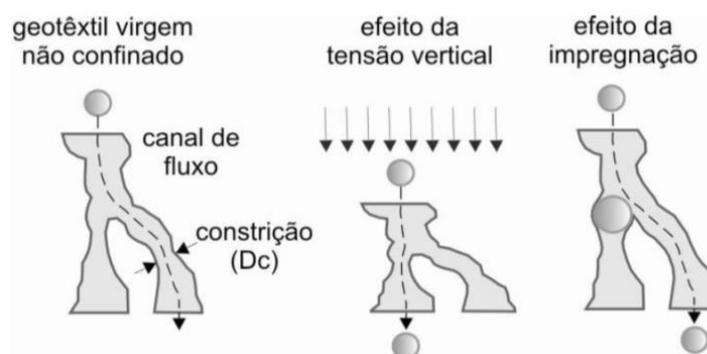


Figura 2.7 Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).

Diversos estudos realizados mostram uma grande dificuldade na determinação da distribuição de poros de um geotêxtil não tecido. Silveira (1965) utilizou o modelo probabilístico para estudar a estrutura granular dos solos, por meio de tratamento por resina. Obtinha-se, assim, um modelo bidimensional e o estudo era feito por meio de análise das imagens obtidas pela observação de lâminas em microscópios. Rollin *et al.* (1977) aplicaram o mesmo procedimento para o geotêxtil, visando a quantificação da permeabilidade e o estudo da colmatação. Estudos posteriores estenderam o procedimento para o estudo probabilístico das partículas que passam através do geotêxtil, estimando a abertura de filtração.

Uma partícula de solo que atravessa um filtro de geotêxtil segue certo caminho de filtração, como mostrado na Figura 2.8. O caminho de filtração é tortuoso, mas sua direção geral é aproximadamente perpendicular ao plano do geotêxtil (Giroud *et al.*, 1998). Nessa trajetória a partícula atravessa constrições até encontrar uma constrição menor do que ela, sendo retida.

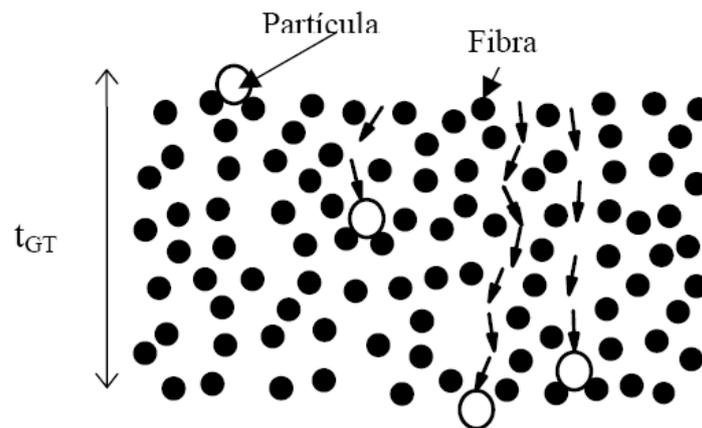


Figura 2.8 Caminhos de filtração (modificado de Giroud *et al.*, 1998).

Considerando o geotêxtil como um conjunto de camadas paralelas espaçadas igualmente, cuja distância média entre as constrições é proporcional ao diâmetro das fibras, Giroud (1996) apresenta a Equação 2.2 para o cálculo da distância média entre duas constrições sucessivas.

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

Onde:

d_c = distância média entre as constrições;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

n = porosidade do geotêxtil.

A curva de distribuição de tamanhos de constrições é uma característica intrínseca do material não tecido que está relacionada com parâmetros, tais como, a porosidade e o diâmetro das fibras. Segundo Kenney *et al.* (1984), a curva de distribuição de constrição é estimada para meios granulares a partir de uma analogia com a curva de distribuição de tamanhos de partículas tradicionalmente usada em engenharia geotécnica. Considerando-se um bloco de geotêxtil contendo um número considerável de constrições, é possível obter as curvas de distribuição de tamanhos de constrições, como mostrado na Figura 2.9 (Giroud *et al.*, 1998).

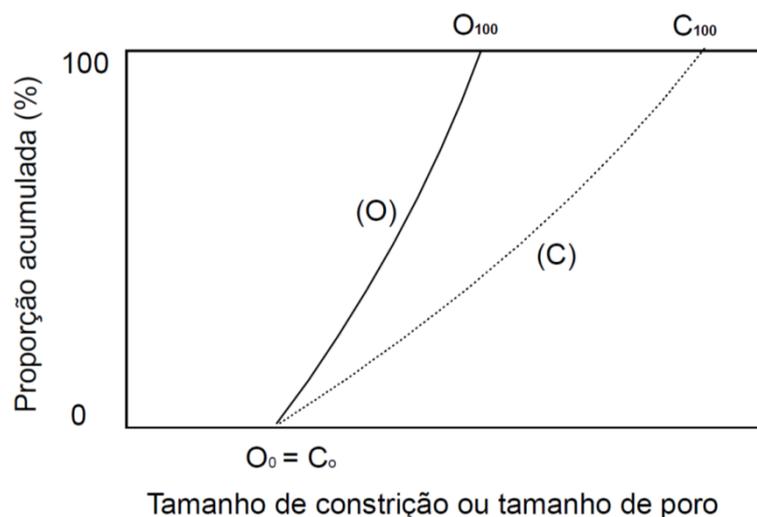


Figura 2.9 Curva de distribuição de tamanhos de constrição (C) e curva de distribuição de tamanhos de abertura (O) para um geotêxtil não tecido (Giroud *et al.*, 1998).

O tamanho de constrição varia na faixa correspondente a C_0 , o tamanho da menor constrição, até C_{100} , o tamanho da maior constrição no material considerado, onde 100% das constrições são menores ou iguais a C_{100} . Segundo Giroud *et al.* (1998), a consideração de que o menor tamanho de constrição $C_0 = 0$ (as fibras se encontrando em um só ponto) não procede do ponto de vista de filtração, pois a partícula que encontra uma constrição menor não será parada, mas desviada lateralmente. As partículas não seguem necessariamente um caminho reto, selecionando naturalmente o caminho que opõe menor resistência.

Em cada caminho de filtração há uma constrição que é menor do que as demais. Esta constrição determina o tamanho da maior partícula que pode passar através do geotêxtil

seguindo o caminho de filtração considerado. Esta constrição foi denominada, segundo terminologia proposta por Kenney *et al.* (1984) para filtros granulares, de ‘constrição de controle do caminho considerado’.

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

A curva de distribuição de tamanhos de constrição do geotêxtil é uma característica intrínseca do material que constitui o geotêxtil. Enquanto que a curva de distribuição do tamanho de poros é uma característica do geotêxtil (Giroud *et al.*, 1998), a relação entre as duas curvas depende da espessura do geotêxtil como mostra a Figura 2.10. Estudos efetuados (Fayoux & Evon, 1982; Rigo *et al.*, 1990; Bhatia *et al.*, 1994 e 1995; Vermeersch & Mlynarek, 1996; Gardoni & Palmeira, 2000a), mostraram que o tamanho de abertura de poros de um geotêxtil não tecido tende a um limite finito com o aumento da espessura.

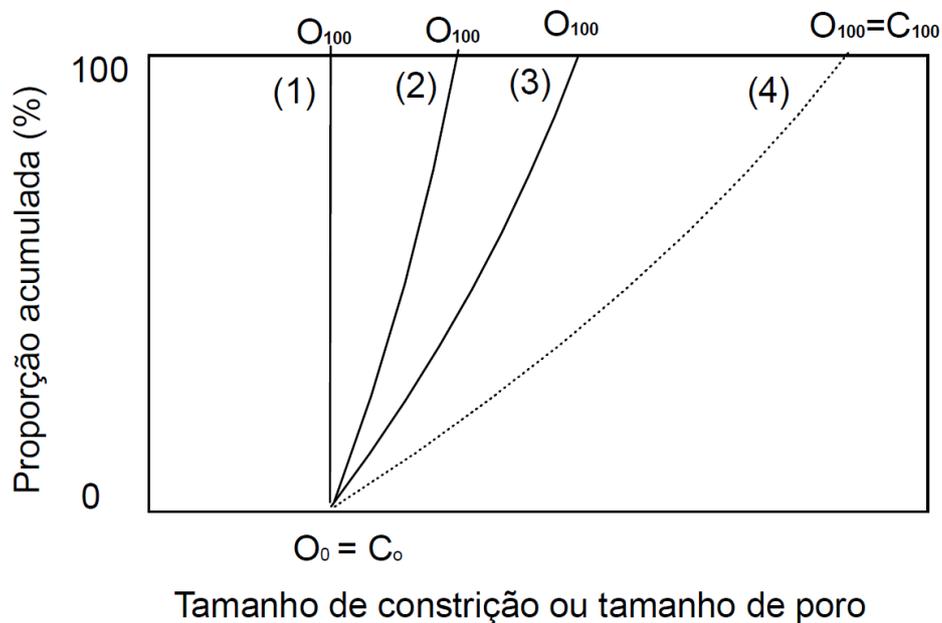


Figura 2.10 Curvas de distribuição do tamanho de abertura: (1) infinitamente espesso; (2) espesso; (3) fino; (4) infinitamente fino (Giroud *et al.*, 1998).

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. Segundo Palmeira *et al.* (1996), a terminologia empregada para a definição desse parâmetro varia dependendo do país e do processo para a obtenção, sendo as mais comuns: AOS (*Aparent Opening Size*, nos Estados Unidos), FOS (*Filtration Opening Size*), O_{90} ou O_{95} .

Um valor comumente utilizado para a abertura de filtração é o O_{95} , que está associado ao diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente à abertura da peneira pela qual passa 95% da massa total do material.

Do ponto de vista prático, a abertura de filtração (O_f) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante em dimensionamento de filtros de geotêxteis. Para a determinação desse parâmetro, Giroud (1996) propôs a seguinte equação semi-empírica para a abertura de filtração:

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

Esta equação é equivalente a:

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

Onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

n = porosidade do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

M_A = gramatura do geotêxtil;

ρ_f = massa específica das fibras;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

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

As Equações 2.3 e 2.4 mostram que para um geotêxtil submetido à tensão de compressão, os valores da espessura e porosidade são reduzidos, o que implica em redução da abertura de filtração. A Figura 2.11 mostra as famílias de curvas resultantes das extensões propostas por Giroud (1996). A Equação 2.3 representa uma família de curvas para valores constantes de porosidade (curvas de traçado cheio, Figura 2.11), para diferentes valores de espessura, ou seja, diferentes valores de O_f/d_f . A Equação 2.4 representa outra família de curvas com valores constantes de $M_A/(\rho_f d_f)$ (curvas tracejadas, Figura 2.11). Uma terceira família de curvas (curvas pontilhadas na Figura 2.11) foi obtida levando em consideração o número de confrontos, que é igual à razão entre a espessura e a distância entre as constrições, dada pela Equação 2.2.

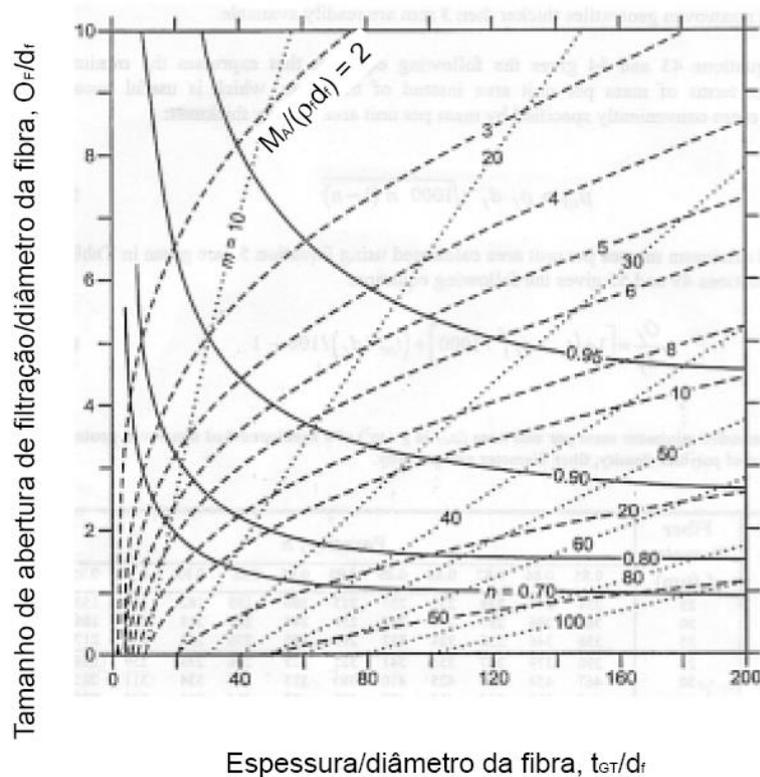


Figura 2.11 Representação gráfica das extensões teóricas propostas por Giroud (1996). Onde: (n) = porosidade do geotêxtil; (M_A) = gramatura do geotêxtil; (ρ_f) = massa específica de fibras; (d_f) = diâmetro das fibras do geotêxtil.

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

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

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

Basicamente, a técnica de peneiramento pode ser dividida em três tipos: o peneiramento seco, que consiste de vibrações de partículas de areia ou esferas de vidro para que passem através do geotêxtil; o peneiramento úmido, que consiste do peneiramento por vibração enquanto a água é jogada sobre as esferas ou partículas de areia; e o peneiramento hidrodinâmico, em que as partículas de areia ou esferas de vidro são depositadas sobre o espécime de geotêxtil contido em um recipiente, e o conjunto é submetido ao fluxo alternado de água pela imersão repetida dentro de um tanque de água.

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

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. Por outro lado, os métodos baseados no peneiramento são métodos diretos sendo que permitem obter o máximo tamanho de partículas que pode passar através de um geotêxtil. Os grãos de

solo passantes pelo geotêxtil no processo de peneiramento estão associados com o tamanho de constrições entre os poros, que é o que governa a filtração.

O método da análise de imagens foi desenvolvido por Rollin *et al.* (1977). O espaço de poros do geotêxtil é preenchido por uma resina transparente e a utilização de um analisador de imagens permite a visualização dos poros e a obtenção de medidas em seções transversais do geotêxtil. Um tratamento matemático é então usado para derivar a curva de distribuição de tamanho de poros. Segundo Wittman (1982), os resultados obtidos com o analisador de imagens são mais relevantes para o tamanho de poros do que para o tamanho de constrições. Prapaharan *et al.* (1989) encontraram boa concordância entre os resultados do método de intrusão e o de análise de imagens, pois ambos avaliam a distribuição de tamanho de poros.

Os métodos de análise da distribuição de poros por medidas de tensão capilar fornecem informações de volume de poros e não de abertura de filtração, que é o fator relevante para a filtração. Prapaharan *et al.* (1989) viabilizaram uma sistemática para a determinação da distribuição de poros valendo-se de uma técnica de intrusão de mercúrio. Segundo Bathia (1994), a intrusão de mercúrio pode fornecer dados errôneos de tamanho de poros, pois, por se tratar de um metal pesado, o mercúrio pode causar deslocamento das fibras do geotêxtil durante o ensaio.

Vermeersch & Mlynarek (1996) e Palmeira & Gardoni (2000a) mostraram que é possível obter medidas acuradas de tamanho de aberturas de filtração, mesmo sob tensão de compressão, com o método do *Bubble Point*. Este método combina medidas de tensão capilar com medidas de fluxo de um fluido através do espécime de geotêxtil. Este método é baseado no princípio do fluxo capilar, no qual o material poroso somente permitirá a passagem do líquido quando a tensão aplicada exceder a atração capilar do líquido no maior poro. O método completo é baseado em dois testes, um teste úmido e um teste seco. No teste úmido, o material poroso é saturado com líquido que é facilmente absorvido por todos os poros do geotêxtil. O teste seco é conduzido imediatamente após o teste úmido sem a manipulação da amostra. Durante este teste, o fluxo de ar atravessa todos os poros do material. No final do teste, uma segunda curva de vazão versus tensão aplicada é traçada.

Duas características da curva de distribuição de tamanho de poros são imediatamente avaliadas: o tamanho máximo de poros O_{98} (“*bubble point*” ou BBP) e o mínimo tamanho de poros O_2 . A Figura 2.12 ilustra os resultados do teste BBP efetuado em um porosímetro.

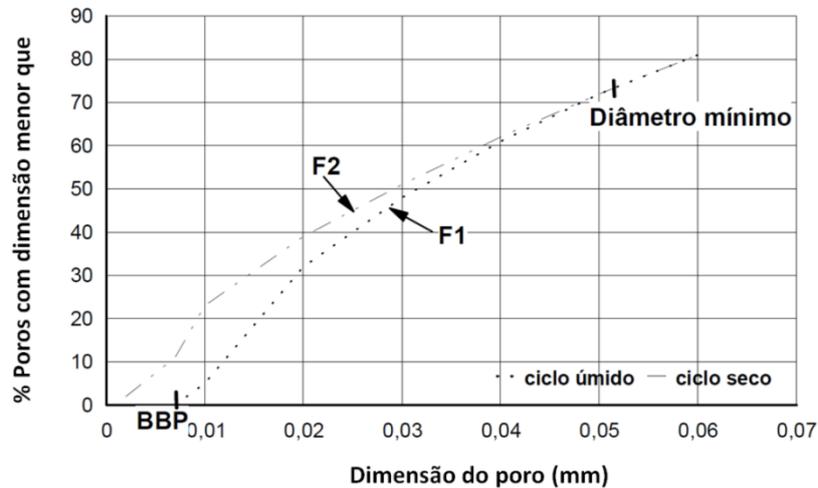


Figura 2.12 Curvas típicas do ensaio pelo porosímetro.

2.6.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A finalidade de um filtro em uma estrutura geotécnica é permitir a passagem de fluidos, retendo a massa de solo de forma que o conjunto seja estável. Quando o geotêxtil desempenha função de filtro, o escoamento de água é normal ao plano da manta.

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).

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

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

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

Onde:

v = velocidade aparente de fluxo;

k = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

i = gradiente hidráulico.

Quando o geotêxtil trabalha como elemento de filtro é necessário conhecer a sua **permissividade**. A permissividade é definida como a razão entre a permeabilidade normal ao plano do geotêxtil e sua espessura, como pode-se verificar na Equação 2.6:

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

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.

Quando há interesse na consideração de drenagem através do geotêxtil é necessário conhecer a sua **transmissividade**. A transmissividade de um geotêxtil é definida por:

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

Onde:

θ = transmissividade do geotêxtil;

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

t_{GT} = espessura do geotêxtil

Na Figura 2.13 estão esquematizadas as condições de fluxo associadas à permissividade e à transmissividade do geotêxtil.

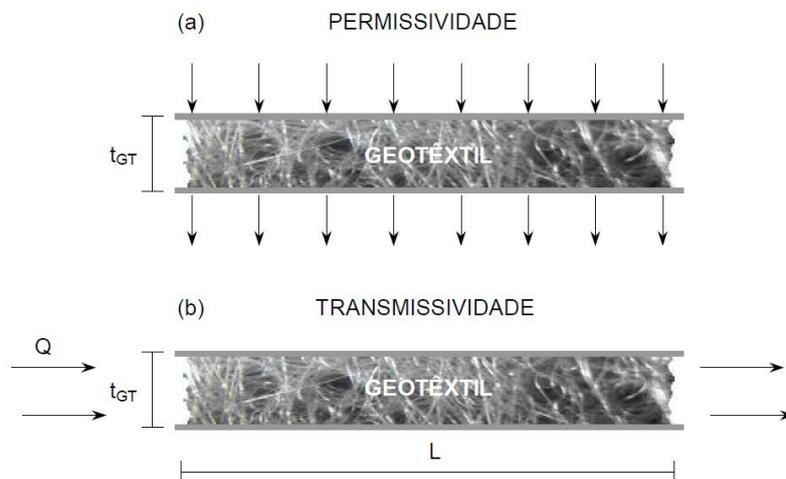


Figura 2.13 Propriedades hidráulicas do geotêxtil não tecido (modificado de Gardoni, 1995).

Para os geocompostos, a gramatura do geotêxtil de cobertura não tem influência significativa no comportamento hidráulico quanto à transmissividade, pois o escoamento da água depende muito mais da forma espacial do núcleo do geocomposto do que do geotêxtil de cobertura.

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

Gardoni & Palmeira (1998) e Gardoni & Palmeira (1999) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade com geossintéticos sob condições de tensão de compressão e constataram que a gramatura possui influência na transmissividade

dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster analisados (Figura 2.14). Para os geocompostos com diferentes gramaturas avaliados neste mesmo estudo, os resultados mostraram o mesmo comportamento de transmissividade encontrado para os geotêxteis não-tecidos. No estudo citado, a tensão de compressão e a gramatura do produto são as variáveis de maior influência na transmissividade. No entanto, como verificado na Figura 2.14, a espessura é um parâmetro físico de significativa influência nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos. Campbell & Wu (1994) e Giroud et al. (2000) chegaram a conclusões semelhantes em estudos de transmissividade de geotêxteis tecidos, não-tecidos e georredes.

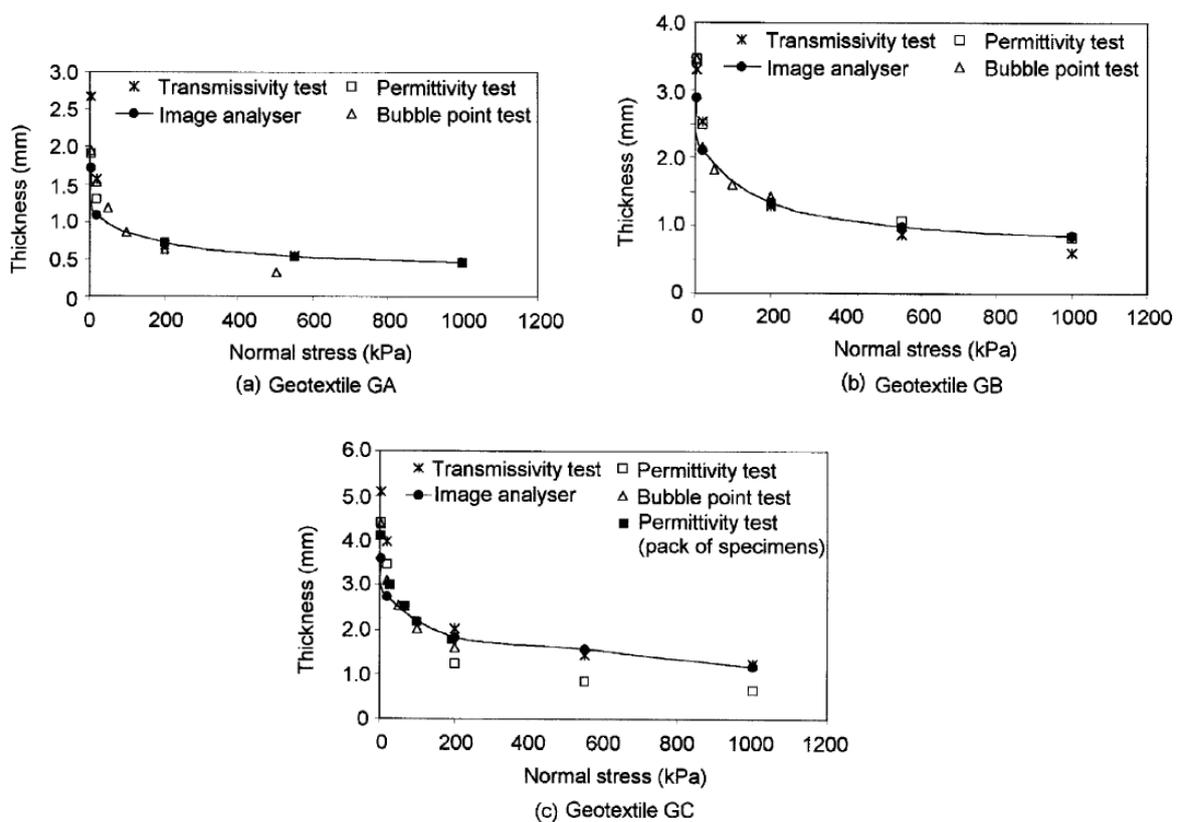


Figura 2.14 Variação da transmissividade de geotêxteis sob condições de tensão de compressão. Onde: i) *thickness* = espessura; ii) *transmissivity test* = ensaio de transmissividade; iii) *image analyser* = analisador de imagens; iv) *permittivity test* = ensaio de permeabilidade; v) *bubble point test* = teste do ponto de bolha; vi) *normal stress* = tensão normal; vii) *geotextile GA* = geotêxtil de 200 g/m²; viii) *geotextile GB* = geotêxtil de 400 g/m² e ix) *geotextile GC* = geotêxtil de 600 g/m² (Gardoni & Palmeira, 1998 e Gardoni & Palmeira, 1999).

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:

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

Como os geotêxteis são materiais de elevada porosidade, a possibilidade de ocorrência de fluxo turbulento para gradientes relativamente pequenos é bastante significativa. Como na maioria das situações práticas tem-se condição de fluxo laminar, é importante a identificação dos limites de gradiente que garantem tal condição. Isto é obtido por meio da definição do número de Reynolds para mantas têxteis, a partir do estudo de fluxo através de tubos capilares, e dado por Giroud (1996) na Equação 2.8:

$$R_{eg} = \frac{4\sqrt{2\beta} \rho_w v}{\eta_w (1-n) S_s} \quad (2.8)$$

Onde:

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

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

ρ_w = massa específica do fluido, sendo para a água, 1000 kg/m^3 ;

v = velocidade aparente de fluxo;

η_w = viscosidade do fluido, sendo para a água, $10^{-3} \text{ kg}^{-1}\text{s}^{-1}$;

n = porosidade do geotêxtil;

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

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

Para uma fibra têxtil com forma cilíndrica tem-se:

$$S_s = \frac{\text{Área}}{\text{Volume}} = \frac{\pi d_f L}{\frac{\pi d_f^2 L}{4}} = \frac{4}{d_f} \quad (2.9)$$

Onde:

S_s = superfície específica dos sólidos;

L = comprimento das fibras do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil.

Gourc (1982) sugere $R_{eg} < 5$ para se ter um fluxo laminar em geotêxteis não tecidos. Assim, considerando-se a Lei de Darcy (Equação 2.5), a superfície específica (Equação 2.9) e o valor de $R_{eg} = 5$, obtém-se:

$$i_{lim} = \frac{5\eta_w(1-n)}{\sqrt{2\beta\rho_w d_f k}} \quad (2.10)$$

Onde:

i_{lim} = gradiente limite para fluxo laminar;

η_w = viscosidade do fluido, sendo para a água, $10^{-3} \text{ kg}^{-1}\text{s}^{-1}$;

n = porosidade do geotêxtil;

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

ρ_w = massa específica do fluido, sendo para a água, 1000 kg/m^3 ;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

k = permeabilidade do meio.

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

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

Onde:

k = permeabilidade do geotêxtil;

ρ_w = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade, sendo $9,81 \text{ m/s}^2$;

n = porosidade do geotêxtil;

D_e = diâmetro das esferas;

η_w = viscosidade do fluido.

Giroud (1996) apresentou uma equação para a estimativa da permeabilidade de um geotêxtil sob fluxo laminar a partir da equação de Poiseuille para o fluxo em um tubo capilar e dependente da abertura de filtração, dada por:

$$k = \frac{\rho_w g n O_f^2}{32 \eta_w} \quad (2.12)$$

Onde:

k = permeabilidade do geotêxtil;

ρ_w = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade, sendo $9,81 \text{ m/s}^2$;

n = porosidade do geotêxtil;

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

η_w = viscosidade do fluido.

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

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

Onde:

k = permeabilidade do geotêxtil;

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

ρ_w = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade, sendo $9,81 \text{ m/s}^2$;

n = porosidade do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

η_w = viscosidade do fluido.

As Equações 2.12 e 2.13 se tornaram ferramentas bastante úteis para a previsão de permeabilidade de geotêxteis sob pressão. Palmeira (1996), Gardoni & Palmeira (1999) e Palmeira & Gardoni (2000a) aferiram soluções teóricas apresentadas por Giroud (1996) com os resultados de ensaios de laboratório para geotêxteis virgens não tecidos e obtiveram boa concordância entre resultados.

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

$$k = \frac{g \pi}{\nu} \frac{d_f^2}{2(1-n)} \frac{1}{C_D R_{eg}} \quad (2.14)$$

Onde:

k = permeabilidade do geotêxtil;

g = aceleração da gravidade;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

ν = viscosidade cinemática;

n = porosidade do geotêxtil;

C_D = coeficiente de arraste;

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

A Figura 2.15 mostra os resultados obtidos por Gourc (1982) para os modelos propostos.

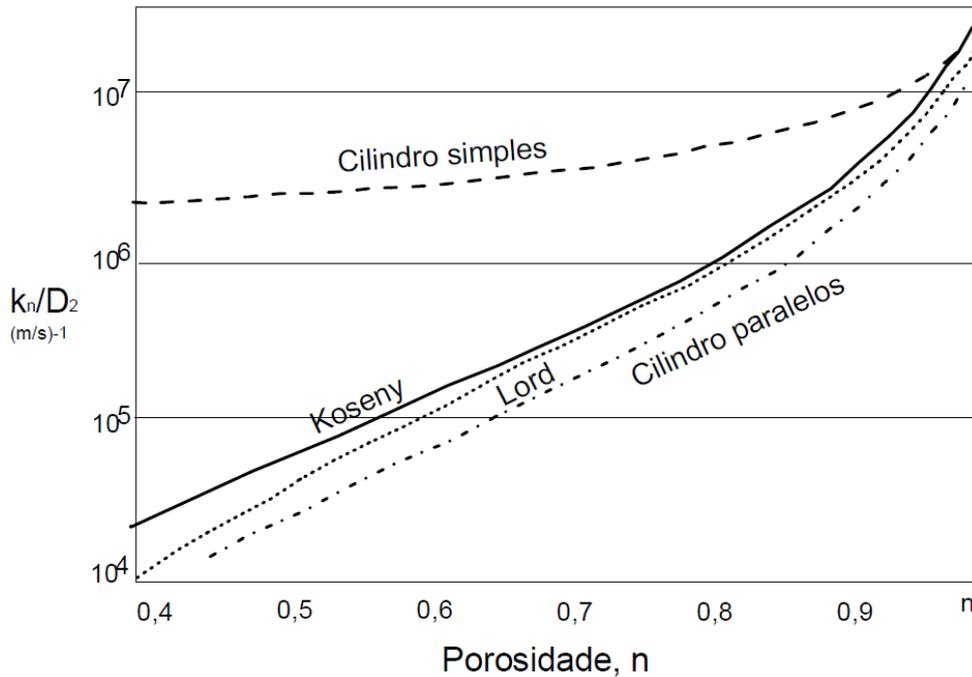


Figura 2.15 Leis de permeabilidade propostas para os geotêxteis (Gardoni, 2000).

Rollin *et al.* (1982) utilizaram a Equação 2.14 para valores de coeficiente de arraste (C_D) compreendidos entre 6 e 10 e com números de Reynolds entre 1 e 10. Lombard (1985 *apud* Gardoni, 2000) determinou o coeficiente C_D dos geotêxteis não tecidos termoligados não comprimidos para valores dos números de Reynolds variando de 0,1 a 10 durante os ensaios.

A sensibilidade do valor da permeabilidade com a estrutura é evidente para os geotêxteis e este aspecto é levado em conta nas expressões acima por meio dos coeficientes de ajuste (β e C_D , por exemplo). Do mesmo modo, uma anisotropia da estrutura das fibras pode traduzir-se em uma anisotropia de permeabilidade (Gourc, 1980; Gourc *et al.*, 1982; Ionescu & Kellner, 1982; Faure, 1990; e Gardoni *et al.* 1999). A Figura 2.16 mostra um exemplo de anisotropia de permeabilidade para um geotêxtil com gramatura igual a 200 g/m².

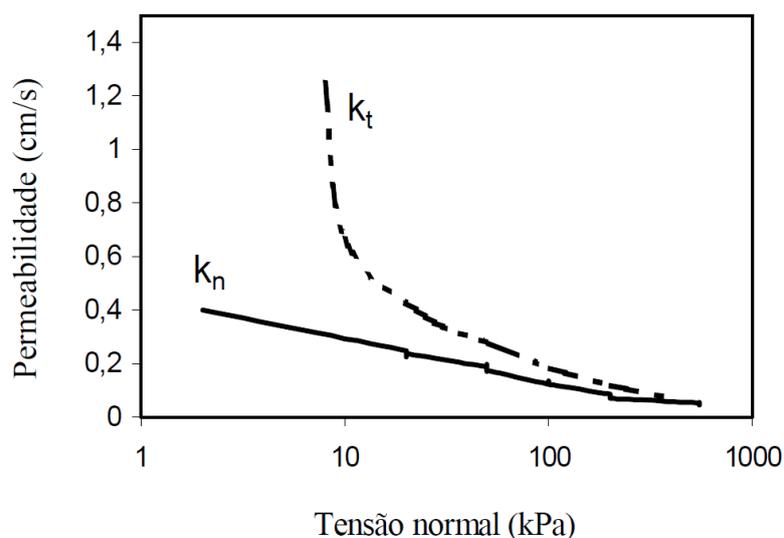


Figura 2.16 Anisotropia de permeabilidade (modificado de Gardoni et al., 1999)

Segundo Fannin *et al.* (1998), uma relação curvilínea pode ser observada entre a vazão por unidade de área da manta ensaiada e o gradiente hidráulico, indicando um regime de fluxo turbulento para as georredes e os geocompostos para drenagem (Koerner, 1994; Campbell & Wu, 1994; Zhao & Montanelli, 1999).

2.6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Segundo Tatto (2010), 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.

2.6.3.1 CRITÉRIOS DE FILTRO

De uma forma geral, o mecanismo de funcionamento de um bom filtro consiste em permitir o fluxo de água, simultaneamente à retenção das partículas do solo base. Os critérios de filtro disponíveis, basicamente comparam dimensões típicas de grãos do solo a serem retidos com a abertura de filtração do geotêxtil. É importante ressaltar que a prática corrente negligencia os efeitos da tensão normal atuante sobre a manta e da impregnação dos poros do geotêxtil por partículas de solo, características que influenciam na capacidade de retenção do filtro geotêxtil.

Um filtro em engenharia geotécnica deve ter aberturas pequenas o suficiente para reter o solo e, ao mesmo tempo, deve ser permeável o bastante para permitir que a água passe livremente através dele (Giroud, 1995). Isto significa que o filtro deve obedecer a um critério de retenção e a um critério de permeabilidade, ambos contraditórios tendo em vista que a permeabilidade do filtro aumenta com o aumento do tamanho de poros. Mesmo assim, é possível encontrar um filtro que atenda a ambos os critérios.

Akagi (1994), analisando os critérios de filtros, apresenta quatro critérios para o desempenho de filtros com geotêxteis: i) retenção, ii) permeabilidade, iii) anti-colmatação e iv) durabilidade. Os quatro critérios foram examinados em detalhes por Christopher & Fisher (1992).

2.6.3.2 CRITÉRIO DE RETENÇÃO

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

A capacidade de retenção é uma característica do filtro em impedir que as partículas o atravessem em decorrência da ação das forças de percolação. No entanto, é aceitável a migração de uma pequena percentagem de partículas através do solo a ser drenado e do filtro, assim como a retenção de algumas partículas no interior do geotêxtil (John, 1987).

Normalmente, o critério de retenção é apresentado como uma relação entre o diâmetro característico da partícula de solo e o tamanho de abertura de filtração do geotêxtil. Como por exemplo:

$$O_f < N.D \quad (2.15)$$

Onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

N = número que depende do critério utilizado;

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

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

Vários critérios têm sido propostos para os filtros de geotêxtil. Giroud (1996) propôs um critério de retenção com base no coeficiente de não uniformidade do solo, definido como a razão entre os diâmetros das partículas correspondentes a 60% e 10% dos grãos passante na curva de distribuição de tamanho de partículas do solo. Mlynarek *et al.* (1993) propuseram um critério baseado no tamanho de abertura de filtração. A Tabela 2.2 sumaria alguns critérios de retenção de filtros geotêxteis que têm sido pesquisados e revisados por vários autores e que podem ser encontrados na literatura.

Tabela 2.2 Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000b).

Fonte	Critério	Aplicação
USACE – U. S. Army Corps of Engineers (1977)	$0.149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq 0.211 \text{ mm}$ $0.149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq D_{85}$	$D_{50} > 0.074 \text{ mm}$ $D_{50} \leq 0.074 \text{ mm}$ Geotêxteis não devem ser usados se $D_{85} < 0.074 \text{ mm}$
AASHTO Task Force #25 (1986)	$O_{95} < 0.59 \text{ mm}$ $O_{95} < 0.30 \text{ mm}$	Se $50\% \leq 0.074 \text{ mm}$ Se $50\% > 0.074 \text{ mm}$ Não há limitação quanto ao tipo de geotêxtil ou solo
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$	Tecidos, solos com $\leq 50\%$ passando na

Tabela 2.2 Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000b).

Fonte	Critério	Aplicação
	$O_{95} \leq 0.2 \text{ mm}$	peneira 200 Tecidos, solos coesivos
Zitscher, 1974	$O_{50}/D_{50} \leq 1.7 - 2.7$ $O_{50}/D_{50} \leq 2.5 - 3.7$	Tecidos, solos com $C_u \leq 2$, $D_{50} = 0.1$ a 0.2 mm Não tecidos, solos coesivos
Ogink (1975)	$O_{90}/D_{90} \leq 1$ $O_{95}/D_{85} \leq 1.8$	Tecidos Não tecidos
Sweetland (1977)	$O_{15}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não tecidos, solos com $C_u = 1.5$ Não tecidos, solos com $C_u = 4$
Shober & Teindl (1979)	$O_{90}/D_{50} \leq 2.5 - 4.5$ $O_{90}/D_{50} \leq 4.5 - 7.5$	Tecidos e não tecidos finos, dependendo de C_u Não tecidos espessos, dependendo de C_u , solos arenosos e siltosos
Millar, Ho & Turnbull (1980)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Tecidos e não tecidos
Rankilor (1981)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não tecidos, solos com $0.02 \leq D_{85} \leq 0.25 \text{ mm}$ Não tecidos, solos com $D_{85} > 0.25 \text{ mm}$
Giroud (1982)	$O_{95}/D_{50} < C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 9/C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 1.5C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 13.5/C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 2C'_u$ $O_{95}/D_{50} < 18/C'_u$	$I_D < 35\%$, $1 < C'_u < 3$ $I_D < 35\%$, $C'_u > 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $1 < C'_u < 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $C'_u > 3$ $I_D > 65\%$, $1 < C'_u < 3$ $I_D > 65\%$, $C'_u > 3$ Assume migração de finos do solo para C_u elevado
Carroll (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2 - 3$	Tecidos e não tecidos
Mlynarek (1985), Mlynarek et al. (1990)	$2 D_{15} < O_{95} < 2 D_{85}$	Não tecidos
Lawson (1986)	$O_{90}/D_n = C$	Desenvolvido para solos residuais de Hong Kong Valores de n e C são obtidos através de dados da região de ensaios em filtros
John (1987)	$O_{95}/D_{50} \leq (C'_u)^a$	“a” é dependente do tamanho da partícula a ser retida ($a = 0.7$ for D_{85})
FHWA – Christopher & Holtz (1985)	$O_{95}/D_{85} \leq 1 - 2$ $O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou $O_{50}/D_{85} \leq 0.5$	Dependendo do tipo de solo e C_u Fluxo dinâmico, pulsante e cíclico, se o solo pode mover para o filtro geotêxtil
CFGG (1986) – French Committee on Geotextiles and Geomembranes	$O_f/D_{85} \leq 0.38 - 1.25$	Dependendo do tipo de solo, condições hidráulicas, compactação e condições de aplicação.
Grenoble / École Polytechnique	$O_{95}/D_{85} \leq 1.5$ $1.5 < O_{95}/D_{85} < 3.0$	Solos uniformes Solos bem graduados
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 0.8$ $O_{95}/D_{15} \leq 1.8 - 7.0$ $O_{50}/D_{50} \leq 0.8 - 2.0$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, dependendo do C_u do solo
Luetlich <i>et al.</i> (1992)	Gráficos	Baseado nos vazios do geotêxtil, tipo e tamanho dos grãos de solo, condições hidráulicas e outros fatores.
Canadian Geotechnical	$O_f/D_{85} < 1.5$	Solos uniformes

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

Quando as condições acima são satisfeitas e houver um fluxo d'água, algumas poucas partículas, que não se encontram consolidadas na matriz do solo, se movem em direção ao filtro geotêxtil e mesmo que não passem através dele não poderão causar nenhum dano ao mesmo. Porém, se as condições acima não forem satisfeitas, as partículas de solo que se deslocam devido ao fluxo d'água, se não passarem através do geotêxtil, podem interagir com ele de três formas diferentes: i) cegamento (*blinding*), ii) bloqueamento (*blocking*) ou iii) colmatação física (*clogging*).

A Figura 2.17a representa o **cegamento**, onde somente uma pequena parcela dos solos bloqueia internamente os vazios do geotêxtil, enquanto as aberturas superficiais da manta são fechadas por camada de partículas, camada esta chamada de *cake*. Este é um fenômeno particularmente relevante e comum em solos que apresentam curva granulométrica descontínua (caracterizados por serem solos de graduação aberta) e que são sujeitos ao fenômeno de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo), que será abordado adiante. No **bloqueamento**, esquematizado na Figura 2.17b, o geotêxtil pode perder consideravelmente a sua permeabilidade devido ao fechamento dos vazios superficiais por partículas de solo retidas. Na **colmatação física**, representada pela Figura 2.17c, as partículas de solo ficam impregnadas dentro do geotêxtil. A descrição detalhada destes processos pode ser vista em Spada (1992).

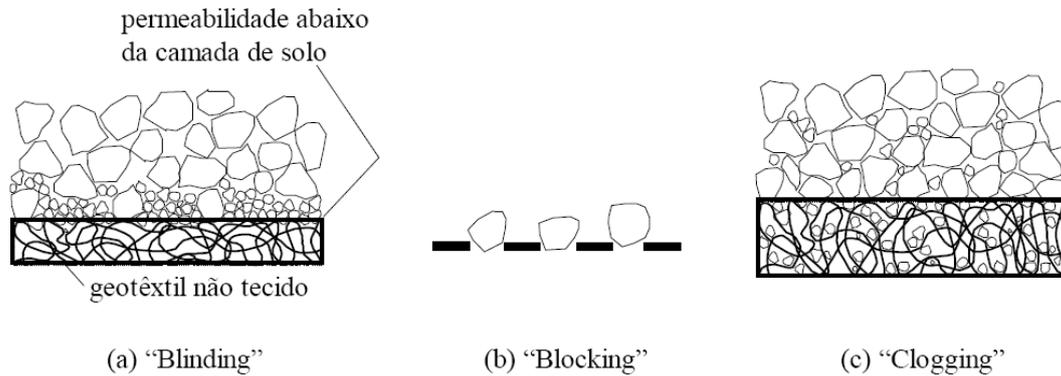


Figura 2.17 Mecanismos de colmatação em filtros de geotêxtil (Palmeira & Gardoni, 2000b).

É importante ressaltar que relações como a dada pela Equação 2.15 são válidas somente se o solo é internamente estável, ou seja, a curva de distribuição de tamanho de partículas é contínua. Segundo Giroud (1994), a continuidade da curva de distribuição de tamanho de grãos é necessária, mas não suficiente para assegurar a estabilidade interna de um solo não coesivo. Assim, é essencial distinguir entre solos internamente estáveis e internamente instáveis, para a definição do projeto de filtro.

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. As partículas de uma determinada dimensão devem também ficar oclusas em uma matriz formada por partículas de maiores dimensões, ou seja, deve-se levar em conta também o valor do coeficiente de uniformidade do solo. John (1987) afirma que as partículas de solo em contato com o geotêxtil devem formar arcos nas condições ideais de filtração, como mostra a Figura 2.18.

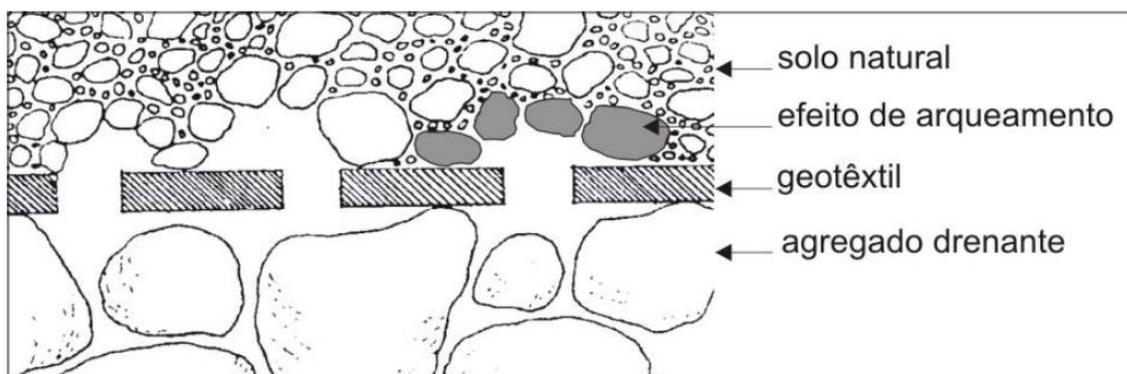


Figura 2.18 Formação de arcos de partículas (modificado de John, 1987 *apud* Tatto, 2010).

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 2.19.

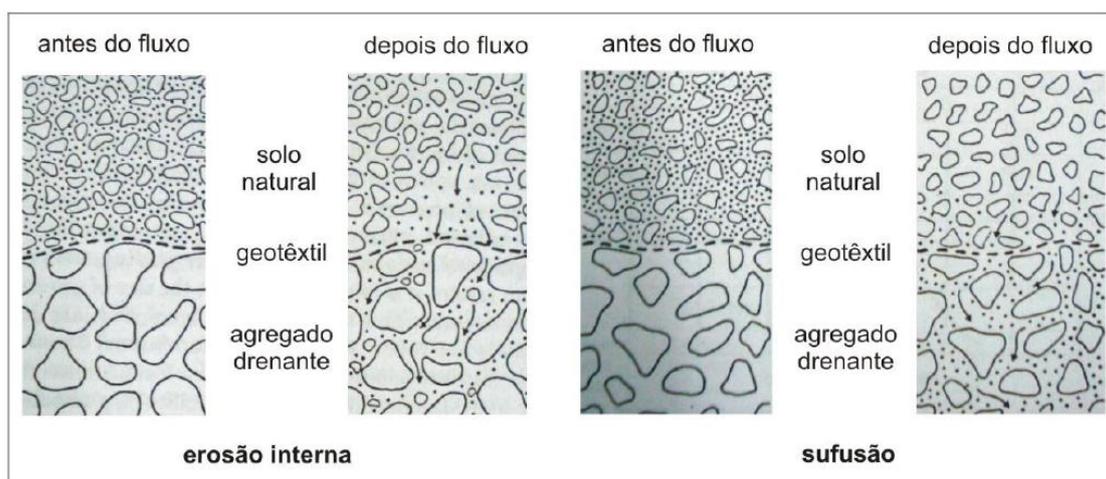


Figura 2.19 Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987 *apud* Totto, 2010).

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

2.6.3.3 CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE

Conceitualmente, o critério de permeabilidade baseia-se no fato de que o geotêxtil deve proporcionar uma adequada capacidade de fluxo e também deve ter uma permeabilidade suficientemente alta para prevenir algum excesso de poropressão após sua instalação e funcionamento (Matheus, 1997).

A maioria das mantas, devido à sua porosidade e pequena espessura, introduz pequena perda de carga hidráulica no sistema. Portanto, todos os critérios 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 e providenciar capacidade de fluxo adequada.

A Tabela 2.3 apresenta alguns critérios de permeabilidade disponíveis na literatura.

Tabela 2.3 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)	$k_f > 10 k_s$ $k_f > 100 k_s$	Tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2\text{mm}$); Não tecidos espessos ($t_{GT} > 2\text{mm}$).
Lafleur (1999)	$k_f > 20 k_s$	Solos não coesivos.

Nota: k_f = coeficiente de permeabilidade do filtro; k_s = coeficiente de permeabilidade do solo e t_{GS} = espessura do geotêxtil.

2.6.3.4 CRITÉRIO ANTI-COLMATAÇÃO

A colmatção física do filtro ocorre quando as partículas de solo se acumulam sobre o filtro, ocasionando cegamento, ou ficam aprisionadas no seu interior em grande quantidade, comprometendo totalmente o desempenho do filtro, como se pode visualizar na Figura 2.20. O critério anti-colmatção exige que a maioria das aberturas seja larga o suficiente para deixar passar as partículas pequenas através do filtro de modo a que ele não colmate (Gardoni, 1995).

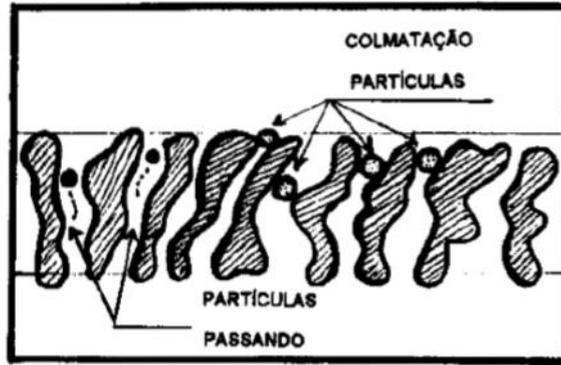


Figura 2.20 Condição de colmatação física dos geotêxteis (modificado de Hoare, 1982).

Giroud, (1982) estabeleceu o coeficiente de uniformidade C_u , como esquematizado na Figura 2.21, como uma condição de estabilidade para o solo, onde:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.16)$$

onde: $C_u < 3$ o filtro de geotêxtil retém todo o solo;
 $C_u > 3$ filtro de geotêxtil retém as partículas grandes, mas não todo o solo, pois as partículas finas passam através do filtro arrastadas pelo fluxo d'água.

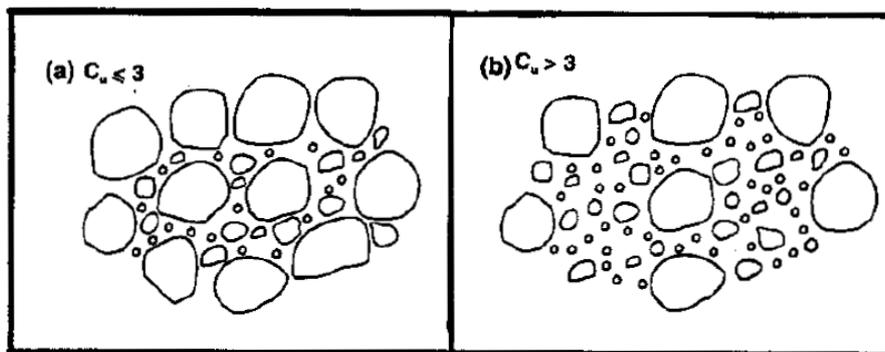


Figura 2.21 Distribuição do tamanho de partículas de solo.

De acordo com o critério anti-colmatação (Christopher & Holtz, 1985):

Em condições menos severas:

Se $C_u > 3$, então $O_{95} > 3D_{15}$;

Se $C_u \leq 3$, então selecionar o geotêxtil com o maior valor de O_{95} que atende ao critério de retenção.

Em condições mais críticas, deve-se: i) selecionar o geotêxtil que satisfaz os critérios de retenção e de permeabilidade; e ii) executar ensaios de filtração utilizando o solo e as condições hidráulicas que ocorrem na obra.

2.6.3.5 CRITÉRIO DE DURABILIDADE

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

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

2.6.3.6 COLMATAÇÃO BIOLÓGICA

Filtros de geotêxtil podem colmatar pelo crescimento orgânico ou deposição de partículas inorgânicas por microrganismos (Gardoni, 1995). As causas microbiológicas da colmatação são aquelas resultantes da colonização microbiana no filtro. Vandevivere et al. (1992) realizaram ensaios inoculando uma espécie de bactéria aeróbia chamada *Arthrobacter* em um fluido. O ensaio percolou o fluido em uma amostra de areia saturada onde foi verificada uma severa colmatação devido ao aumento populacional das bactérias, alcançando uma redução do coeficiente de permeabilidade do solo da ordem de até três vezes (Remígio, 2006).

As diversas formas sob as quais microrganismos podem provocar a colmatação são apresentadas a seguir (Baveye et al., 1998 *apud* Remígio, 2006):

- acúmulo de células microbianas e seus produtos celulares – as células microbianas podem ocupar os espaços vazios por meio da formação de biofilmes e formando agregados de células;

- produção de gases – os gases de origem microbiológica promovem a redução do espaço disponível para o fluxo do líquido percolante;
- atividade de ferrobactérias – a colmatção provocada pela precipitação de compostos de ferro é resultante do processo de oxidação de íons ferrosos em função das condições termodinâmicas do meio favorável ao processo.

2.7 APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

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

2.7.1 BARRAGEM DE VALCROS – FRANÇA

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

- à jusante, como filtro para dreno de pé, sendo o material granular envolvido por um geotêxtil não tecido com gramatura de 300 g/m²;
- à montante, como filtro sob 250 mm de enrocamento colocado diretamente sobre um geotêxtil não tecido de poliéster com gramatura igual a 400 g/m².

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

mesmos locais das amostras de geotêxtil, bem como blocos de solo e geotêxtil. A Figura 2.22 mostra um desenho esquemático da amostragem feita na barragem.

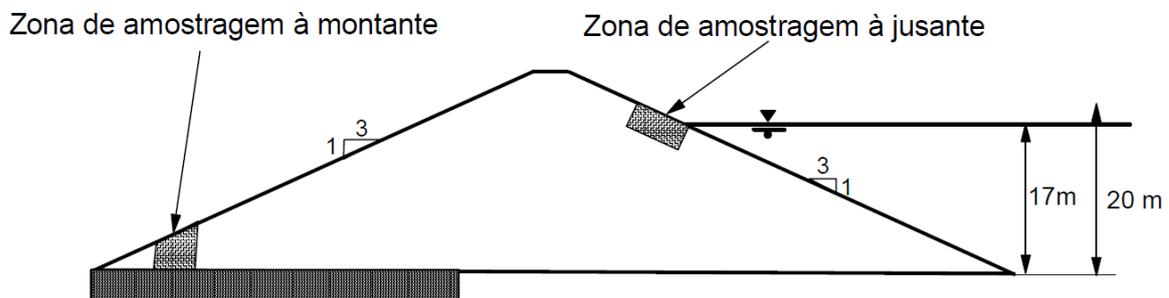


Figura 2.22 Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure et al., 1999).

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

2.7.2 BARRAGEM DE TUCURUÍ – PARÁ / BRASIL

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

Nesta obra, o geotêxtil foi empregado como barreira *anti-piping* devido às suas propriedades de filtro e à presença de canículos no solo de fundação. Foi utilizado o geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos de poliéster com gramatura igual a 600 g/m². A manta de geotêxtil foi instalada sobre a face do *cut-off* à jusante, com um recobrimento mínimo

necessário. O desempenho do sistema até a presente data tem sido totalmente satisfatório. A Figura 2.23 mostra a seção transversal da barragem, onde é indicada a posição do geotêxtil.

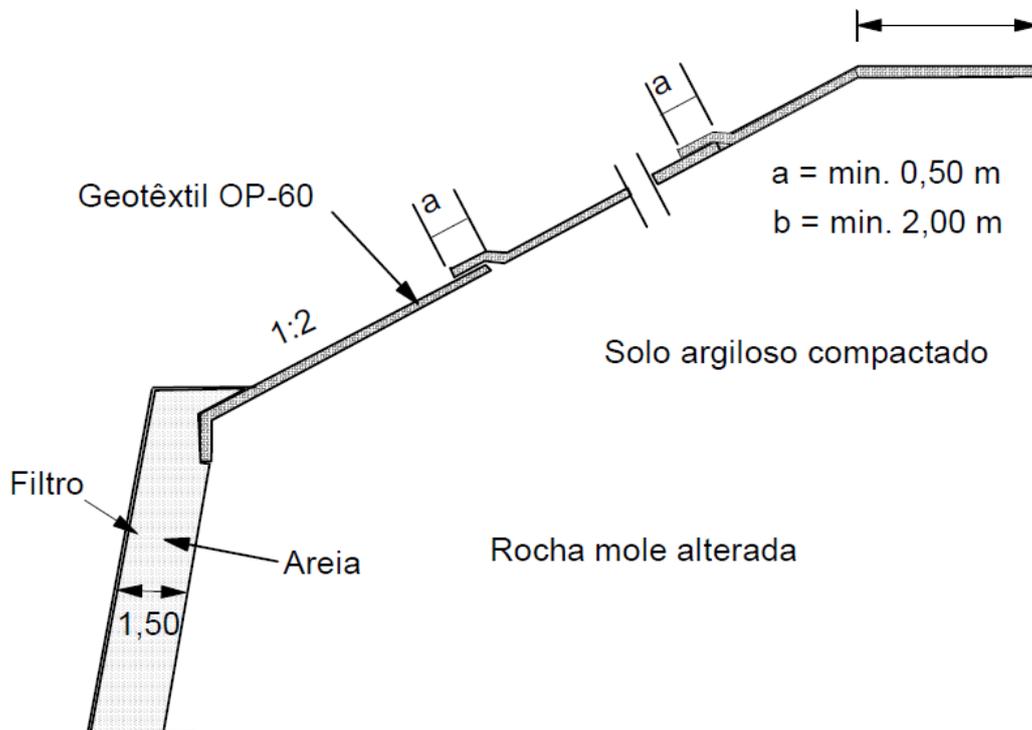


Figura 2.23 Detalhe da colocação do geotêxtil na barragem de Tucuruí (modificado de Dib & Aguiar, 1986).

2.7.3 BARRAGEM DE REJEITOS DA COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM

A CBMM construiu duas barragens de rejeito de mineração pelo método de jusante. Em 1976, na primeira delas, denominada de barragem B-4, com 48 m de altura, foi utilizado o geotêxtil não tecido, agulhado de filamentos contínuos (gramatura de 300 g/m^2), no seu sistema drenante (Montez, 1987). A segunda barragem, denominada B-5, começou a ser erguida em 1982, tendo 74 m de altura, também com geotêxtil não tecido no seu sistema drenante, sendo considerada uma das mais importantes barragens de rejeito de mineração do Brasil. A Figura 2.24 mostra o esquema da barragem B-5.

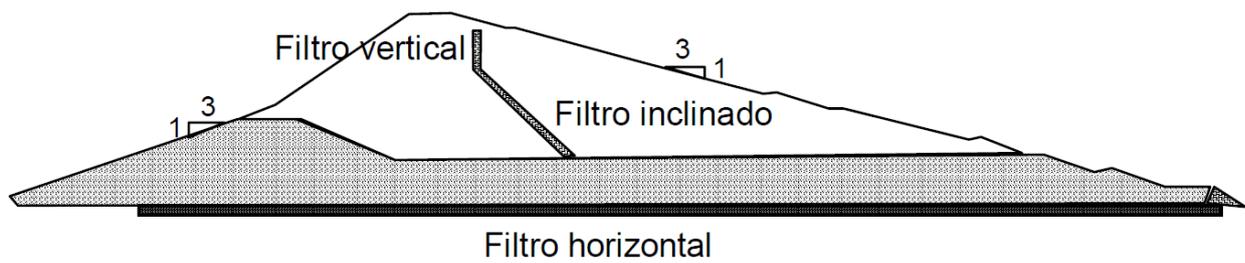


Figura 2.24 Esquema da seção típica da barragem B-5 (modificado – Montez, 1987).

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

2.8 EQUIPAMENTO DO BUBBLE POINT TEST (BBP)

O Teste do Ponto de Bolha ou *Bubble Point Test* (BBP) obtém a abertura de filtração (constricção) do geotêxtil com maior acurácia que os métodos usuais e é um equipamento sofisticado que utiliza o método de intrusão de poros, esquematizado na Figura 2.25, para verificação da abertura de filtração.

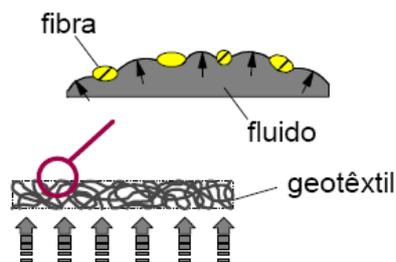


Figura 2.25 Abertura de filtração por intrusão de poros (Palmeira, 2012). Normas de referência: Normas ISO, ASTM 4751.

A norma americana ASTM D6767 padroniza o ensaio de BBP e mostra que a partir da relação inversa entre pressão exercida e vazão que o fluido atravessa o geotêxtil, é possível obter a curva de diâmetros de constricções, 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 de poros contínuos de um geotêxtil unidos por atração capilar e tensão superficial, e a pressão mínima necessária para forçar o líquido a partir desses poros é uma função do diâmetro dos poros. A Figura 2.26 mostra um típico sistema de teste BBP. A vantagem do BBP é a acurácia de medição do tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, especialmente quando há aberturas muito pequenas (Bhatia & Smith, 1994; Aydilek & Edil 2004; Elton *et al.* 2006, 2009).

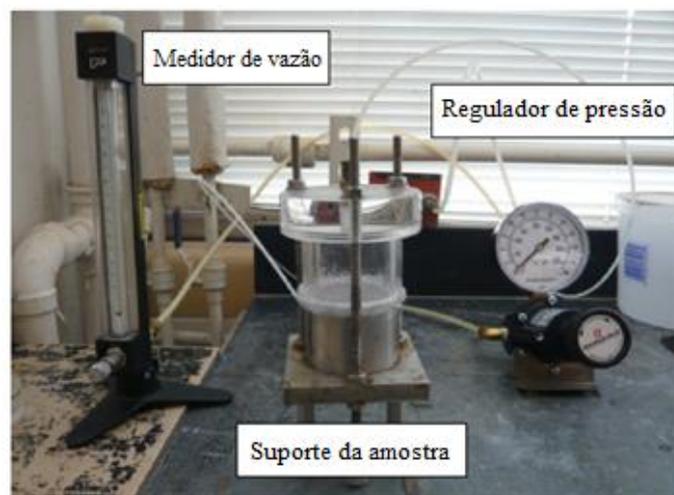


Figura 2.26 Equipamento do BBP (Eun & Tinjium, 2011).

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

Dentre as diversas metodologias propostas para a determinação da curva de distribuição de poros em geotêxteis, a norma ASTM 6767 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 2.27. O ensaio normalizado pela ASTM 6767 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 molhada (saturada) quanto com a amostra seca. Para fins de cálculo os poros são considerados esféricos.

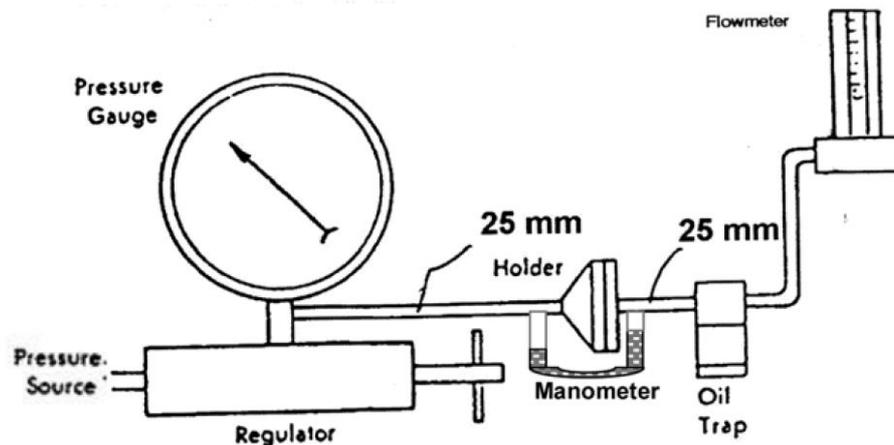


Figura 2.27 Esquema do equipamento para ensaio do Ponto de Bolha (Modificado de ASTM, 2011).

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 2.28. No teste, um material poroso é saturado com um líquido que molhe completamente o material. O líquido usado na saturação deve ser facilmente absorvido dentro de todos os poros do material. O ângulo de contato θ entre o líquido e os poros do material é zero, e líquidos com baixa tensão superficial alcançam mais facilmente esta situação (Bhatia & Smith, 1996). Quando a amostra é ensaiada molhada (próxima da saturação), na aplicação da pressão de ar, os poros de maiores diâmetros tendem a ser esvaziados primeiro. Isto ocorre porque a tensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro do poro.

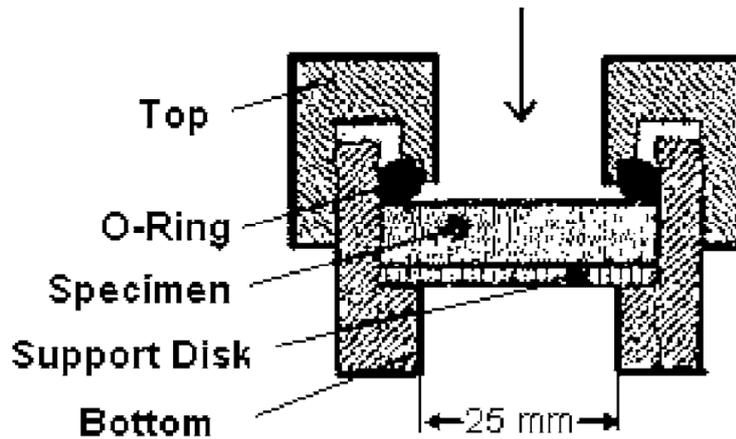


Figura 2.28 Esquema da célula para ensaio do Ponto de Bolha (Modificado de ASTM, 2011).

Dentro do poro preenchido por água, a condição de equilíbrio pode ser expressa pela Equação 2.17 (ASTM 6767-11):

$$\pi \cdot d \cdot T \cdot B \cdot \cos \theta = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P \quad (2.17)$$

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 2.17 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 constricção de diâmetro O_i . O lado direito da Equação 2.17 é a força motriz desenvolvida, a partir da pressão aplicada multiplicada pela área do poro ou constricção. Resolvendo a Equação 2.17, e reescrevendo-a para determinar o tamanho do poro, tem-se:

$$d = \frac{4 \cdot T \cdot B \cdot \cos \theta}{P} \quad (2.18)$$

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;

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

P = pressão (Pa).

Quando o líquido molha completamente a amostra, tem-se $\cos \theta = 1$. Assim, a Equação 2.18 pode ser reescrita como mostrado na Equação 2.19:

$$d = \frac{4.B.T}{P} \quad (2.19)$$

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

$$d = \frac{2860.T}{P} \quad (2.20)$$

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 2.19 com a Equação 2.20, tem-se $4B=2860$, logo $B=715$. Convertendo as unidades da Equação 2.20 para o Sistema Internacional, tem-se que $B=0.715$, valor que será usado na Equação 2.19 para o cálculo do diâmetro equivalente em cada nível de pressão. O valor da tensão superficial (T) da água 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 2.19 relaciona o diâmetro relativo do poro ou constricção 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 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 2.29 mostra um exemplo das curvas úmidas e secas resultantes de um ensaio do *Bubble Point Test* (Ponto de Bolha).

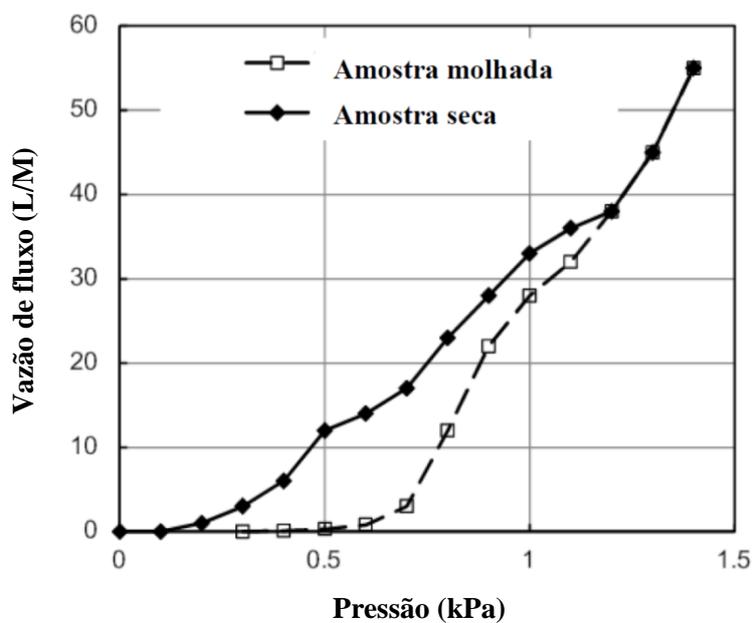


Figura 2.29 Curvas obtidas em testes de ponto de bolha (modificado de Eun & Tinjium, 2011)

As medidas obtidas pelo gráfico de pressão versus fluxo de ar, obtidas após o ensaio de ponto de bolha, são utilizados para traçar a curva de distribuição de tamanho de poros da amostra. A Equação 2.21 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:

$$\% \text{ Menor que } D = 1 - \frac{Q_{wet}}{Q_{dry}} \cdot 100 \quad (2.21)$$

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 2.30 ilustra um exemplo de curva de distribuição de poros obtida após aplicação das Equações 2.19 e 2.21 para cada valor de pressão, a partir dos ensaios realizados por Eun & Tinjium (2011), para diferentes tipos de geotêxteis não tecidos de polipropileno.

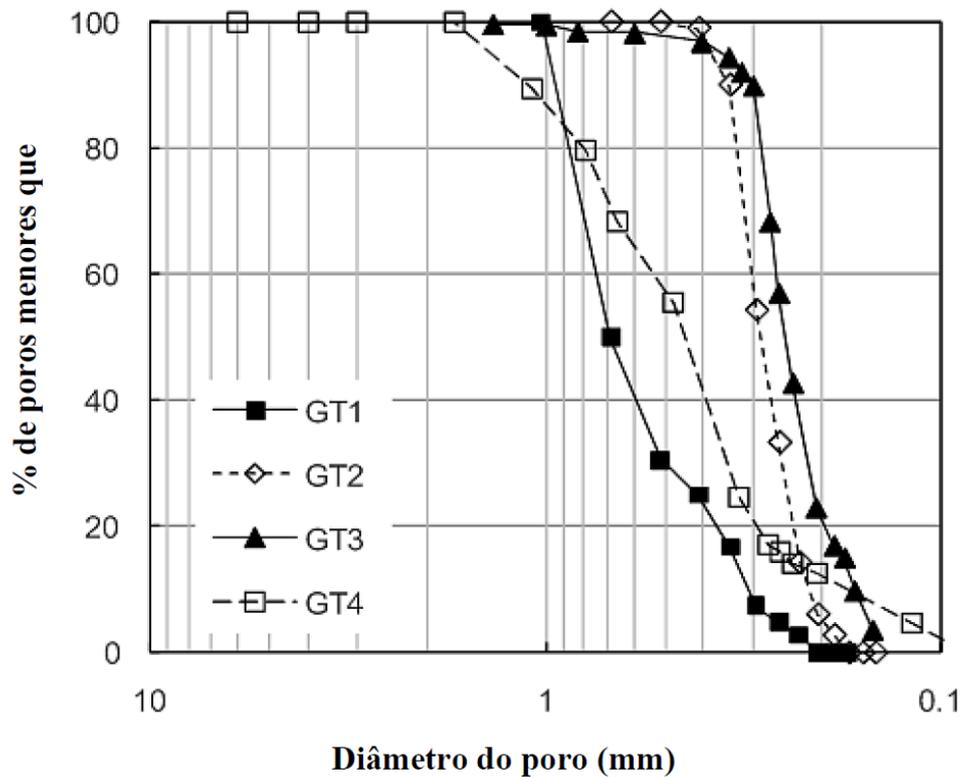


Figura 2.30 Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha. (modificado de Eun & Tinjium, 2011).

Diversos trabalhos têm ilustrado o uso do ensaio de ponto de bolha para determinação da curva de distribuição de poros de geossintéticos, com o devido sucesso, demonstrando ser um método adequado para esta finalidade. Em seu estudo sobre comportamento filtrante de geossintéticos sujeitos a pressão, Gardoni (2000) utilizou um equipamento com aquisição

automática de dados para encontrar a curva de distribuição de poros em geotêxteis não tecidos.

Bathia & Smith (1995) utilizaram um equipamento de pressão controlada e registro automático de pressão para medição da curva de distribuição de poros em geossintéticos. Eun & Tinjium (2011) propõem um equipamento mais simples para a execução do ensaio de ponto de bolha, baseados nas orientações da norma ASTM 6767-11, mas sem uma aquisição automática de dados.

No equipamento proposto por Eun & Tinjium (2011), a aplicação de pressão na amostra, bem como as medições de pressão e fluxo de ar através dela, dependem da ação manual do operador e de sua observação dos dados registrados nos leitores de saída. A norma D 6767-11 propõe as definições de termos específicos para essa norma:

- *Bubble point pore size* ou Tamanho do poro do ponto de bolha (O_{98}): o maior diâmetro efetivo de poro detectado pelo aumento de velocidade de fluxo de ar no início do teste saturado (molhado);
- *Pore constriction* ou Tamanho do poro (O): diâmetro de um círculo que possui a mesma área que a menor seção de determinado poro do geotêxtil;
- *Pore size* ou Tamanho do poro (O_i): porcentagem de ocorrência (i) de poros menores que determinado diâmetro;
- *Pore size distribution* ou Curva de distribuição do tamanho de poros (PSD): porcentagem cumulativa de distribuição de toda a gama de tamanhos de poros de um dado geotêxtil;
- *Wetting liquid* ou Fluido de saturação: líquido usado para saturar o geotêxtil usado como amostra, antes de começar o ensaio.

O fluxo de ar irá ultrapassar os poros quando a pressão aplicada exceder a atração capilar do fluido no poro. Menores constrições vão se comportar de forma semelhante a pressões mais elevadas. A relação entre o tamanho do poro e a pressão é estabelecida pelo fluido de saturação, como exemplificado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Tabela de fluidos de saturação utilizados no Bubble Point* (ASTM, 2011).

Fluido de Saturação	Faixas de tamanhos de poros a ser investigada				Tensão superficial (dynes/cm a 25°C)
	$\geq 100\mu\text{m}$	$\geq 50\mu\text{m}$	$\geq 10\mu\text{m}$	$\geq 1\mu\text{m}$	
Água	0 a 2.5 kPa	0 a 7.5 kPa	0 a 25 kPa	0 a 200 kPa	72
Derivados do petróleo	-	-	-	0 a 100 kPa	30
Óleo Mineral	-	-	-	0 a 75 kPa	34.7

Nota: (*) A Tabela 2.4 apresenta a tensão superficial nominal dos líquidos a 25 °C. Há uma potencial influência do líquido de saturação na medida do tamanho do poro, o que deve ser levado em conta pelos usuários. Portanto, deve ser feita uma verificação de curva de distribuição de poros com materiais que possuam tamanhos de poros conhecidos. Outros líquidos podem ser usados e vários estão em fase de avaliação (ASTM, 2011).

No caso da Tabela 2.4, os líquidos mais indicados para fluidos de saturação são os de mais baixa tensão superficial, como o etanol, por exemplo. Um líquido de saturação é um líquido que forma um ângulo de contato com o geotêxtil, que deve ser menor que 90°. Um líquido que cria um ângulo de contato entre 90° e 180° com o geotêxtil não é capaz de saturá-lo e não deve ser usado no Teste do Ponto de Bolha, uma vez que:

- quanto menor o ângulo de contato, mais hidrofílico (do grego, *hidro* = água, *philos* = amigo). Materiais hidrofílicos possuem afinidade com a molécula de água e são solúveis nela.
- quanto maior o ângulo de contato mais hidrofóbico (do grego, *hidro* = água, *phobos* = medo). Materiais hidrofóbicos possuem aversão à água e são insolúveis nela.

2.9 EQUIPAMENTO BUBBLE POINT TEST – LIMA (2014)

O equipamento proposto por Eun & Tinjium (2011) serviu como base para o desenvolvimento do *Bubble Point Test* utilizado neste trabalho para medição da curva de distribuição de poros em geotêxteis não tecidos de acordo com a norma americana ASTM D-6767.

Considerando o conhecimento adquirido por Lima (2014) durante o seu período de estágio de doutorado sanduíche na Universidade do Texas em Austin, decidiu-se por desenvolver um

equipamento para determinação da distribuição de poros de geossintéticos baseado tanto na norma americana ASTM D-6767 quanto no trabalho de Eun & Tinjum (2011). A Figura 2.31 apresenta uma visão geral do equipamento montado por Lima (2014) no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, na área destinada à pesquisas sobre geossintéticos.

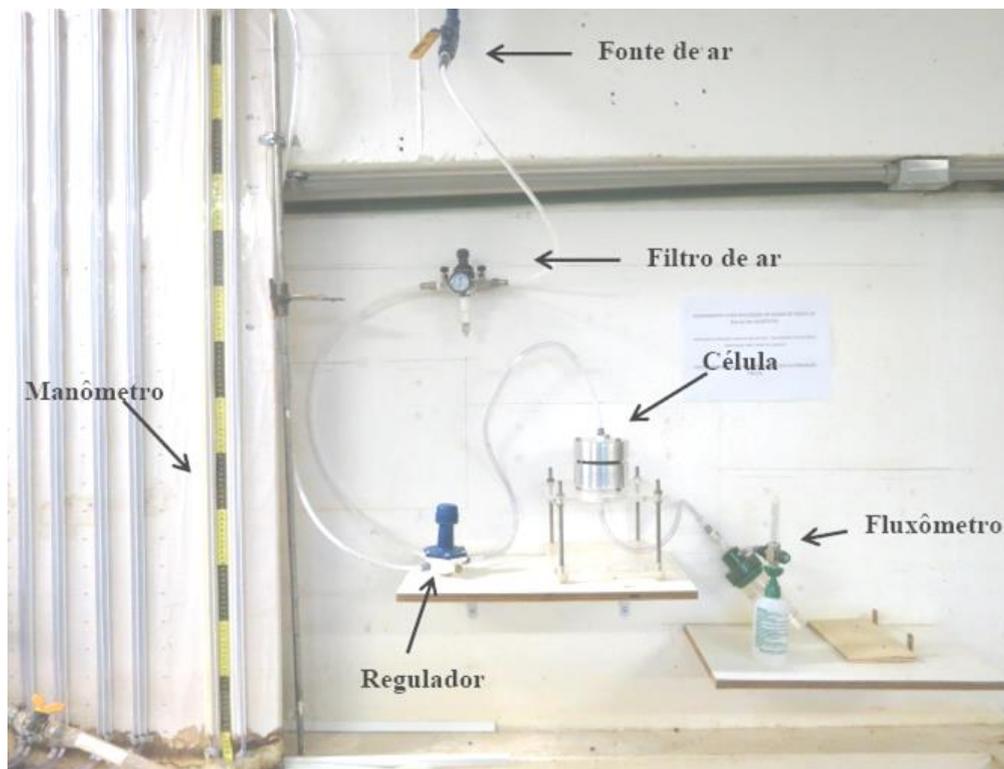


Figura 2.31 Equipamento para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos montado por Lima (2014).

Os elementos que compõem o equipamento para o teste de ponto de bolha foram adquiridos e adaptados com peças e materiais disponíveis, tanto no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, quando encontrados no próprio Distrito Federal. A intenção foi montar um sistema de baixo custo que permitisse a fácil reprodução por outros pesquisadores ou grupos interessados nesta linha de pesquisa.

Na utilização do sistema de ar comprimido existente como fonte de gás e pressão, havia uma preocupação sobre a possível formação de água por condensação. Assim foi importante a instalação de um filtro de ar com purgador entre a fonte de ar comprimido e a célula onde a amostra de geotêxtil era instalada.

O regulador de ar permitiu que fossem impostos acréscimos de pressão e de fluxo de ar, de forma gradativa, para a realização adequada do ensaio. A célula para a instalação da amostra de geotêxtil foi torneada em alumínio e utiliza anéis de borracha (*o-rings*) para a vedação contra vazamento de água e ar. A célula, composta por duas partes – superior e inferior – que se mantêm solidárias com a utilização de parafusos, tem uma placa perfurada com furos de diâmetro de 2 mm sobre a qual é instalada a amostra de geotêxtil e tem função tanto de suporte quanto drenante. A Figura 2.32 apresenta detalhes da célula vazia e com a instalação do geotêxtil. A amostra de geotêxtil é ensaiada com um diâmetro de 60 mm, já a placa perfurada tem o diâmetro de 50 mm.



Figura 2.32 Detalhes da célula utilizada por Lima (2014) no ensaio de ponto de bolha: (a) célula vazia com a placa perfurada (b) amostra de geotêxtil instalada na célula.

A área de placa perfurada é considerada a área ensaiada da amostra. Durante a execução do experimento a amostra é colocada sobre a placa perfurada, fixada por um anel de borracha, o que evita vazamento de ar ou água. Assim todo o ar aplicado passa através da amostra.

Para a medição do ar que passa através da amostra de geotêxtil, foi instalado no sistema um fluxômetro de uso medicinal (Figura 2.33), capaz de medir tanto o fluxo de oxigênio gasoso quanto de ar comprimido. Optou-se por este tipo de fluxômetro de área variável, tanto por estar disponível no mercado de forma acessível, quanto por seu baixo custo e pelo conhecimento anterior sobre seu funcionamento. A capacidade máxima de medida do fluxômetro utilizado é de 15 LPM (litros por minuto).



Figura 2.33 Fluxômetro utilizado para medição do fluxo de ar – em litros por minuto (LPM) – usado no ensaio do *Bubble Point*.

Para a medida de pressão foi utilizado um manômetro de tubo em “U” – também chamado de manômetro de ramo aberto – onde a medida de pressão é dada pela diferença de cota nos dois ramos do manômetro. O manômetro foi preenchido com água destilada e tem uma capacidade de registro de até 1,3 m.c.a, equivalente a aproximadamente 12 kPa.

2.10 RESULTADOS DO BUBBLE POINT TEST – LIMA (2014)

A Figura 2.34 mostra o resultado do ensaio no equipamento em um espécime de geotêxtil não tecido de 200 g/m². A amostra foi ensaiada primeiramente seca e depois úmida. A diferença do valor de fluxo de ar através da amostra, nas duas condições, em cada estágio de pressão, é utilizada para se obter a frequência de ocorrência de poros menores que determinado diâmetro, conforme apresentado na Equação 2.21. O gráfico não indica a coincidência das curvas com o material úmido e seco ao final do estágio de pressão. Isto possivelmente ocorreu devido a limitação nos equipamentos usados para medição do fluxo de ar e pressão aplicados. Desta forma o valor da pressão aplicada não foi suficiente para uma drenagem completa do geotêxtil não tecido, ou ao menos para levá-lo a uma condição de umidade volumétrica mais próxima do valor de umidade volumétrica residual (Lima, 2014).

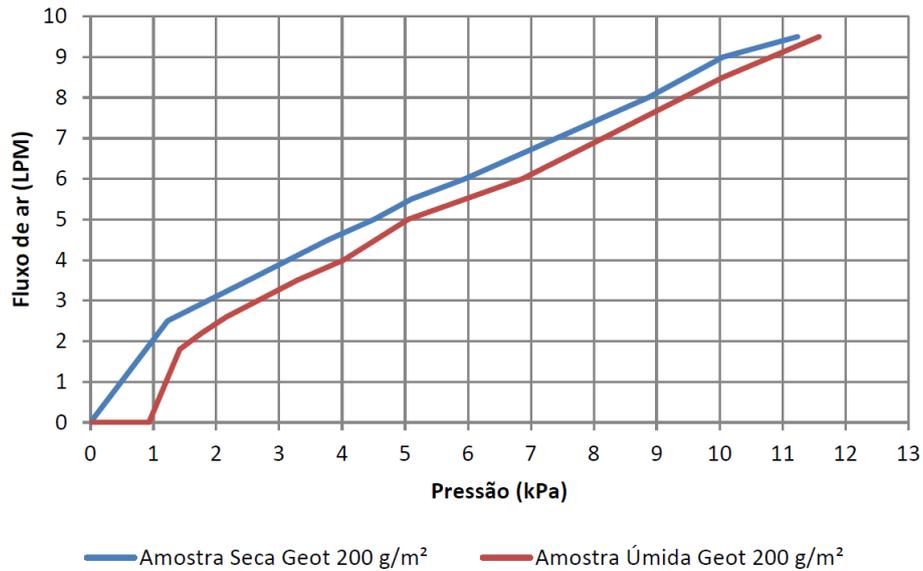


Figura 2.34 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m² (Lima, 2014).

A partir dos valores de fluxo de ar através da amostra seca e úmida para cada estágio de pressão, é calculada a curva de distribuição de poros do material. Para o geotêxtil de 200 g/m² a curva obtida está apresentada na Figura 2.35. O valor de entrada do ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de 200 g/m² pode ser definido como $O_{98} = 0,32$ mm (Lima, 2014).

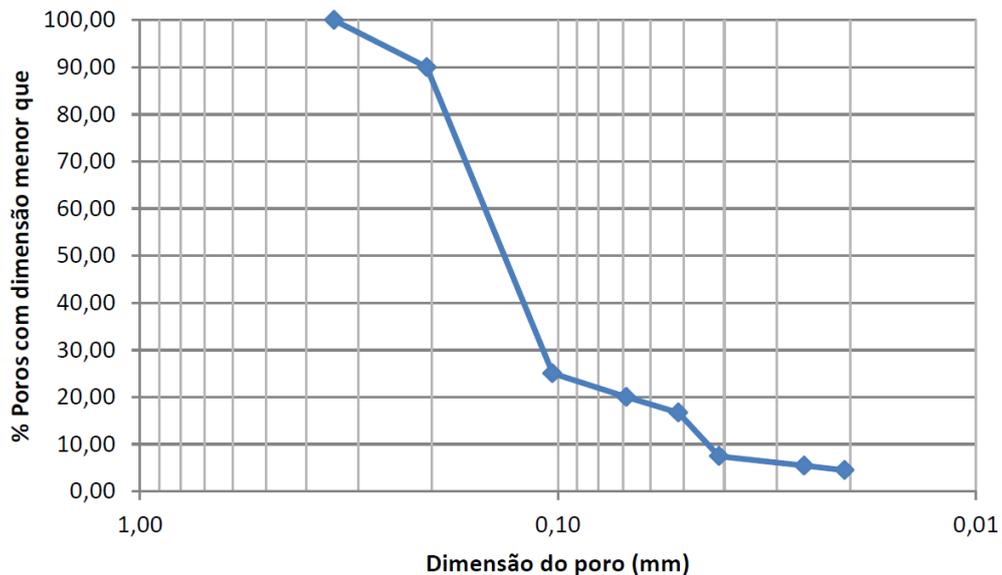


Figura 2.35 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m² (Lima, 2014).

O resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil não tecido de 300 g/m² é ilustrado na Figura 2.36. Como ocorreu no ensaio com o geotêxtil de 200 g/m², os pontos finais das curvas não coincidem nos pontos finais de pressão. Isto ocorre devido ao intervalo de pressão que foi possível registrar com o manômetro utilizado. Na Figura 2.37 é apresentada a curva de distribuição de poros para o geotêxtil não tecido de 300 g/m². O valor do ponto de bolha $O_{98} = 0,33$ mm é semelhante ao obtido pelo geotêxtil de 200 g/m² (Lima, 2014).

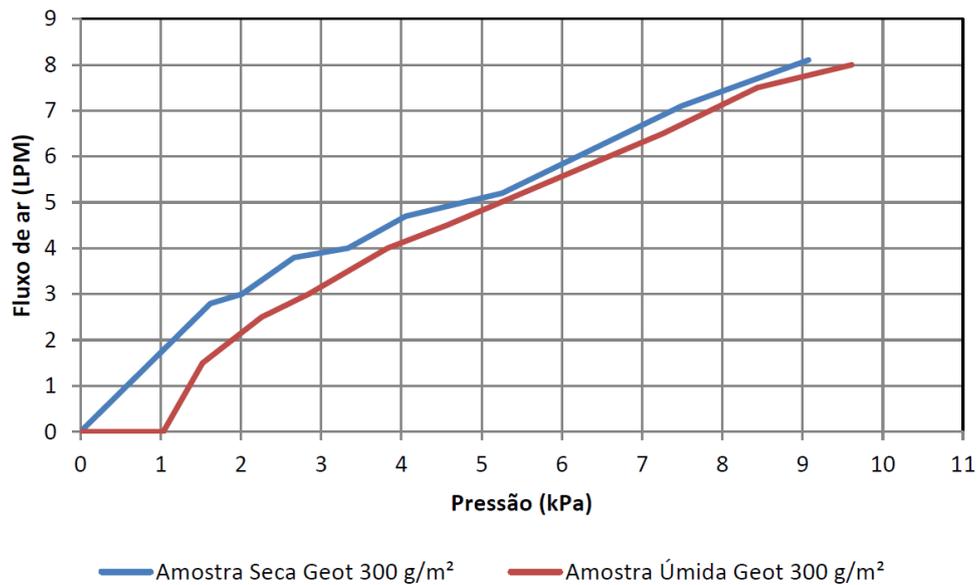


Figura 2.36 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m² (Lima, 2014).

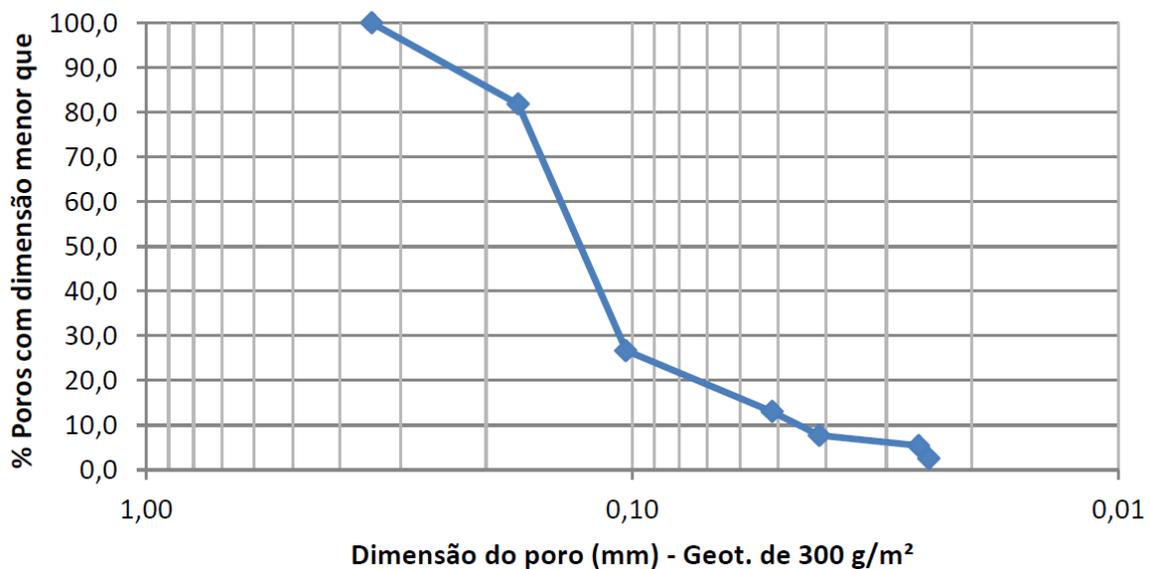


Figura 2.37 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m² (Lima, 2014).

A Figura 2.38 apresenta o resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de 400 g/m². A projeção das curvas do ensaio seco e úmido permite concluir que os valores de fluxo de ar iriam coincidir em um ponto acima da pressão de 13 kPa, devido a drenagem do material úmido. A Figura 2.39 mostra os dados da curva de distribuição de poros obtida para o geotêxtil de 400 g/m². O valor de ponto de foi também semelhante aos demais $O_{98}=0,31$ mm (Lima, 2014).

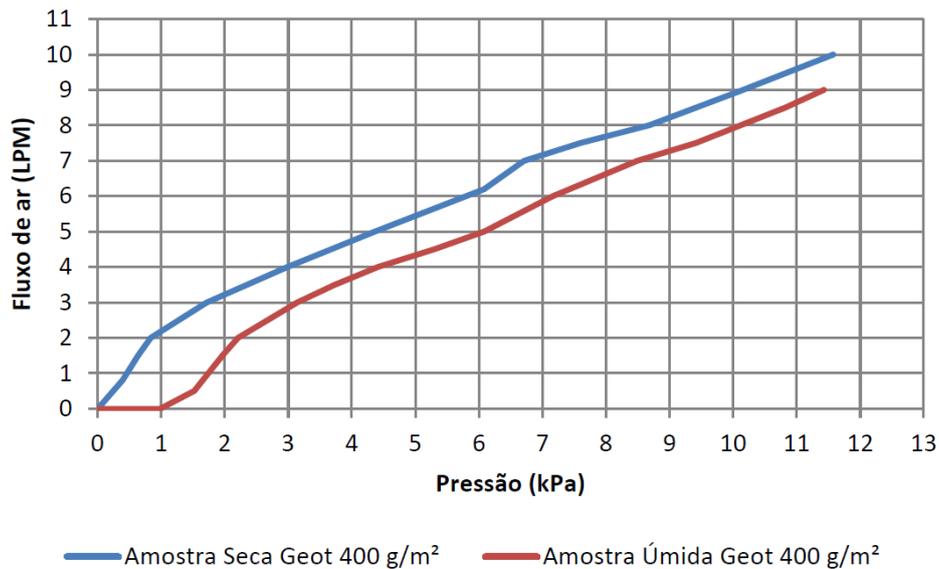


Figura 2.38 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m² (Lima, 2014).

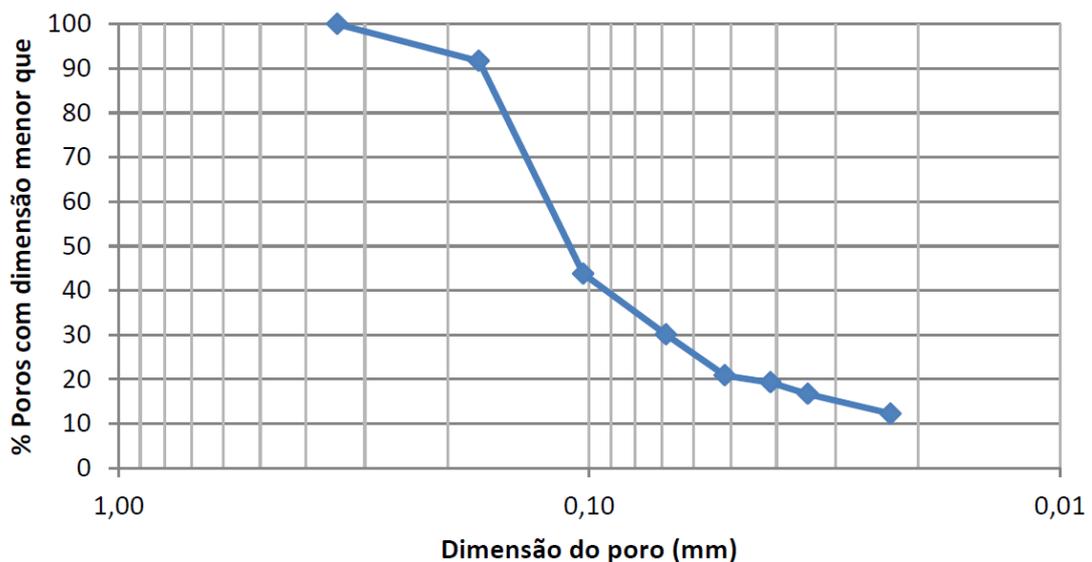


Figura 2.39 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m² (Lima, 2014).

A Tabela 2.5 apresenta as dimensões de poros a partir dos resultados obtidos no equipamento para teste do ponto de bolha na Universidade de Brasília. A partir dos resultados apresentados pelo equipamento para o teste de ponto de bolha pode-se concluir que o equipamento atende ao previsto na norma ASTM D 6767, sendo possível utilizar esta técnica para determinar a distribuição de poros ou de constrições em geotêxteis não tecidos (Lima, 2014).

Tabela 2.5 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis (Lima, 2014).

Amostra	Unidade	O ₉₈	O ₉₅	O ₉₀	O ₈₅	O ₆₀	O ₃₀	O ₁₅	O ₁₀
200 g/m ²	mm	0,32	0,30	0,27	0,23	0,16	0,10	0,06	0,03
300 g/m ²	mm	0,33	0,3	0,25	0,2	0,14	0,11	0,06	0,04
400 g/m ²	mm	0,31	0,25	0,17	0,16	0,13	0,07	0,03	0,02

Considerando a Equação 2.18, temos que o tamanho do poro equivalente é inversamente proporcional à pressão aplicada. Notou-se dificuldade de aplicar baixas pressões devido a sensibilidade do regulador de ar disponível para montagem. Para um fluxo de ar abaixo de 2 LTM houve dificuldades técnicas maiores para aplicação gradual de pressão no equipamento (Lima, 2014).

O equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília se mostrou funcional, o passo seguinte será melhorar a sensibilidade do equipamento utilizando um regulador de ar que permita aplicar gradativamente, baixos valores de ar comprimido, resultando em maiores leituras a baixa pressão. Também deverá ser aumentada a capacidade do manômetro para registrar pressões acima de 12 kPa. A expectativa é conseguir registrar ao menos 15 kPa, considerando a limitação de altura disponível para o manômetro onde o aparelho está localizado. Este valor de pressão seria suficiente para que as curvas úmida e seca, nos ensaios realizados com geotêxteis não tecidos, pudessem coincidir nos valores maiores de fluxo de ar (Lima, 2014).

Considerando as curvas de distribuição obtidas e os gráficos de medição de volume de ar, observa-se que há uma necessidade de aprimorar a obtenção de dados sob baixas pressões (< 1 kPa) a fim de conseguir melhor medição para poros acima de 0,30 mm de diâmetro equivalente (Lima, 2014).

A medição do fluxo de ar através da amostra enfrenta a limitação natural de um fluxômetro de área variável. Foi utilizado um fluxômetro de modelo hospitalar, capaz de medir tanto fluxo

de ar quanto de oxigênio, com medição máxima de 15 LPM. Assim, a menor medida de ar que pode ser registrada com este tipo de equipamento é cerca de 0,5 LPM, isto com a melhoria da válvula de controle de pressão, responsável pela aplicação do ar comprimido no equipamento. Para os fins acadêmicos a que se destina a pesquisa, o equipamento desenvolvido se mostrou promissor, de forma que, com o devido ajuste dos sistemas de medição de volume de ar e de pressão, será um instrumento importante para a compreensão da estrutura porosa de geotêxteis (Lima, 2014).

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Esta seção aborda os materiais utilizados nos ensaios: geotêxteis não tecidos, reguladores de pressão, manômetros, medidores de fluxo de ar. Também aborda e descreve os equipamentos utilizados nos tipos de ensaios realizados durante a execução deste trabalho.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis utilizados nos ensaios de filtração são amostras virgens do tipo não tecido e agulhadas. As gramaturas iguais a 200 e 300 g/m² são denominadas G1 e G2 respectivamente, com a disposição aleatória dos filamentos contínuos 100% polipropileno (PP) da marca Ober S/A. A gramatura igual a 400 g/m² é denominada G3 e possui disposição aleatória dos filamentos contínuos 100% poliéster (PET) da marca Bidim Mexichem. A Figura 3.1 mostra os geotêxteis, e as suas principais características são apresentadas na Tabela 3.1.

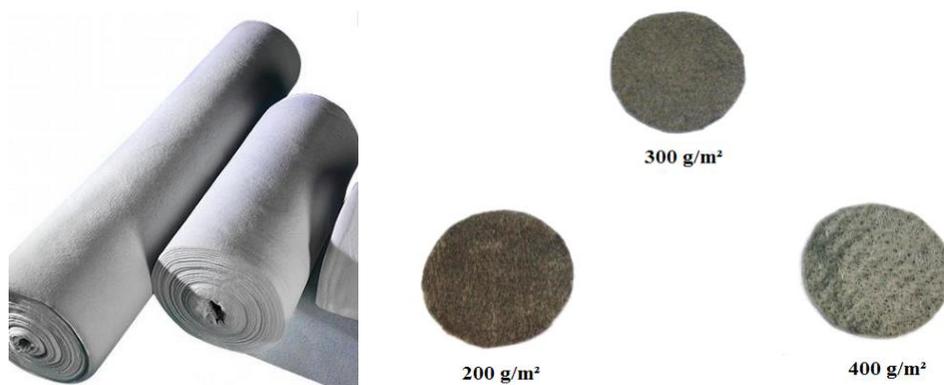


Figura 3.1 Geotêxteis em bobinas (esquerda) e geotêxteis utilizados como amostra (direita).

Tabela 3.1 Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados

Nome	M _A (g/m ²)	t _{gt} (mm)	FOS (mm)	K _n cm/s	Ψ (s ⁻¹)	n (%)	d _f (mm)	K _{sat} (m/s)
G1	200	2,9	0,130	0,22	0,76	93	0,027	0,4
G2	300	3,3	0,110	0,22	0,63	93	0,027	0,4
G3	400	3,8	0,090	0,22	0,57	92	0,027	0,4

Notas: M_A = gramatura (densidade superficial); t_{GT} = espessura nominal; FOS = abertura de filtração (método de ensaio peneiramento hidrodinâmico); K_n = permeabilidade normal ao plano; Ψ = permissividade; n = porosidade; d_f = diâmetro da fibra de poliéster; e K_{sat} = condutividade hidráulica saturada. Valores de M_A , t_{GT} , FOS, K_n , Ψ , n são de Mendes (2006) *apud* Nascimento (2006), Gardoni (2010) e Gardoni (1995). Valores de d_f e K_{sat} são dados fornecidos pelo fabricante.

Os geotêxteis não tecidos já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, e foram utilizados em estudos anteriores por Gardoni (1995), Gardoni (2000) e Tatto (2010). A Figura 3.2 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). Nos geotêxteis ensaiados, os furos do processo de agulhagem são aparentes, o que pode influenciar diretamente na abertura de filtração.

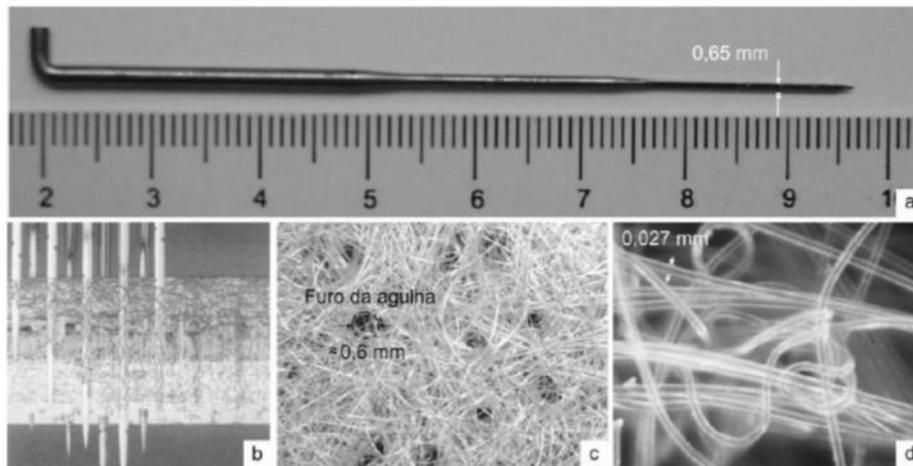


Figura 3.2 Detalhe do geotêxtil: a) agulha utilizada no processo de consolidação, b) processo de consolidação (Hsuan & Koerner, 2002), c) furos das agulhas, d) aleatoriedade da disposição dos filamentos contínuos do geotêxtil não tecido, obtidos com o microscópio de alta resolução (Tatto, 2010).

3.2 ADAPTAÇÕES REALIZADAS NO EQUIPAMENTO BUBBLE POINT TEST

De acordo com Lima (2014), a utilização do equipamento montado na Universidade de Brasília apresentava dificuldades na aplicação de baixas pressões, devido à pouca sensibilidade do regulador de ar disponível na montagem. Para um fluxo de ar abaixo de 2 LPM (litros por minuto) perceberam-se dificuldades técnicas para aplicação gradual de pressão no equipamento. Em função disso, na nova versão do equipamento de *Bubble Point* foi instalada uma nova válvula de controle de pressão, ilustrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 Válvula para controle de pressão instalada no Bubble Point Test.

Com esta válvula, foi possível melhorar a sensibilidade do equipamento, utilizando um regulador de pressão que permitiu aplicar gradativamente, baixos valores pressão de ar comprimido. Sendo assim, houve o aprimoramento de obtenção de dados sob pressões menores que 1 kPa, resultando em uma melhor medição para poros acima de 0,20 mm de diâmetro equivalente, quando o fluido de saturação é a água; e de 0,10 mm de diâmetro equivalente, quando o fluido de saturação é o etanol.

Uma sugestão para pesquisas futuras dada por Lima (2014) foi o aumento da altura do manômetro para registrar pressões maiores. Como já citado anteriormente, o manômetro executado por Lima (2014) tinha uma capacidade de registro de pressão de até aproximadamente 12 kPa. A expectativa era de se conseguir registrar, ao menos, 15 kPa, considerando a limitação de altura disponível para o manômetro onde o aparelho está localizado.

Verificou-se que a altura máxima disponível para a montagem do manômetro em laboratório é de 2 m. Baseando-se nesse dado, e em função da necessidade de medir maiores valores de

pressão, montou-se um novo manômetro com 2 m.c.a, equivalente a aproximadamente 19 kPa, ilustrado na Figura 3.4. Foram realizados ensaios e, como previsto no trabalho de Lima (2014), provou-se que este valor de pressão é suficiente para que as curvas úmida e seca nos ensaios realizados com geotêxteis não tecidos possam coincidir nos valores mais elevados de fluxo de ar. Isto poderá ser visualizado mais adiante no capítulo de *Resultados*.

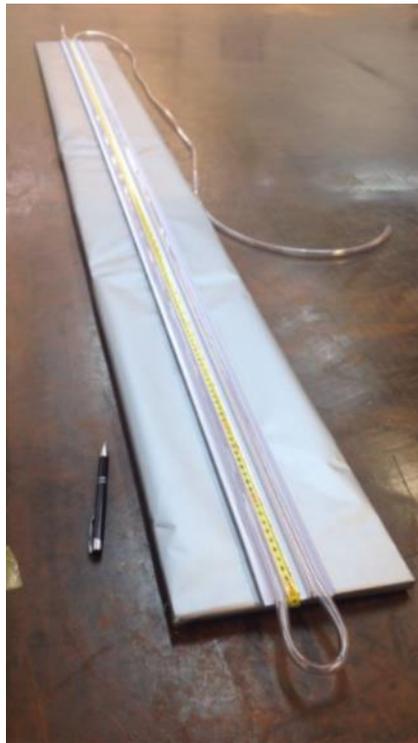


Figura 3.4 Manômetro de ramo aberto construído em laboratório com capacidade de 2 m.c.a.

O manômetro é composto um tubo de polietileno em formato de “U”, com 6 mm de diâmetro interno e 10 mm de diâmetro externo, que são interligados ao regulador de ar por tubos de nylon com diâmetro interno de 4 mm e diâmetro externo de 6 mm. Para o suporte do manômetro, há 2 canaletas conectadas a um painel de madeira de 2 m de altura, como pode-se visualizar na Figura 3.4. Para leitura da diferença de m.c.a. foi utilizada uma fita métrica de 2m. Sendo assim, antes do ensaio os 2 meniscos permanecem na marca de 1000 mm, com o aumento gradual de pressão o nível de água do tubo esquerdo aumenta e o nível de água do tubo direito diminui, possibilitando assim a leitura de variação de m.c.a. (Figura 3.5).



Figura 3.5 Detalhe do manômetro: ambos meniscos se encontram na altura de 1000 mm e indicam o estado inicial do manômetro, onde a pressão é zero.

Como citado por Lima (2014) em seu trabalho, a medição do fluxo de ar através da amostra enfrentava a limitação natural de um fluxômetro. No caso do ensaio de Lima (2014), foi utilizado um fluxômetro de modelo hospitalar, capaz de medir tanto fluxo de ar quanto de oxigênio, com medição máxima de 15 LPM. Assim, a menor medida de ar que foi registrada com este tipo de equipamento por Lima (2014) foi de 0,5 LPM.

Para aprimorar o equipamento foi necessário aumentar a sensibilidade do fluxômetro. Isto foi obtido com a utilização do Fluke 922, um medidor digital do fluxo de ar (Figura 3.6). Com a utilização do Fluke 922, o presente equipamento pode medir valores de até 0,01 LPM, uma acurácia 50 vezes maior que com o antigo fluxômetro de modelo hospitalar. Esta medição com melhor acurácia de valores de vazão de ar baixos permitiu a obtenção de resultados mais confiáveis para poros com maiores diâmetros, como os correspondentes a O_{98} e O_{95} , por exemplo.



Figura 3.6 Medidor digital Fluke 922

Além de ser um medidor digital do fluxo de ar, o Fluke 922 também pode obter dados de: i) pressão do ar, ii) velocidade do ar e iii) temperatura. A Tabela 3.2 abaixo exhibe as unidades e amplitudes de intervalo em que os valores podem ser medidos:

Tabela 3.2 Especificações do Fluke 922

Parâmetro	Faixa	Precisão	Resolução	Unidades
Pressão do ar	±4000 pascal ±16 in H ₂ O ± 400 mm H ₂ O ±40 mbar ±0,6 PSI	±1% + 1 pascal ±1% + 0,01 in H ₂ O ±1% + 0,1 mm H ₂ O ±1% + 0,01 mbar ±1% + 0,0001 PSI	1 pascal 0,001 in H ₂ O 0,1 mm H ₂ O 0,01 mbar 0,0001 PSI	Pa in H ₂ O mm H ₂ O mb PSI
Velocidade do ar	250 a 16.000 fpm 1 a 80 m/s	±2,5 % da leitura a 2000 fpm (10,00 m/s)	1 fpm (pé por minuto) 0,001 m/s	fpm m/s
Fluxo do ar (volume)	0 a 99.999 cfm 0 a 99.999 m ³ /hr 0 a 99.999 l/s	Precisão em função da velocidade e do tamanho do duto	1 cfm 1 m ³ /hr 1 l/s	cfm m ³ /hr l/s
Temperatura	0 a 50 °C 32 a 122 °F	±1% + 2 °C ± 1% + 4 °F	0,1 °C 0,1 °F	°C °F

A célula de ensaio é composta por duas partes que se mantêm solidárias. Dentro dela há uma placa perfurada sobre a qual é instalada a amostra de geotêxtil. Esta placa perfurada serve como base para evitar deformações do geotêxtil durante a aplicação de pressão, tendo função

tanto de suporte quanto drenante. A placa perfurada utilizada por Lima (2014) era constituída por furos de diâmetro uniforme de 2 mm. Gardoni (2014) sugeriu que, para a obtenção de resultados mais próximos da realidade, se executassem furos de maior diâmetro e com tamanhos diferentes. Sendo assim, uma nova placa perfurada foi confeccionada com diâmetros variando de 2 a 4 mm, como ilustrado na Figura 3.7. Assim é possível ter uma representação de distribuição de poros do material drenante mais próxima da realidade.

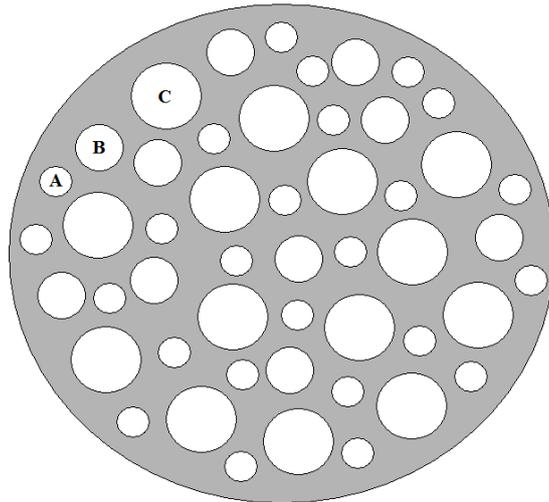


Figura 3.7 Placa perfurada com diâmetros variados: A = 2mm; B = 3mm e C = 4mm.

Como citado, é importante usar um fluido de baixa viscosidade na execução de ensaios, pois a baixa tensão da superfície gera o menor ângulo de contato possível garantindo maior acurácia de resultados no ensaio de determinação de tamanho dos poros. Tendo como base a Tabela 2.4, pode-se dizer que a tensão superficial da água destilada é de 72 dynes/cm a 25°C. Já a tensão superficial do etanol é de 30 dynes/cm a 25°C. Sendo assim, conclui-se que ensaios executados com etanol fornecem resultados mais precisos. Na execução deste trabalho foram realizados ensaios tendo como fluido de saturação a água destilada e o etanol. Essa é outra diferença em relação ao trabalho de Lima (2014), que utilizou a água como único fluido de saturação.

A partir das mudanças que foram realizadas no equipamento de Lima (2014), foi possível obter um equipamento aprimorado do Bubble Point Test, ilustrado na Figura 3.8.

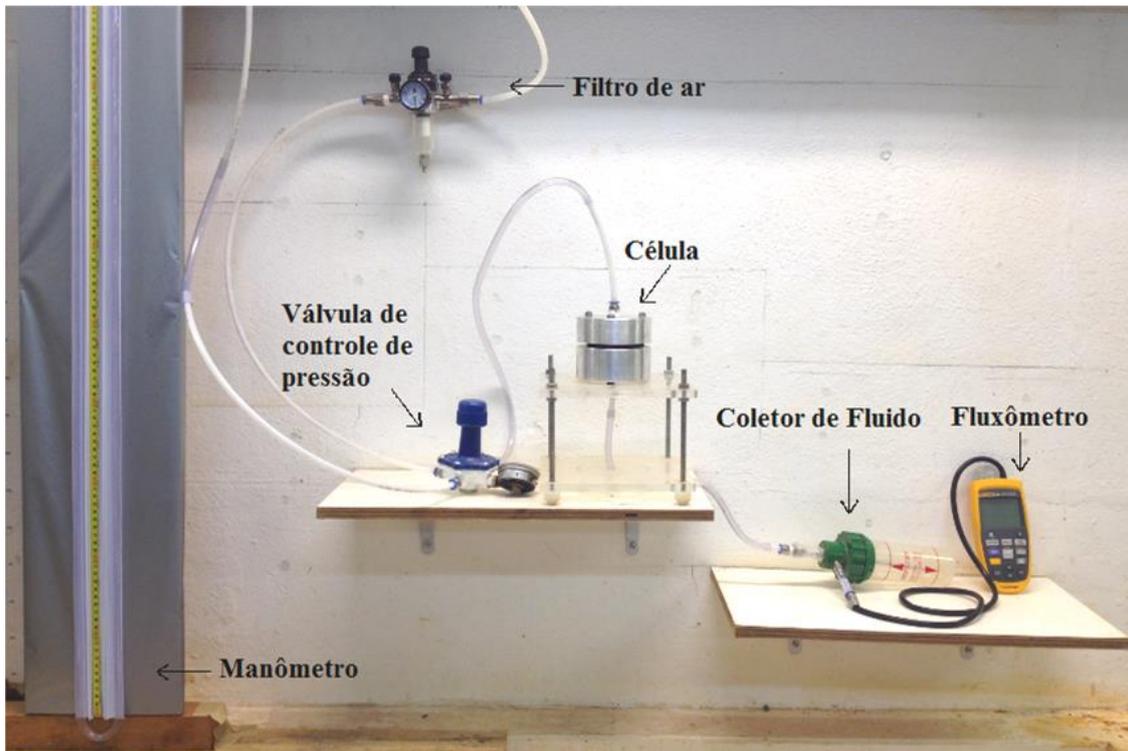


Figura 3.8 Equipamento montado para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos.

Sendo assim, na sua versão atual, o equipamento é composto por:

- 1) Fonte limpa de gás pressurizado, filtrado e com regulação (Figura 3.9);



Figura 3.9 Fonte de ar limpo e pressurizado

2) Manômetro de ramo aberto em formato de “U”, constituindo um instrumento de medição de pressão, cobrindo a faixa de pressão necessária para verificação do tamanho dos poros em estudo (ver Tabela 2.4 e Figura 3.4);

3) Célula porta-amostra de geotêxtil vedada para que não haja vazamentos no suporte da célula (Figura 3.10);

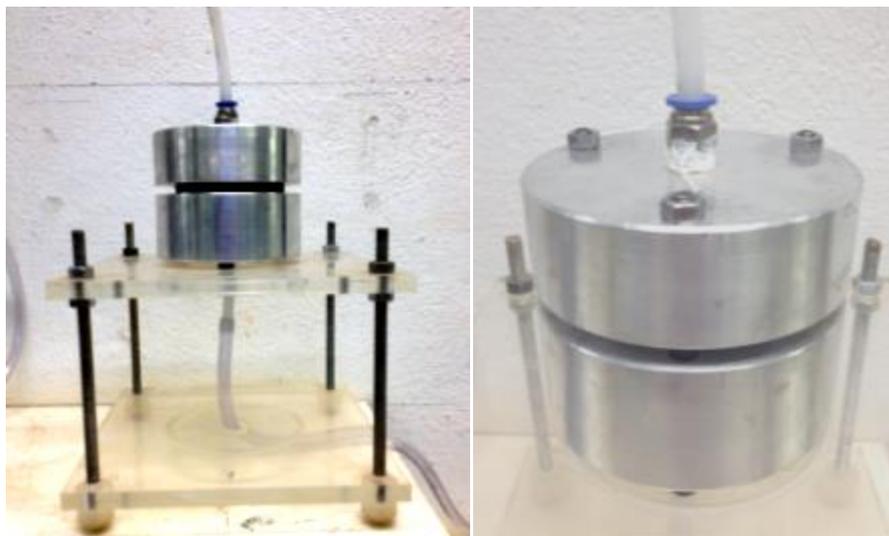


Figura 3.10 Célula onde é ensaiada a amostra de geotêxtil.

4) “O-rings” para evitar a saída de ar durante a aplicação de tensão (Figura 3.11);



Figura 3.11 Dois o’rings posicionados externamente à célula.

5) Medidor de fluxo de ar em LPM, sendo esse equipamento o Fluke 922, com precisão de até 0,01 LPM (Figura 3.12);

6) Coletor do fluido de saturação, para evitar que este possa se infiltrar no fluxômetro. Isto acarretaria em erros na medição do fluxo de ar e também poderia comprometer o funcionamento do medidor digital (Figura 3.12);



Figura 3.12 Coletor de Fluido de saturação à esquerda e Fluke 922 à direita.

7) Encaixes adequados, tubos e conexões para montar o aparelho;

8) Placa perfurada com função tanto de suporte quanto de dreno (Figura 3.7);

3.3 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE TENSÃO NORMAL

Para a verificação da influência que a tensão normal exerce na espessura do geotêxtil, foi utilizado um sistema hidráulico de aplicação de tensão normal que é composto por um tanque de nitrogênio sob alta pressão, da *White Martins Gases Industriais S.A.* Este gás é caracterizado por não ser inflamável, nem poluente. O cilindro de gás é conectado a uma interface óleo-gás que transmite a tensão para o cilindro hidráulico de 500 kN, modelo RCY-506, da marca *Yellow Power*, fixo à estrutura de reação acima da célula de medição da espessura. O pistão do cilindro está conectado a uma célula de carga da marca *Kratos Equipamentos Industriais Ltda*, com capacidade máxima de 20 kN e que transfere a carga para a célula onde é feita a medição da espessura do geotêxtil. O esquema do equipamento está ilustrado na Figura 3.13.

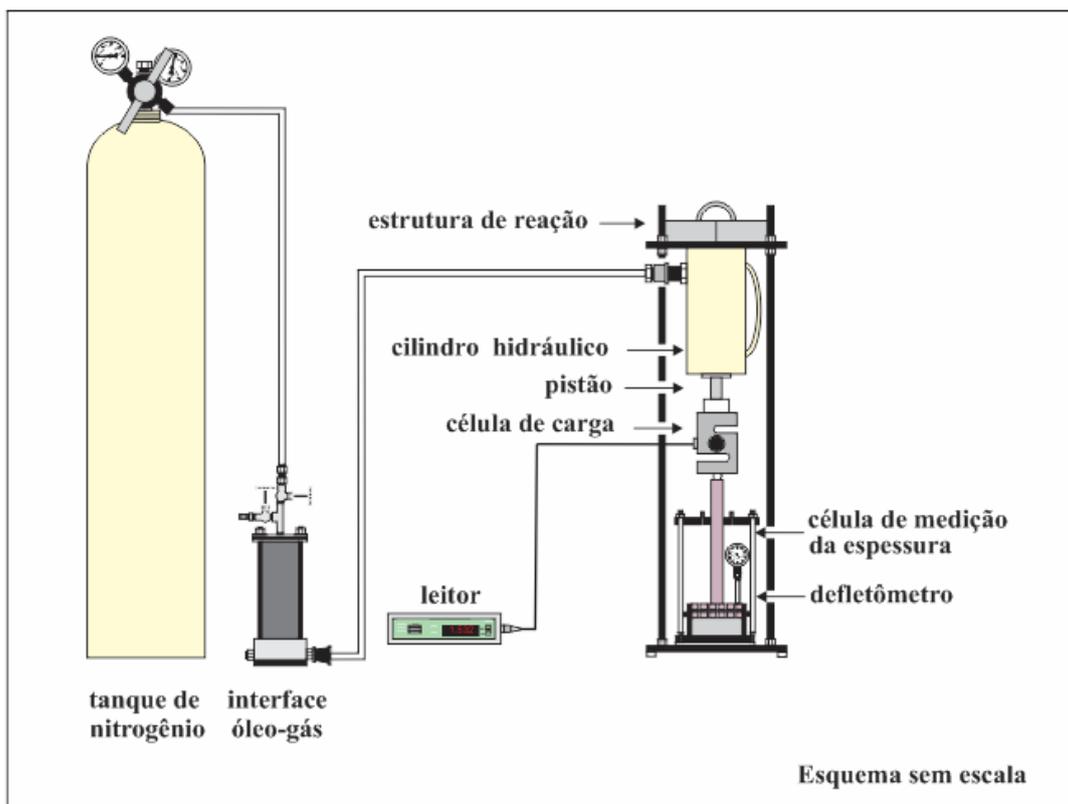


Figura 3.13 Esquema do equipamento de aplicação de tensão normal (modificado de Tatto, 2010).

Para a medição da espessura do geotêxtil sob compressão foi utilizado um defletômetro e uma base magnética.

3.4 EQUIPAMENTO DO BUBBLE POINT TEST COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTEL

Após a realização do ensaio de tensão normal, foi possível obter valores de espessura utilizados como base para a realização de novos ensaios no equipamento do Bubble Point Test. Isso foi feito com o intuito de que as espessuras lidas no ensaio do tópico anterior fossem usadas nas amostras do ensaio BBP, simulando como se o geotêxtil estivesse comprimido. Assim, foi possível ensaiar, com o uso do Bubble Point Test, a variação do comportamento de abertura de filtração do geotêxtil como se ele estivesse submetido à determinada tensão normal associada àquela espessura.

Sendo assim, foi necessário diminuir a espessura normal do geotêxtil para simular que este estivesse submetido a uma respectiva tensão. Para diminuir a espessura da amostra, foi utilizada uma tela metálica superior e inferior envolvendo o geotêxtil, sendo estas costuradas na amostra para manter a sua espessura constante após descompressão.

Vale ressaltar que neste ensaio não foi aplicada tensão normal, a variação da espessura da amostra foi realizada pela costura do geotêxtil em uma tela superior e inferior. Após a costura o geotêxtil é comprimido obtendo um novo valor de espessura nominal (t_{GT}) correspondente ao que este teria se estivesse aplicado a determinada tensão normal. Esse procedimento pode ser visualizado na Figura 3.14.

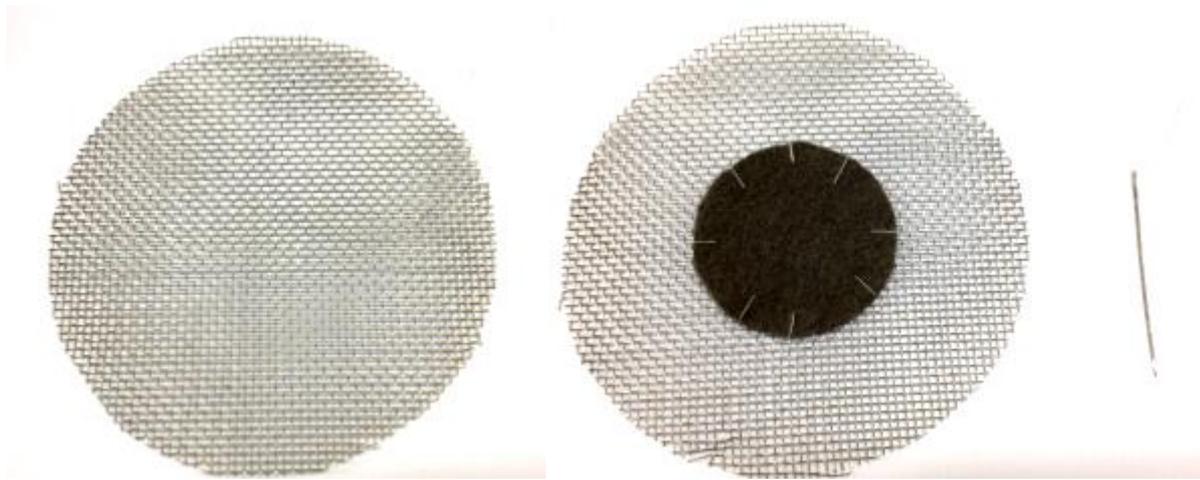


Figura 3.14 Telas perfuradas superior e inferior ao geotêxtil para controle da espessura das amostras – durante a realização do ensaio de Bubble Point – simulando diversas tensões. Nas ilustrações também se verifica geotêxtil costurado à tela e agulha utilizada no processo.

Após a costura do geotêxtil nas telas superior e inferior, era realizada a verificação da espessura respectiva à determinada tensão. As fôrmas da tela superior e inferior eram cortadas para corresponder ao tamanho da amostra e era realizado o ensaio com os mesmos procedimentos do Bubble Point Test.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Devido à sua complexidade, o mecanismo de filtração tem sido objeto de muitos estudos, visando o estabelecimento de critérios de filtro mais realistas. Segundo Gardoni (2000), os critérios usuais para filtros de geotêxtil não consideram a influência da tensão de compressão que causa a redução dos poros da manta, modificando diretamente a abertura de filtração. Conclui-se que o geotêxtil não trabalhará no campo nas condições em que é ensaiado e, por isso, há a necessidade de execução de ensaios que levem em conta o confinamento, objetivo dessa dissertação.

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 para revisão geral dos critérios. Tais experimentos são detalhados adiante.

4.1 PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO

Os procedimentos básicos de ensaio visaram a preparação das amostras de geotêxtil e equipamentos, assim como a descrição da forma de aplicação da tensão normal.

4.1.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTEL

A preparação de amostragem do geotêxtil não tecido baseia-se em diminuir a variabilidade e heterogeneidade usualmente presente nas amostras para ensaios. Os geossintéticos são tipicamente fornecidos pelas empresas em bobinas, sendo que ao longo do mesmo geotêxtil as propriedades como gramatura (M_A), 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.

As normas da ABNT foram seguidas na execução da amostragem a fim de diminuir a variabilidade já citada. Mesmo que a amostragem seja apropriada, convém assegurar a melhor significância estatística 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, os seguintes aspectos devem ser observados:

1) cada rolo deve estar em bom estado e a embalagem, se houver, deve estar intacta. A amostra pode ser enrolada e, de preferência, não dobrada. Se a amostra não for cortada em corpos-de-prova imediatamente, ela 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 da bobina não podem ser usadas para retirada da amostra;

3) quando parte do produto a ser amostrado apresentar alguma irregularidade, como áreas amassadas e rasgadas, estas partes devem ser evitadas ao selecionar a amostra;

4) as amostras de geotêxtil devem ser selecionadas somente após serem obtidas as informações relativas ao número de espécimes, formato e demais características. Na amostragem do presente trabalho, o geotêxtil foi fornecido em mantas de 200 m de comprimento por 2,3 m de largura;

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 essa seleção de área, para cada gramatura de geotêxtil, obteve-se uma área com dimensões de 2,1m x 2,1m, sendo acomodada em uma superfície plana e limpa, permanecendo neste local por 24 h (Figura 4.1). Nesta área, foram marcados 196 quadrados de 150 mm de lado ao longo do seu comprimento e numerados (Figura 4.1);

7) para a seleção dos números da forma mais variada possível utilizou-se a função =aleatórioentre(inferior,superior) no Excel, sendo inferior = 1 e superior = 196. Assim pôde-se obter 30 números para cada gramatura de geotêxtil para, posteriormente, recortá-los da manta e identificá-los (Figura 4.2);

8) os espécimes quadrados de 150 mm de lado – foram pesados para simples conferência de suas gramaturas e recortados em círculos de 60 mm de diâmetro (Figura 4.3);

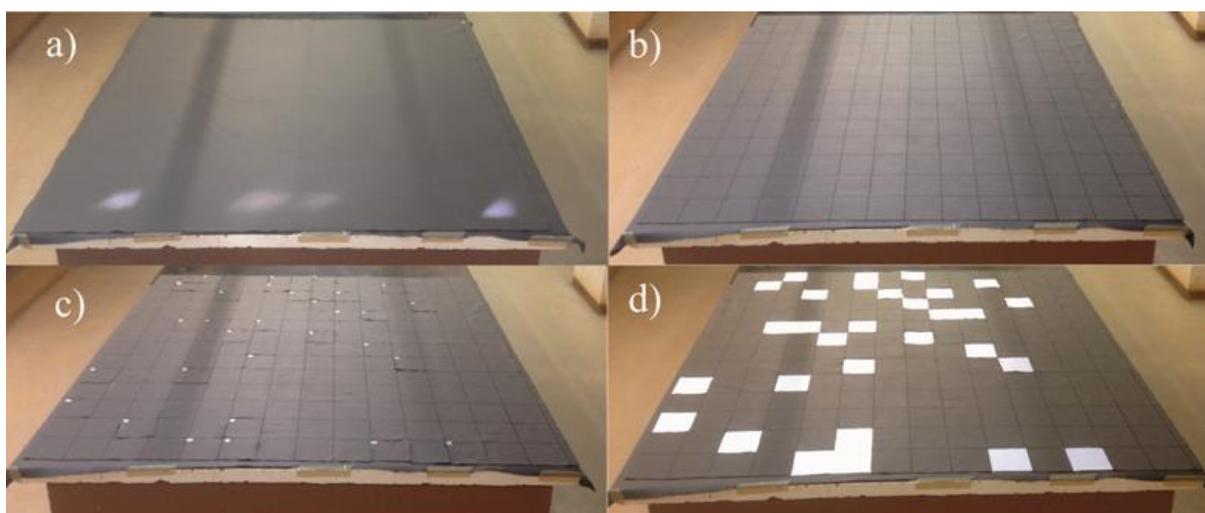


Figura 4.1 Amostragem de geotêxtil: a) amostra sem irregularidades; b) marcação de 196 quadrados de 150 x 150 mm; c) identificação dos quadrados com números; d) recorte das amostras com números obtidos aleatoriamente.

Nota: As duas linhas aparentes no geotêxtil são resultantes da iluminação no momento de retirar a foto.



Figura 4.2 Espécimes de geotêxtil identificados.



Figura 4.3 Identificação das áreas de menor gramatura.

9) os espécimes circulares foram pesados para nova conferência de suas gramaturas, adotando-se como critério de aceitação diferenças máximas de $\pm 10\%$ em relação à gramatura especificada pelo fabricante;

10) depois de selecionados, os espécimes foram armazenados em uma caixa para que fossem manuseados o mínimo possível, evitando alterações em suas propriedades.

Para o ensaio de amostras secas de geotêxtil: foi necessário pesar as amostras, submergi-las em água destilada durante 1 h, e depois deixá-las secar. O espécime deve estar completamente seco antes do ensaio. Pesar o espécime depois de secagem ao ar, até que um peso igual ao peso inicial do espécime fosse alcançado. A norma D6767-11 permite que se utilize um ventilador para facilitar a secagem.

Para o ensaio de espécimes úmidos de geotêxtil: no caso de espécimes saturados com água, o espécime de geotêxtil era colocado em um recipiente com água destilada e levado ao fogo por 1 hora para assegurar a completa saturação do espécime e a eliminação das bolhas de ar presentes entre os filamentos do geotêxtil. Esse foi também o procedimento adotado por Tatto (2010). No caso de espécimes saturados com etanol, o espécime de geotêxtil era colocado em um recipiente com etanol por 1 hora para assegurar a sua completa saturação. É importante ressaltar que o etanol não foi levado ao fogo por questões de segurança.

Cabe destacar que, para este tipo de geotêxtil, a influência da temperatura no encolhimento é pequena. Isto ocorre porque o poliéster é um polímero termoplástico e pode sofrer repetidos estágios de aquecimento e resfriamento sem perder as suas características básicas. Uma malha metálica foi utilizada (Figura 4.4), para evitar a flutuação total do espécime nos minutos iniciais da saturação, o que a faria entrar em contato com o ar. Conforme a saturação do espécime era completada, a mesma deslocava-se para o fundo do recipiente, por ter uma densidade ($1,32 \text{ g/m}^3$) superior à da água.



Figura 4.4 Saturação do espécime de geotêxtil em água destilada.

Após o processo de saturação, o espécime era colocado na base da célula, que se encontrava dentro de um reservatório plástico totalmente preenchido com água destilada ou etanol, dependendo do fluido de saturação. Durante todo o processo de acondicionamento do geotêxtil, o mesmo permaneceu saturado.

4.1.2 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DO BUBBLE POINT TEST

Os procedimentos seguidos nos ensaios de BBP foram:

- 1) colocação do espécime seco de geotêxtil sobre a placa perfurada na base da célula;
- 2) posicionamento do anel de vedação (*o'ring*) sobre o geotêxtil e externamente à célula;
- 3) fechamento e manutenção da parte superior e inferior da célula solidárias de forma que não houvesse vazamento de ar;
- 4) verificação se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;
- 5) aplicação de valores conhecidos de pressão gradativamente até a pressão máxima;
- 6) coleta de dados de fluxo de ar para a respectiva pressão para o espécime seco;
- 7) redução da pressão e remoção do espécime da célula;

8) saturação completa do geotêxtil, submergindo-o no líquido de saturação (água destilada ou etanol) por um período de 1 hora. A norma D 6767-11 sugere que esse tempo seja de 30 min, mas considerando que o geotêxtil tende a ser um material hidrofóbico, optou-se por aumentar este tempo para se assegurar a devida saturação do espécime;

9) instalação do espécime de geotêxtil saturado na célula;

10) colocação da célula dentro de um reservatório plástico totalmente preenchido com água destilada ou etanol, garantindo a saturação;

11) retirada do reservatório plástico e logo após aplicação de valores conhecidos de pressão aumentando-a lentamente até a pressão máxima;

12) coleta de dados de fluxo de ar para a respectiva pressão para o espécime saturado;

13) redução da pressão, retirada do espécime de geotêxtil e limpeza da célula para o ensaio seguinte.

4.2 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE APLICAÇÃO DE TENSÃO NORMAL

O ensaio de aplicação de tensão normal foi utilizado para se pré-comprimir o espécime de geotêxtil antes da realização do ensaio de BBP. A aplicação da tensão normal foi executada no mesmo equipamento utilizado por Tatto (2010). Monitorou-se o valor da força na leitora ligada à célula de carga. Um esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão é apresentado na Figura 4.5.

O procedimento completo para a aplicação de tensão consistiu em (Tatto, 2010):

1) aferir se o parafuso de regulagem (PR) (Figura 4.5), a válvula B e válvula do cilindro (VC) (Figura 4.5) estavam fechados antes de iniciar o fluxo de nitrogênio, impedindo que o gás fosse transferido para o trecho 1 e movimentasse o pistão do cilindro hidráulico;

2) abrir parcialmente VC e o PR, permitindo o fluxo de gás no trecho 1. Neste momento, o manômetro M1 indica a pressão no trecho 1 e o manômetro M2 indica a pressão no trecho 2;

3) abrir a válvula B, permitindo o fluxo de óleo da interface óleo-gás no trecho 2 e observar a movimentação do pistão do cilindro hidráulico e os valores acusados na célula de carga. Se a carga ultrapassasse o valor desejado, seria necessário abrir a válvula A, permitindo a saída do gás em S;

4) fechar a válvula A quando a célula de carga acusar o valor desejado. Neste momento o pistão do cilindro hidráulico cessa seu movimento vertical.

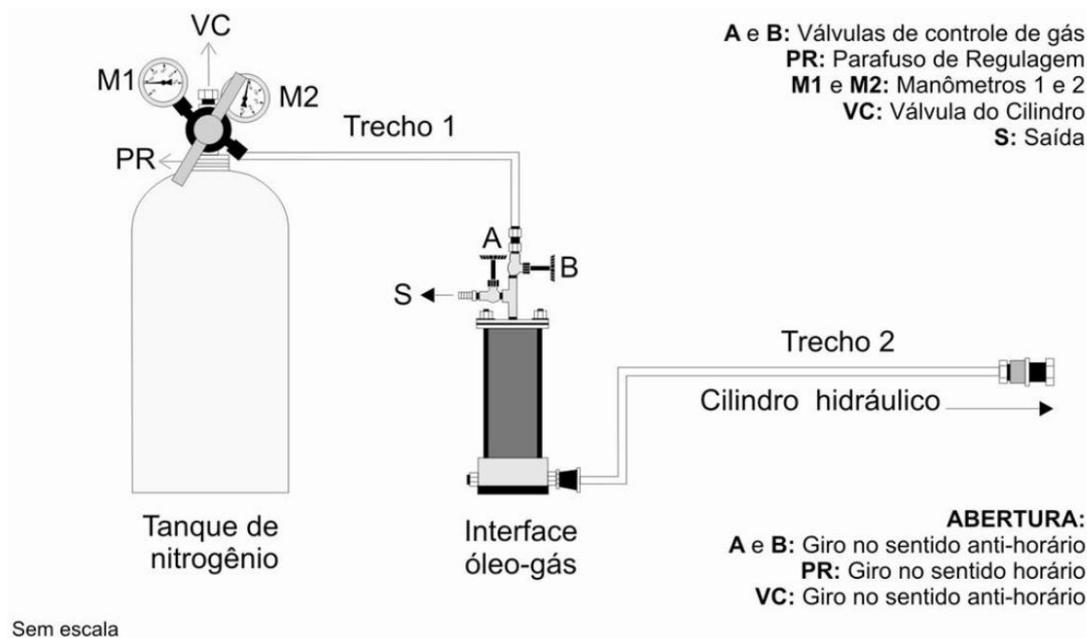


Figura 4.5 Esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão (Tatto, 2010).

Para cada incremento de carga, a válvula B era novamente aberta até a célula de carga acusar o novo valor desejado. Ao término do ensaio, os seguintes procedimentos foram executados (Tatto, 2010):

- 1) fechar a válvula B, interrompendo o abastecimento de gás para a interface óleo-gás;
- 2) abrir a válvula A, permitindo a retirada do gás de dentro da interface pela saída S;
- 3) fechar a VC e abrir o PR;
- 4) abrir a válvula B, permitindo que o gás restante no trecho 1 saísse por S e a pressão em M1 e M2 retornassem a zero;

5) fechar A, B e PR.

Os passos anteriores são relativos ao maquinário utilizado para que fosse possível a aplicação da tensão normal. Abaixo são apresentados os procedimentos para realização completa do ensaio de tensão normal e obtenção de espessura nominal (t_{GT}):

1) calibrar a célula de carga e verificar o devido funcionamento do sistema hidráulico de aplicação de tensão normal pelo tanque de nitrogênio sob alta pressão;

2) posicionar o defletômetro e a base magnética de forma a facilitar a leitura de variação de espessura nominal (t_{GT}) do geotêxtil;

3) pesar os espécimes de geotêxtil, submergi-los em água destilada durante 1 h, e depois deixá-los secar. O espécime deveria estar completamente seco antes do ensaio. Pesar o espécime depois da secagem ao ar, até que um peso igual ao seu peso inicial ser alcançado;

4) colocar o espécime seco de geotêxtil sobre a base da célula;

5) aplicar os seguintes valores de tensão normal: 6 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1000 kPa, 1500 kPa e 2000 kPa, aumentando-se lentamente até a tensão máxima;

6) anotar os valores de tensão normal e a variação de espessura nominal (t_{GT}) do espécime;

7) reduzir a tensão de acordo com os procedimentos de aplicação da tensão normal;

8) remover o espécime de geotêxtil da célula.

4.3 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE BUBBLE POINT TEST COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTEL

O procedimento de ensaio de BBP com geotêxtil comprimido consistiu em:

- 1) colocar o espécime seco de geotêxtil comprimido pela tela superior e inferior na base da célula;
- 2) posicionar o *o'ring* sobre o geotêxtil e externamente à célula;
- 3) fechar e manter a parte superior e inferior da célula solidárias de forma que não houvesse vazamento de ar;
- 4) verificar se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;
- 5) aplicar valores conhecidos de pressão aumentando lentamente até a pressão máxima;
- 6) anotar dados de fluxo de ar para a respectiva pressão para a amostra seca;
- 7) reduzir a pressão e remover o espécime de geotêxtil da célula;
- 8) saturar completamente o geotêxtil, submergindo-o no líquido de saturação (água destilada ou etanol) para um período de 1 hora;
- 9) substituir o geotêxtil saturado na célula;
- 10) colocar a célula dentro de um reservatório plástico totalmente preenchido com água destilada ou etanol, garantindo a saturação;
- 11) retirar o reservatório plástico e logo após aplicar valores conhecidos de pressão aumentando-a lentamente até a pressão máxima;
- 12) anotar dados de fluxo de ar para a respectiva pressão para o espécime úmido;
- 13) reduzir a pressão, retirar o espécime de geotêxtil e limpar a célula para o próximo ensaio.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Os ensaios para determinação da curva de distribuição de poros dos geotêxteis ensaiados 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 e tendo como referência do trabalho desenvolvido por Eun & Tinum (2011) e Lima (2014). Para cada amostra, foram realizadas séries de ensaios, tendo sido importante, em alguns momentos, repeti-los, levando em conta que os geotêxteis, principalmente os mais finos, têm áreas com gramaturas muito variadas.

5.1 ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO NOVO MANÔMETRO SENDO ÁGUA O FLUIDO DE SATURAÇÃO

A Figura 5.1 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil de gramatura 200 g/m², com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime saturado, tendo como fluido de saturação a água. Nesta etapa, como o Fluke 922 ainda não havia sido instalado, então o fluxômetro de modelo hospitalar foi usado para medir o fluxo de ar. O novo manômetro com 2 m.c.a., com a medição equivalente a aproximadamente 19 kPa já havia sido instalado. A diferença entre os valores de fluxo de ar através do espécime registrada para cada intervalo de pressão corresponde à resistência à passagem de ar oferecida pelo líquido presente nos poros do material saturado. À medida que ocorre a drenagem do tecido os pontos finais do ensaio coincidem, o que representa que o geotêxtil saturado já foi drenado suficientemente e começa a se comportar como uma amostra seca. Para uma pressão equivalente a 15 kPa as duas curvas coincidem com a amostra molhada no valor residual de umidade.

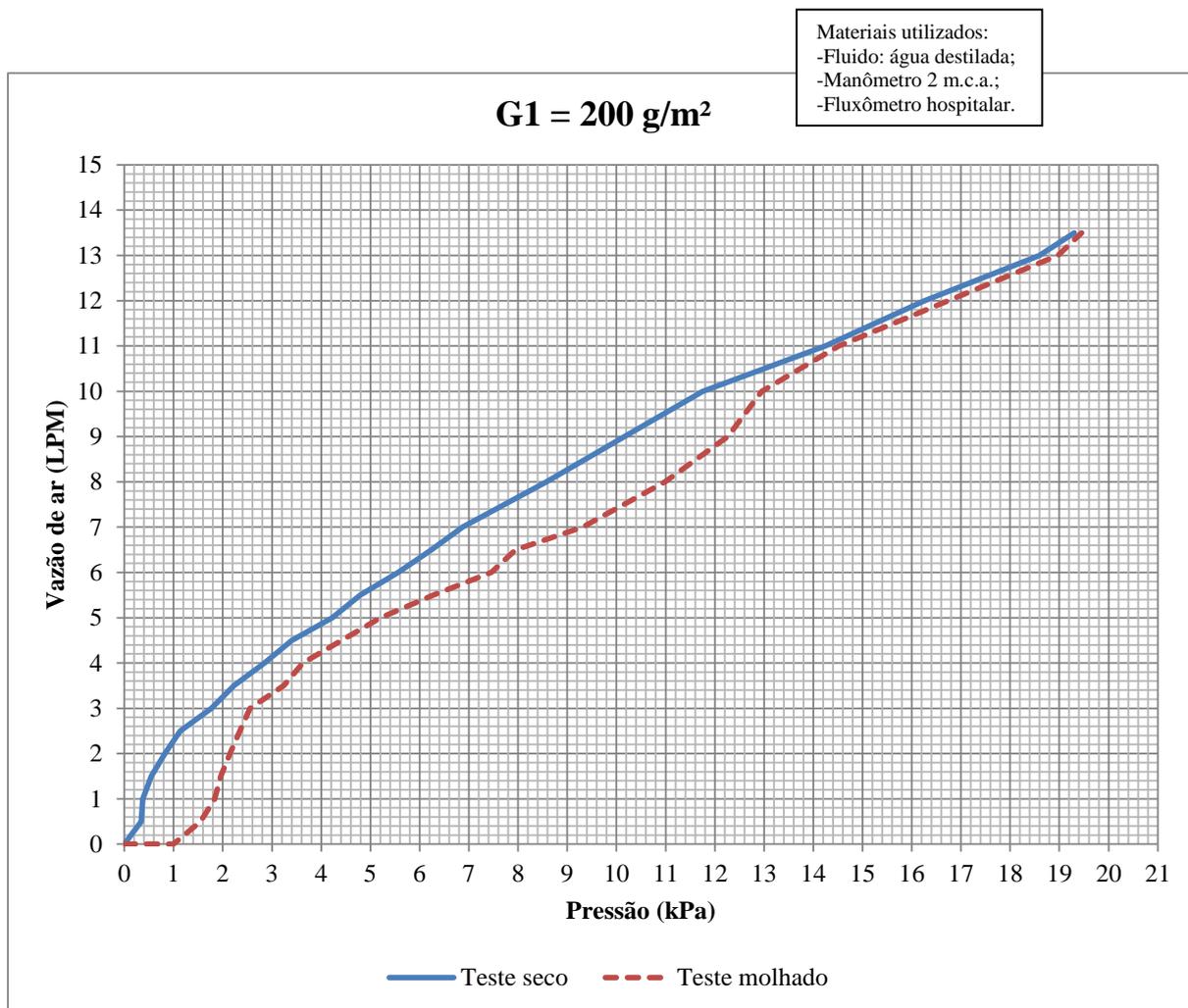


Figura 5.1 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m².

A Figura 5.2 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de gramatura 200 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado pode-se considerar $O_{98} = 0,3 \text{ mm}$ para este geotêxtil.

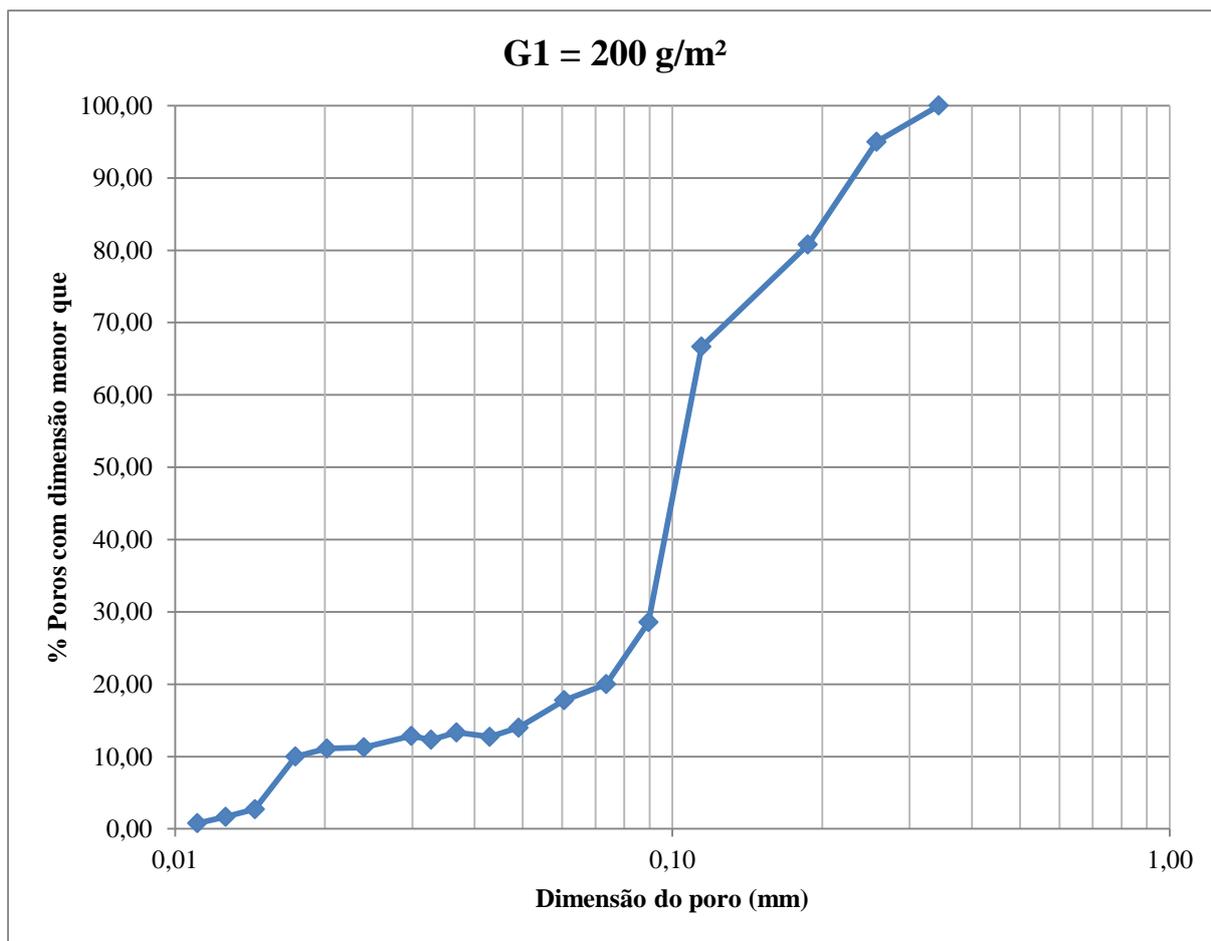


Figura 5.2 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m².

O resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de gramatura 300 g/m², tendo como fluido de saturação a água, é mostrado na Figura 5.3. Para uma pressão equivalente a 13 kPa as duas curvas coincidem, com a amostra molhada no valor residual de umidade.

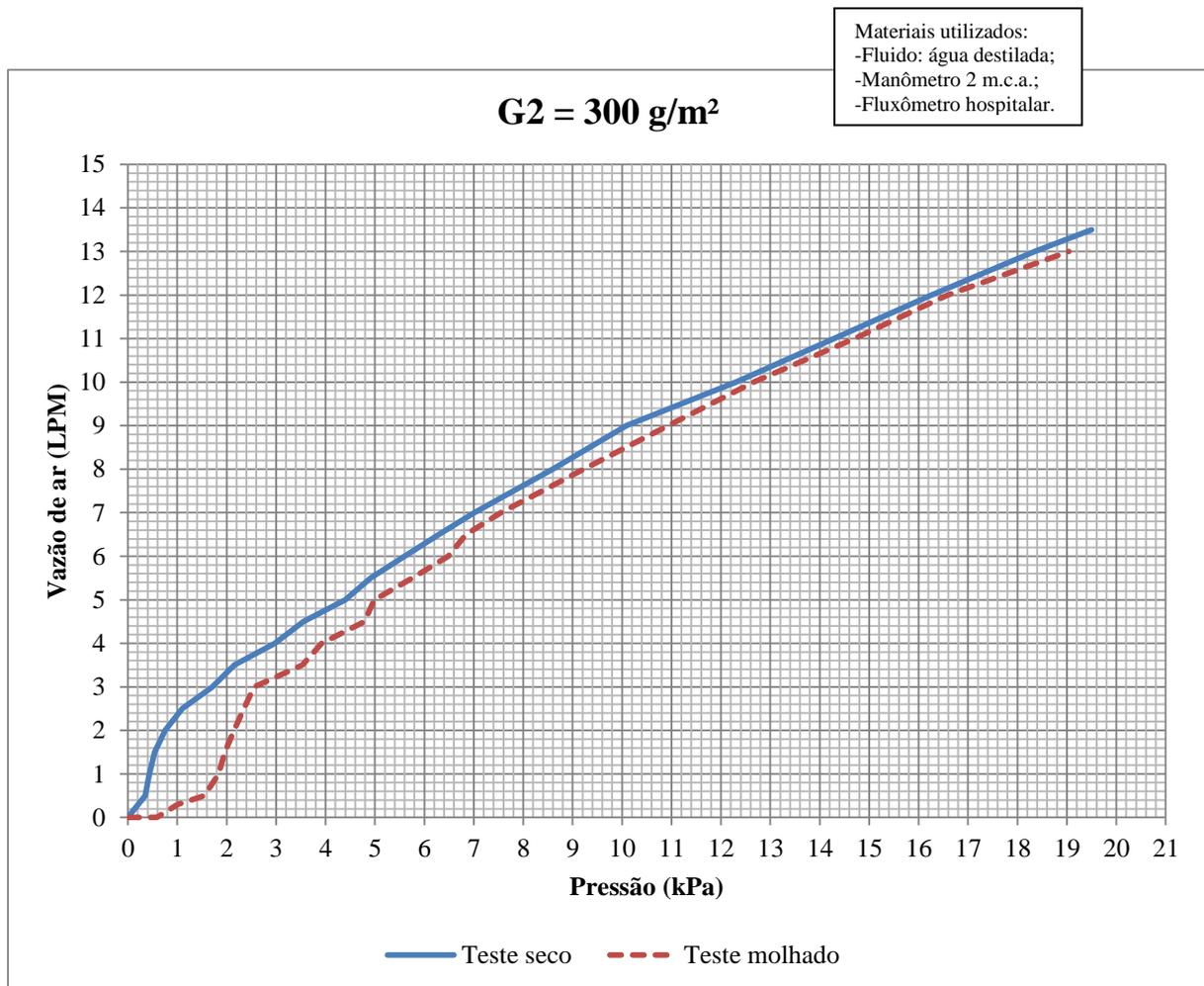


Figura 5.3 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m².

A Figura 5.4 apresenta a curva de distribuição de poros obtida pelo ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com 300 g/m². O diâmetro equivalente de poro para o ponto de bolha nesta amostra foi $O_{98} = 0,31 \text{ mm}$ próximo do obtido pelo geotêxtil de gramatura 200 g/m².

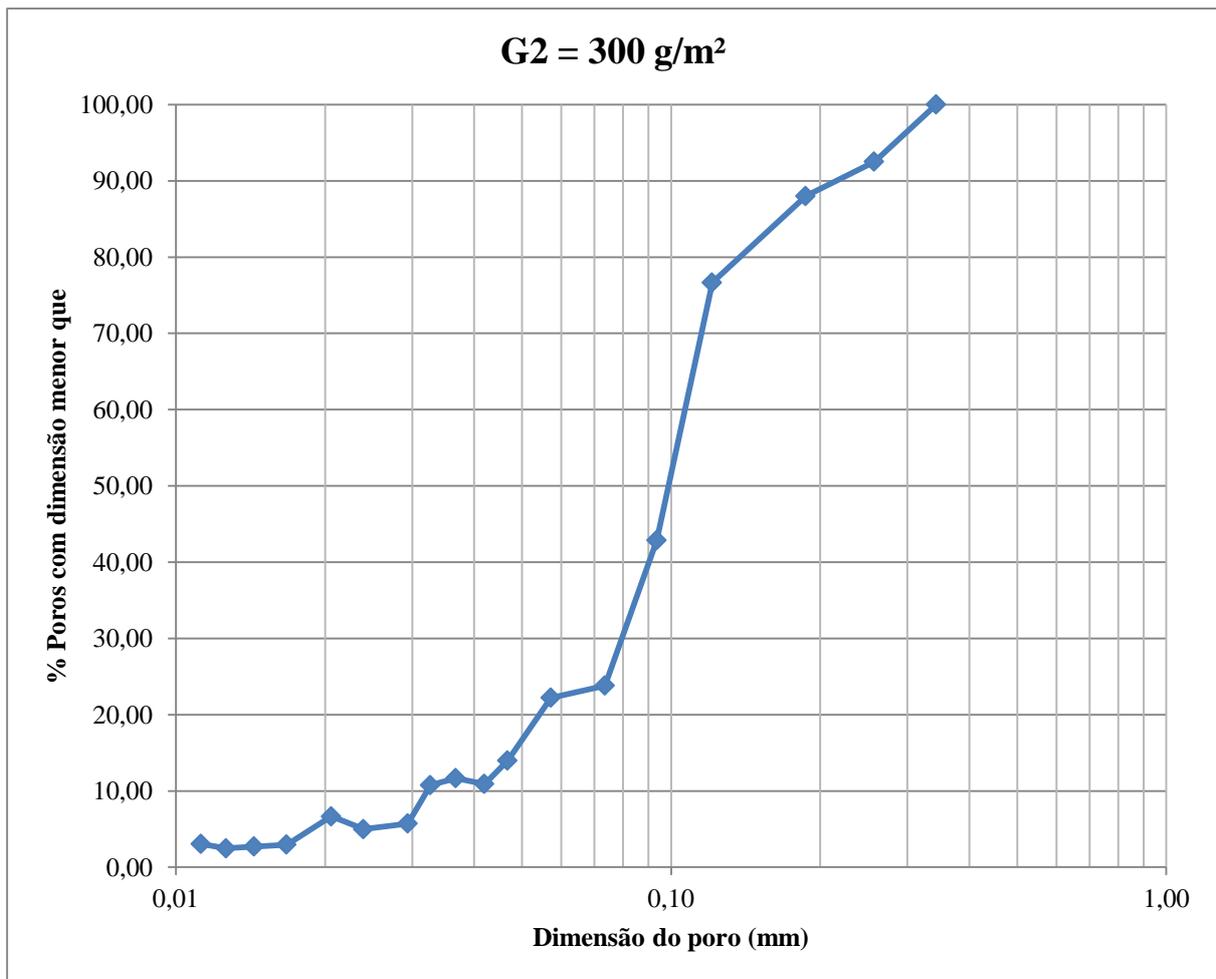


Figura 5.4 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m².

Na Figura 5.5, é apresentado o resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com gramatura igual a 400 g/m², tendo como fluido de saturação a água. Os valores de pressão nas curvas dos ensaios com amostra úmida e seca não coincidem, notando-se a necessidade de aplicação de maiores pressões para verificar em que ponto o espécime úmido atinge a umidade residual.

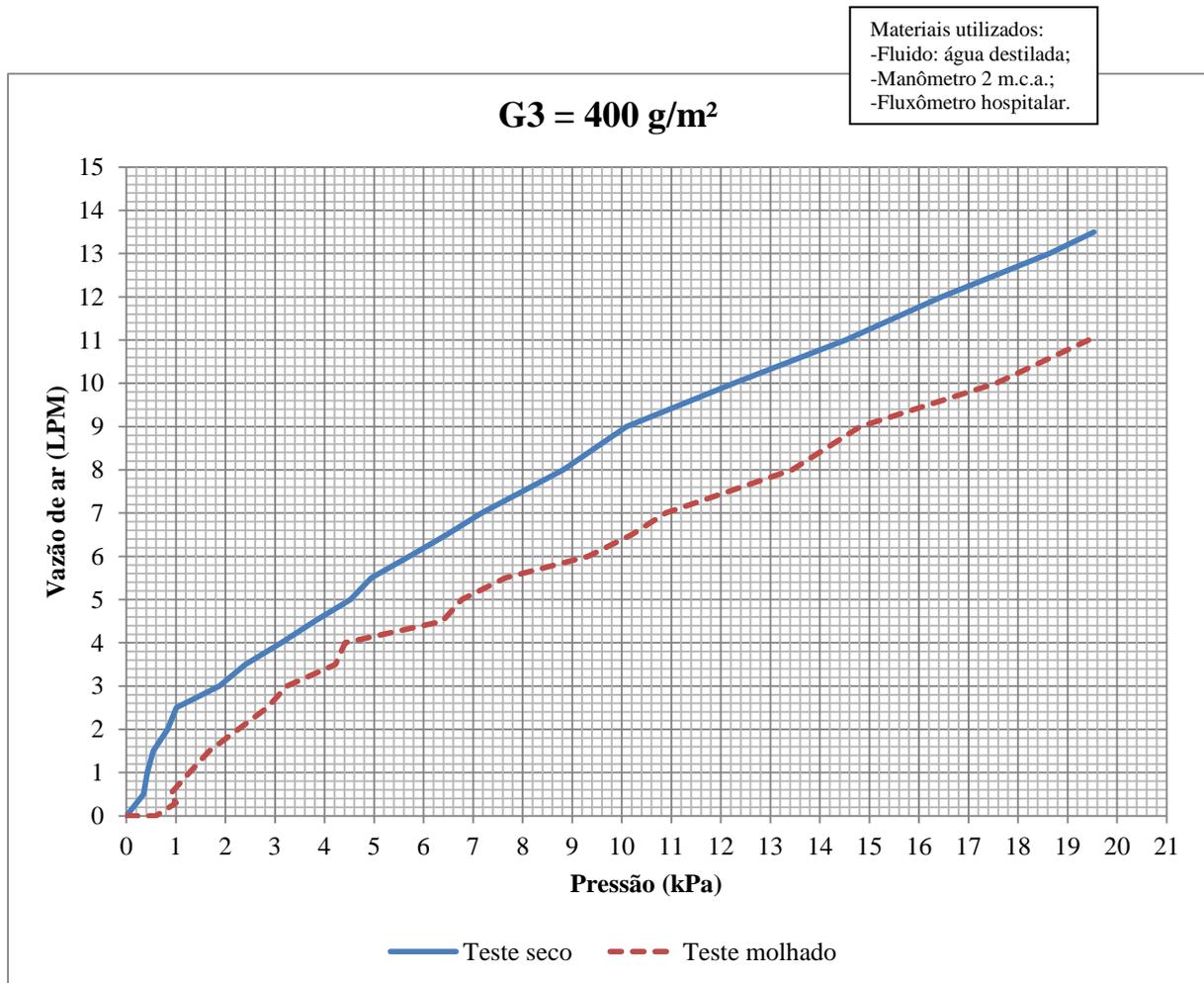


Figura 5.5 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m².

A Figura 5.6 mostra a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de gramatura 400 g/m². Para este material obteve-se um diâmetro equivalente ao ponto de bolha $O_{98} = 0,29$ mm, próximo aos valores anteriores.

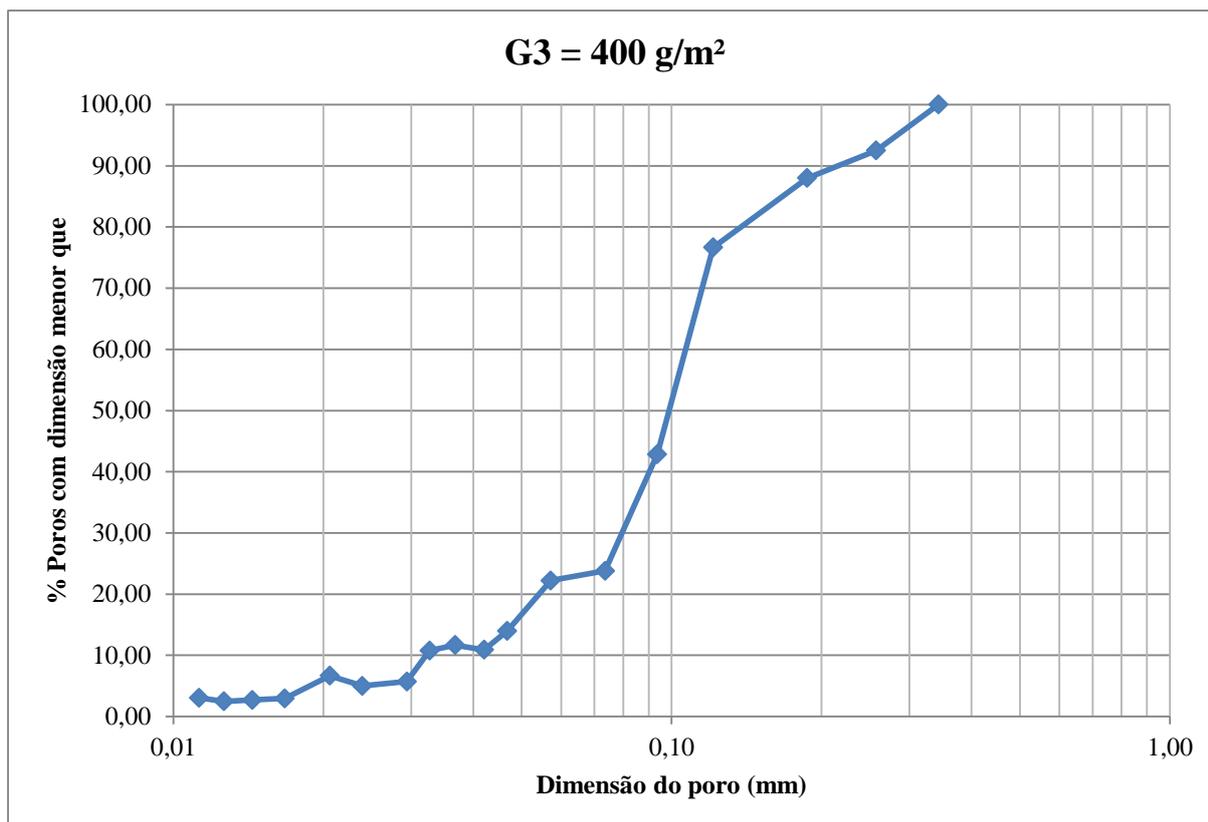


Figura 5.6 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m².

A Tabela 5.1 traz um comparativo entre os diversos valores de referência de frequência de poros previstos na norma ASTM D-6767. Estes valores foram obtidos a partir das curvas de distribuição de poros de cada material ensaiado no equipamento com o novo manômetro, montado na Universidade de Brasília, utilizando água como fluido de saturação.

Tabela 5.1 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.

Amostra	Unidade	O ₉₈	O ₉₅	O ₉₀	O ₈₅	O ₆₀	O ₃₀	O ₁₅	O ₁₀
200 g/m ²	mm	0,33	0,26	0,24	0,21	0,11	0,09	0,05	0,01
300 g/m ²	mm	0,31	0,30	0,22	0,17	0,11	0,08	0,05	0,02
400 g/m ²	mm	0,29	0,27	0,21	0,16	0,11	0,08	0,04	0,02

5.2 ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO O FLUKE 922 SENDO ÁGUA O FLUIDO DE SATURAÇÃO

Para realização desta etapa, houve dois aprimoramentos no equipamento em relação aos ensaios do subitem anterior. O primeiro aprimoramento foi a instalação do Fluke 922 que

permitiu uma acurácia 50 vezes maior na medição de fluxo de ar, se comparado com o antigo fluxômetro hospitalar. O segundo aprimoramento foi a variação na pressão aplicada, pois notou-se na Figura 5.6 – do subitem anterior – que a maioria das pressões eram altas e, por isso, associadas aos poros de menor abertura de filtração (0,01 a 0,1 mm), quando era realmente necessário aplicar pressões menores e com maior acurácia para se avaliar com maior acurácia os poros de maior abertura (0,1 a 0,4 mm).

Após a instalação do Fluke 922, notou-se a necessidade de execução de um ensaio branco para calibração do experimento. Para isso, utilizou-se a peneira #200 como amostra para execução desta etapa. A Figura 5.7 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com a peneira #200, com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime saturado, tendo como fluido de saturação a água. O novo manômetro com 2 m.c.a., com medição equivalente a aproximadamente 19 kPa também já estava instalado.

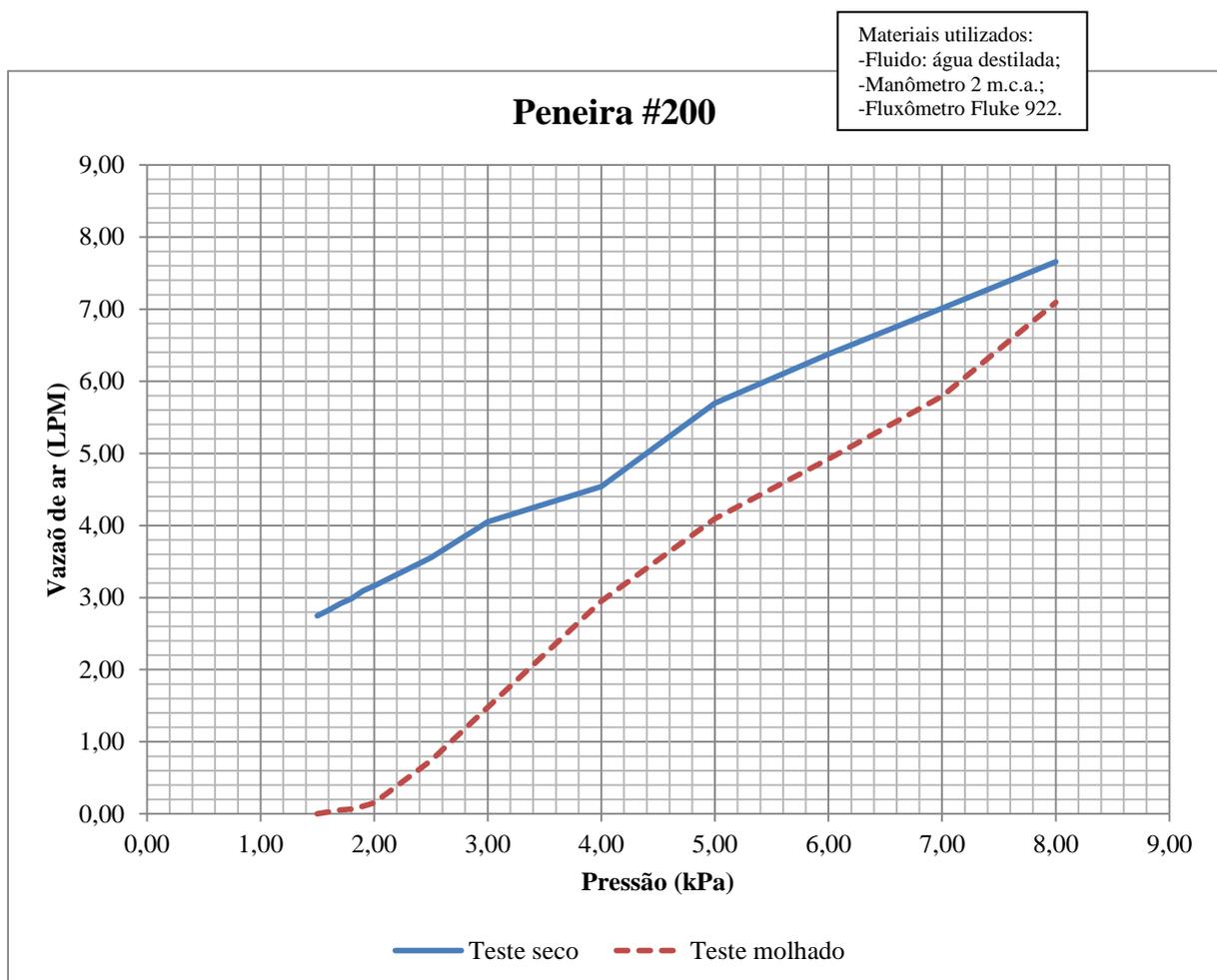


Figura 5.7 Vazão de ar versus pressão – Peneira #200.

A Figura 5.8 apresenta a curva de distribuição de poros para a peneira #200 considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado, pode-se considerar $O_{98} = 0,12 \text{ mm}$ para a peneira, que na realidade possui $O_{98} = 0,08 \text{ mm}$ e $O_{95} = 0,075 \text{ mm}$. Este ensaio foi fundamental para notar que havia uma real necessidade de calibrar o ensaio em busca de resultados mais próximos da realidade. Mais adiante pôde-se verificar que isto foi logrado com a variação do fluido de saturação.

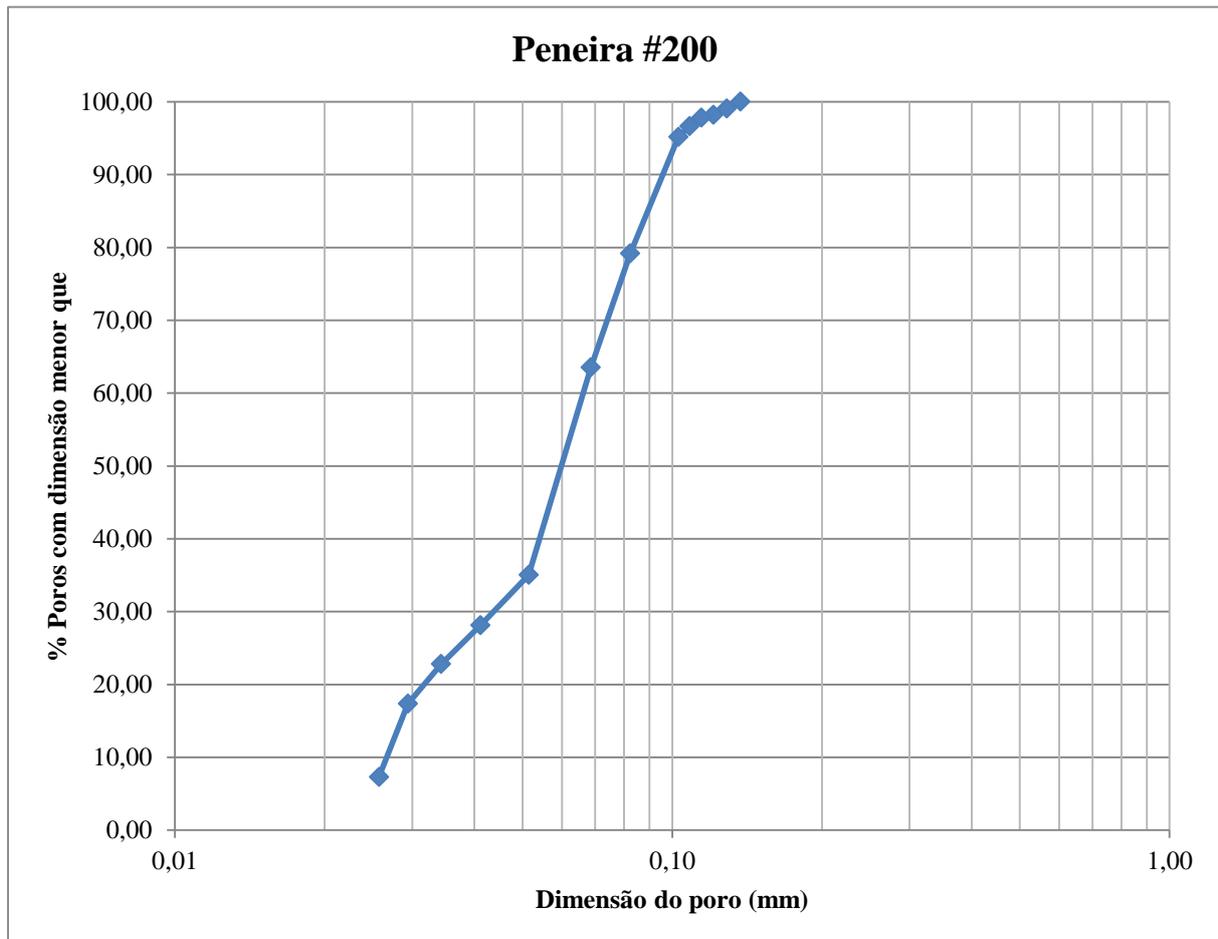


Figura 5.8 Curva de distribuição das aberturas da peneira #200.

A Figura 5.9 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil de gramatura 200 g/m^2 , com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime saturado, tendo como fluido de saturação a água. Nesse caso, não foi possível verificar em qual a pressão ocorre a drenagem do geotêxtil, pois atentou-se para as pressões mais baixas em função da necessidade de mensuração dos poros de maior abertura de filtração (0,1 a 0,4 mm) com maior acurácia.

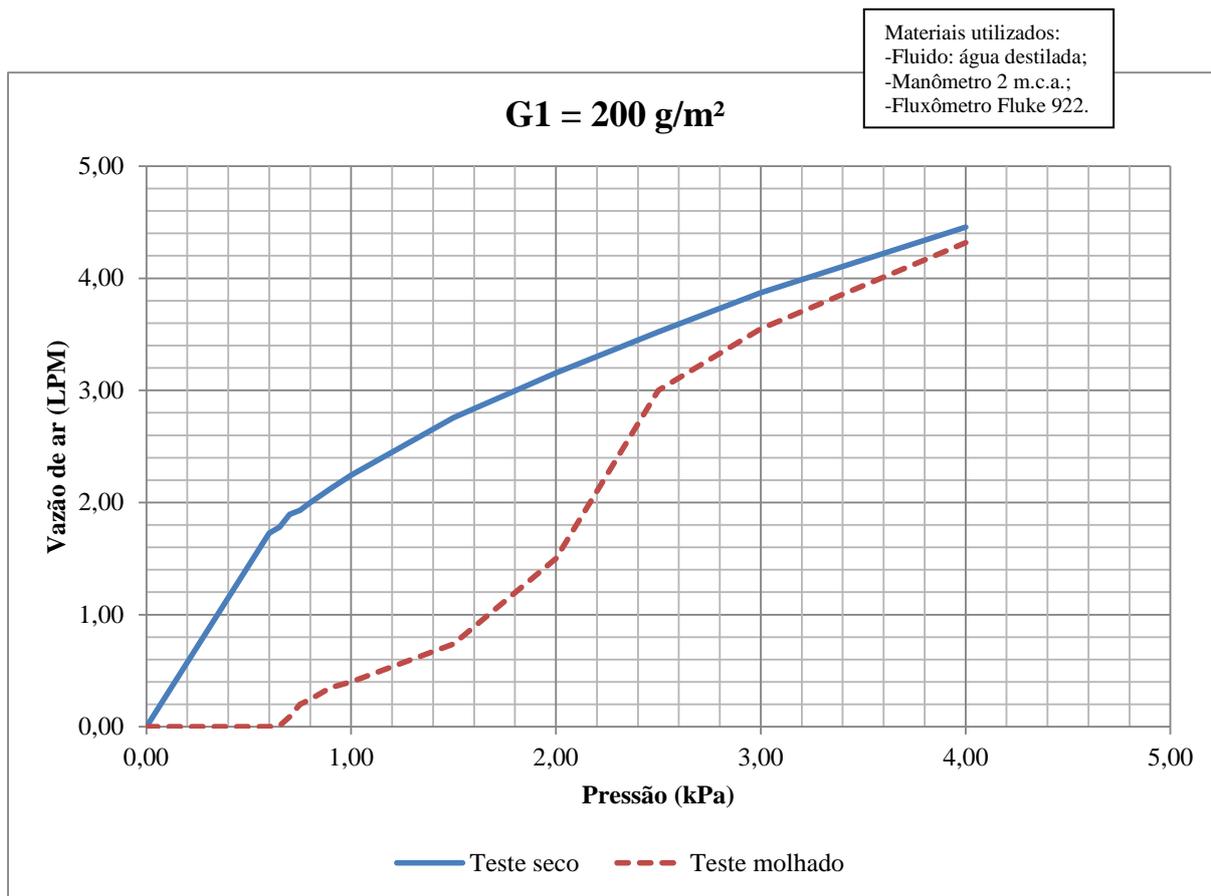


Figura 5.9 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m².

A Figura 5.10 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de gramatura 200 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado pode-se considerar $O_{98} = 0,31 \text{ mm}$ para este geotêxtil.

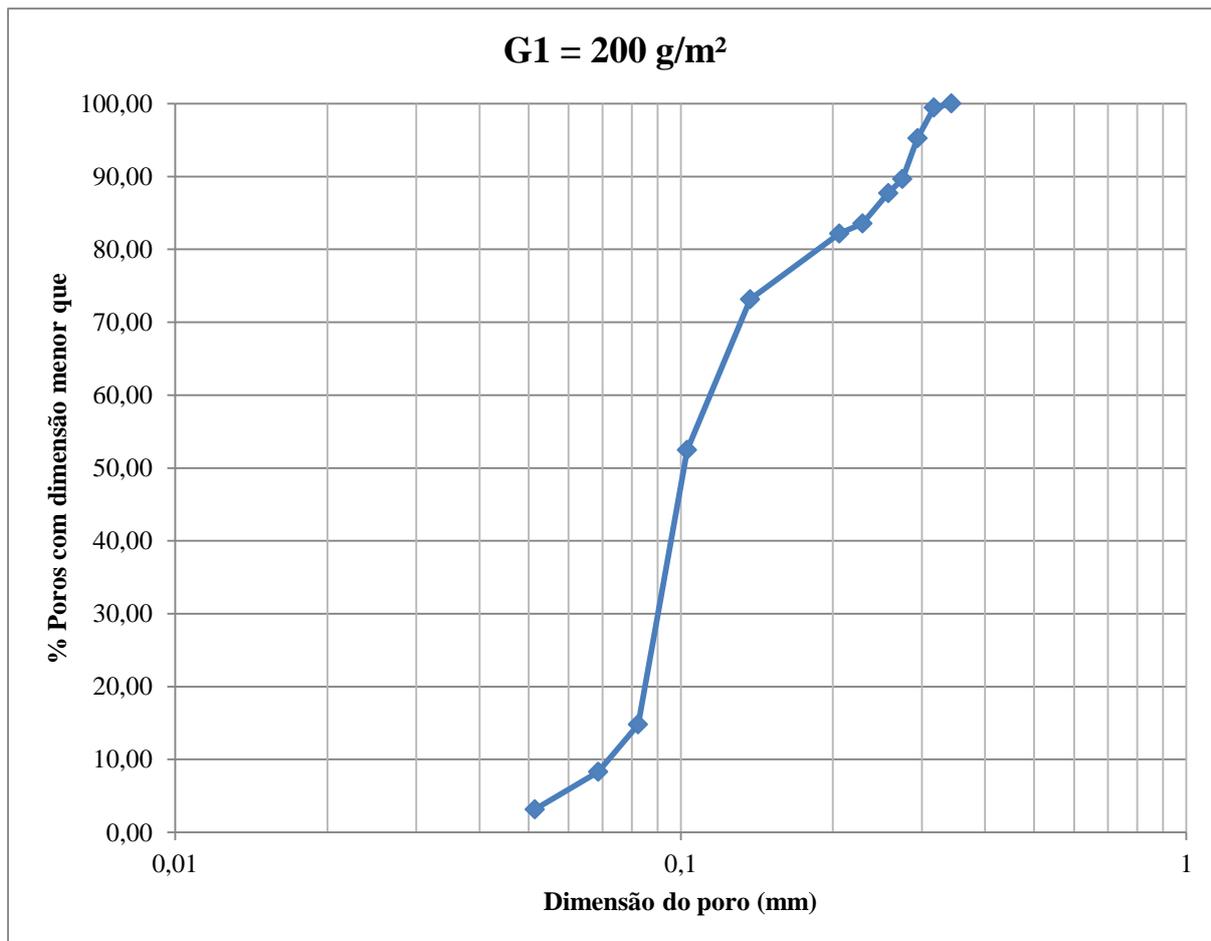


Figura 5.10 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m².

O resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de gramatura 300 g/m², tendo como fluido de saturação a água, é mostrado na Figura 5.11. A Figura 5.12 apresenta a curva de distribuição de poros obtida pelo ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com 300 g/m². O diâmetro equivalente de poro para o ponto de bolha nesta amostra foi $O_{98} = 0,29 \text{ mm}$ próximo do obtido pelo geotêxtil de 200 g/m².

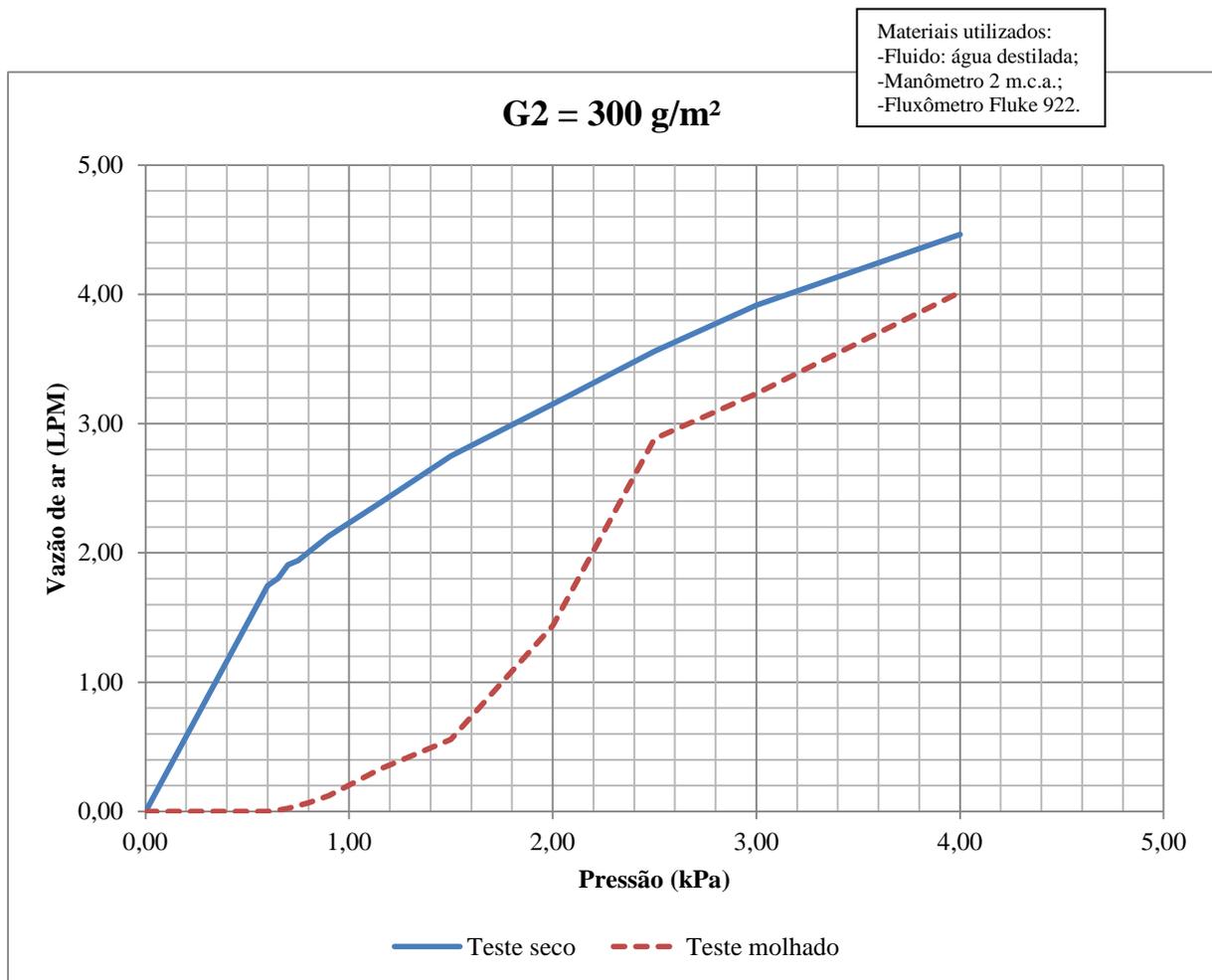


Figura 5.11 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m².

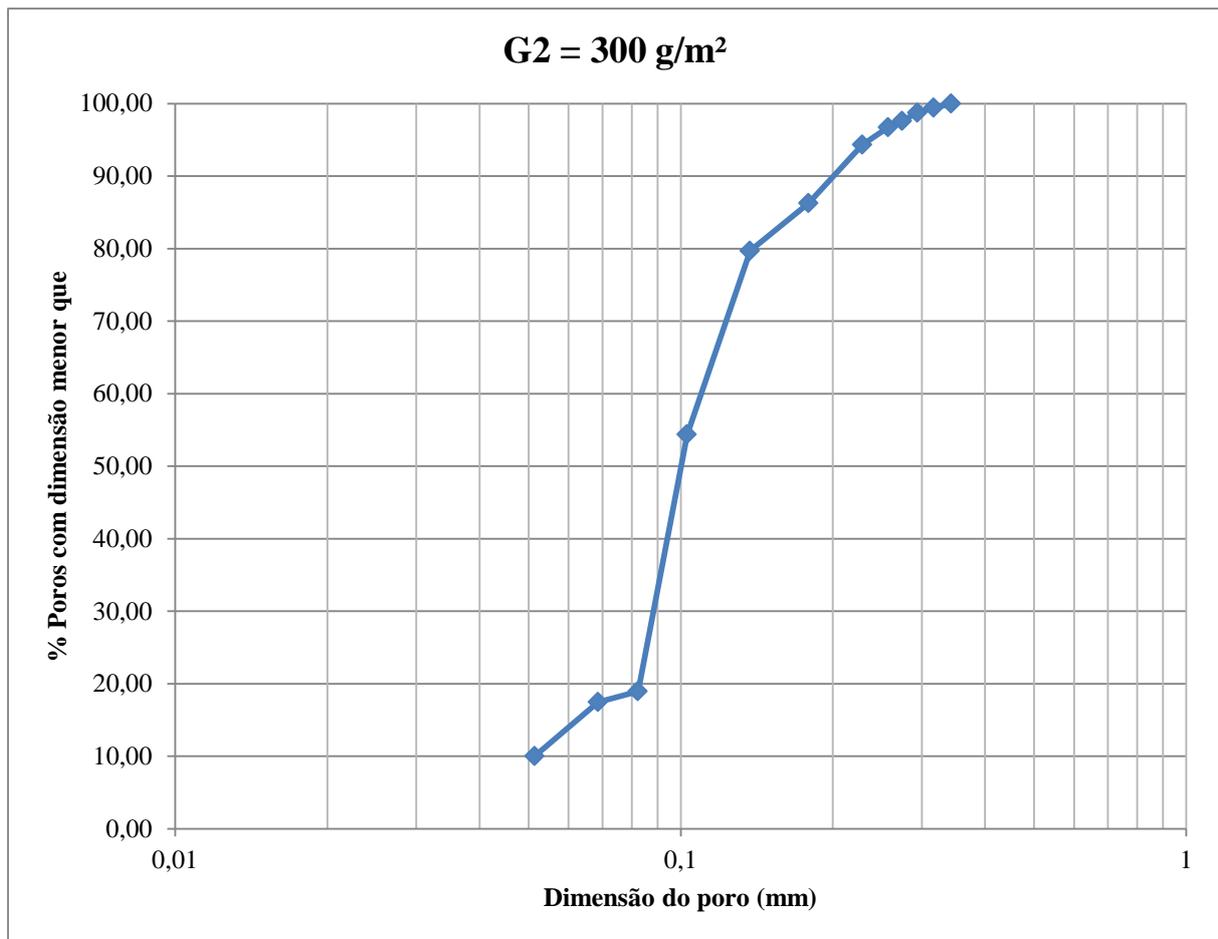


Figura 5.12 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m².

Na Figura 5.13 são apresentados os dados do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com gramatura igual a 400 g/m², tendo como fluido de saturação a água. A Figura 5.14 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de gramatura 400 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado pode-se considerar $O_{98} = 0,27 \text{ mm}$ para este geotêxtil.

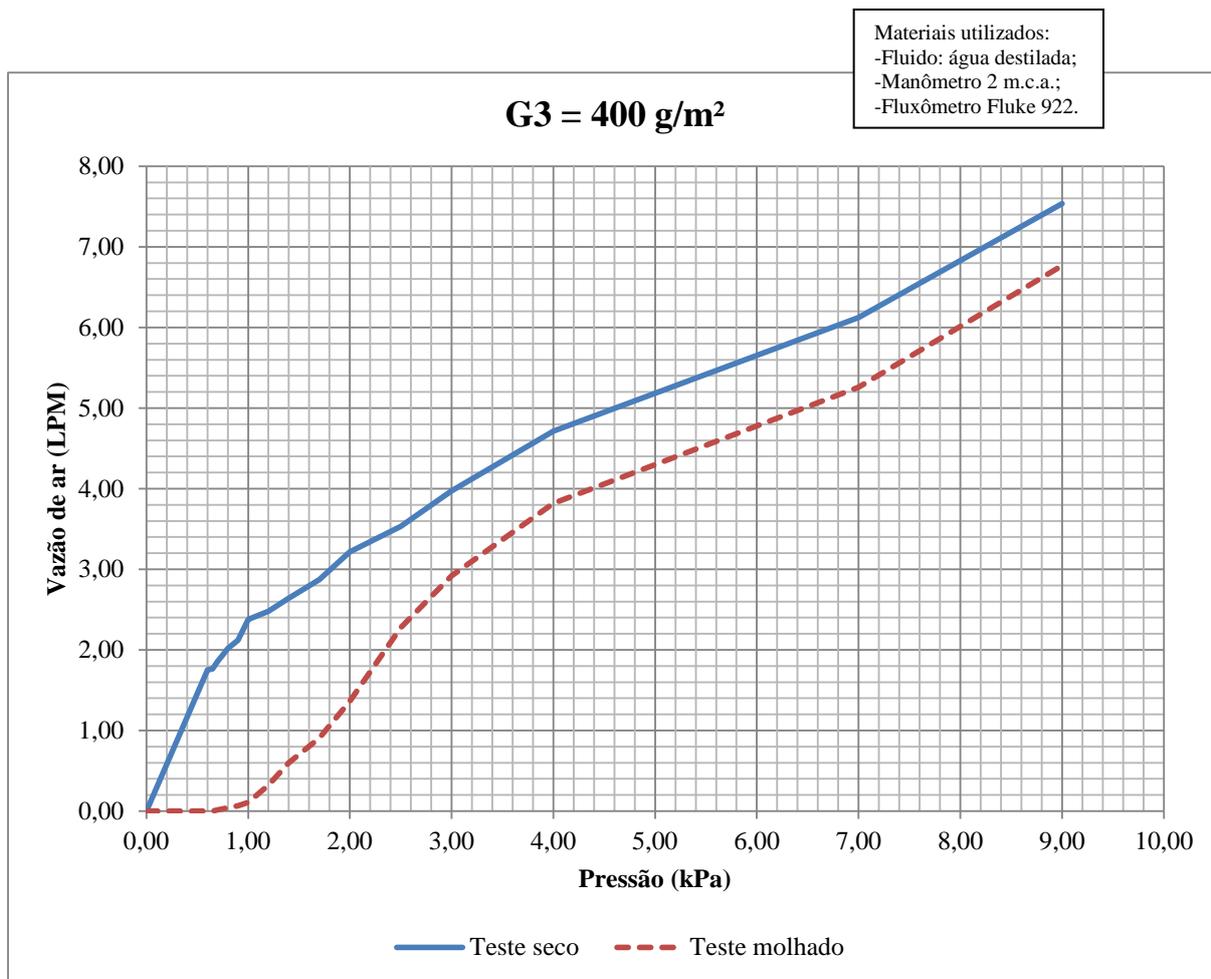


Figura 5.13 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m².

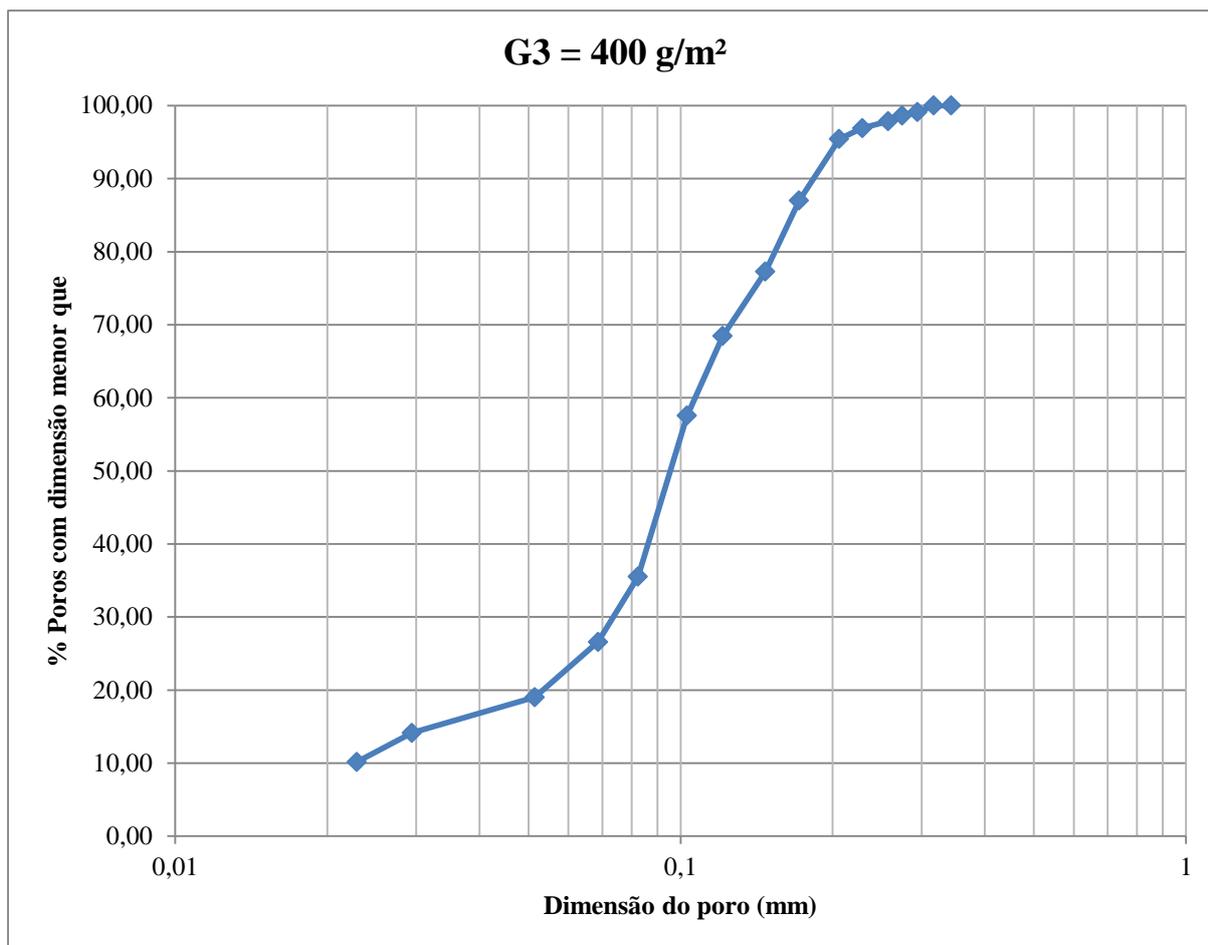


Figura 5.14 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m².

A Tabela 5.2 traz um comparativo entre os diversos valores de referência de frequência de poros previstos na norma ASTM D-6767, obtidos a partir das curvas de distribuição de poros de cada material ensaiado no equipamento com o novo manômetro e o medidor Fluke 922, utilizando-se água como fluido de saturação.

Tabela 5.2 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.

Amostra	Unidade	O ₉₈	O ₉₅	O ₉₀	O ₈₅	O ₆₀	O ₃₀	O ₁₅	O ₁₀
200 g/m ²	mm	0,31	0,29	0,27	0,24	0,13	0,09	0,08	0,07
300 g/m ²	mm	0,29	0,25	0,20	0,18	0,12	0,09	0,06	0,05
400 g/m ²	mm	0,27	0,21	0,18	0,16	0,11	0,07	0,03	0,02

5.3 ENSAIOS DE BUBBLE POINT UTILIZANDO O FLUKE 922 COM ETANOL COMO FLUIDO DE SATURAÇÃO

Dependendo do fluido de saturação há uma variação na tensão superficial entre o fluido e os filamentos de geotêxtil (Tabela 2.4). Fluidos mais viscosos podem deslocar os filamentos do geotêxteis, resultando em aberturas de filtração maiores. Na intenção de se diminuir a tensão superficial e tentar aumentar a acurácia de mensuração da abertura de filtração, foi feita a mudança do fluido de saturação da água (72 dynes/cm a 25°C) para o etanol (30 dynes/cm a 25°C). Para esclarecer, é importante afirmar que a configuração geral do equipamento continuou a mesma em relação ao subitem passado. Com isso, foi possível obter resultados promissores como comentado adiante.

Após a utilização de etanol, notou-se novamente a necessidade de execução de um ensaio para calibração do experimento. Por isso, utilizou-se novamente a malha da peneira #200 como espécime. A Figura 5.15 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com a peneira #200, com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime saturado, tendo como fluido de saturação o etanol.

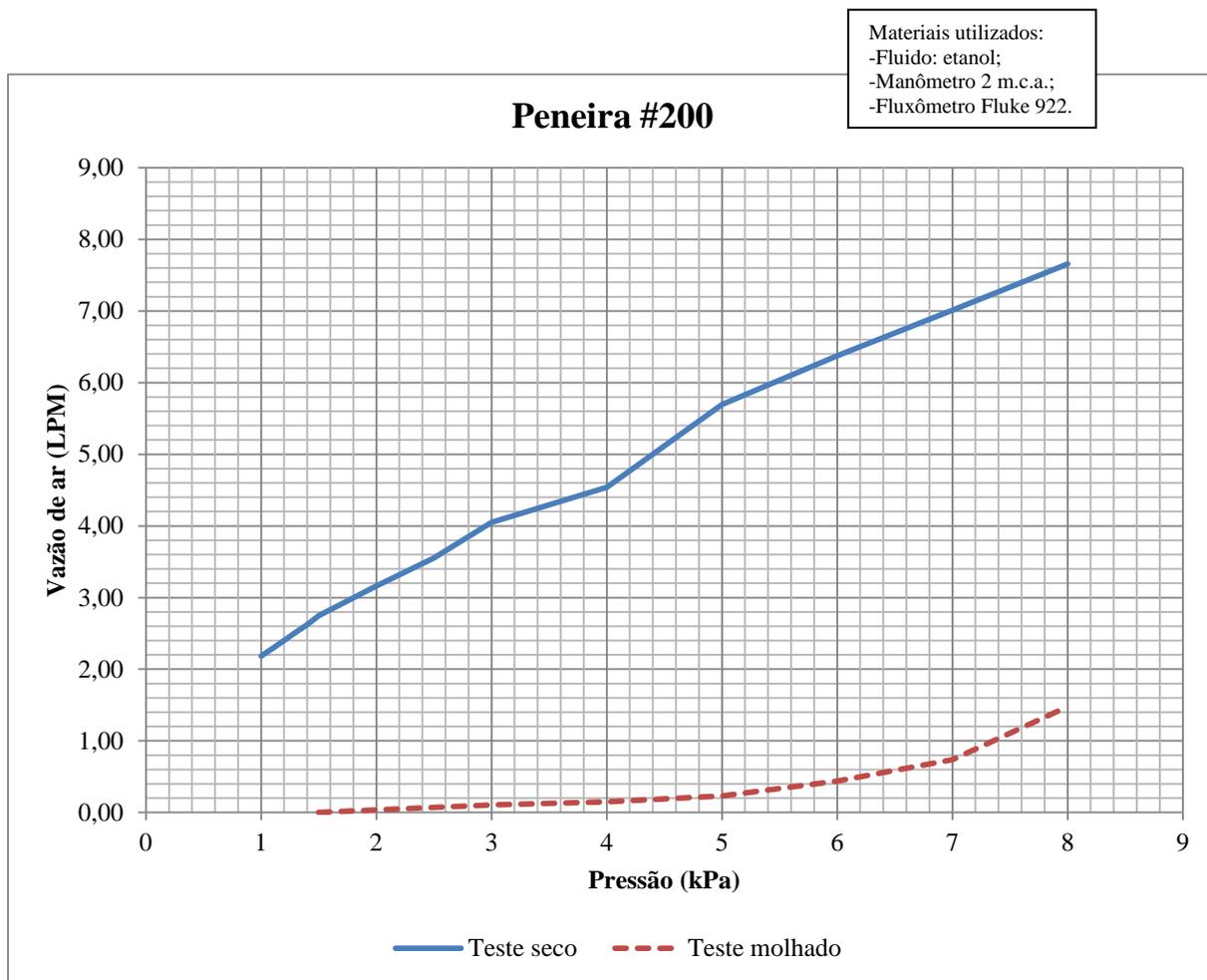


Figura 5.15 Vazão de ar versus pressão – Peneira #200.

A Figura 5.16 apresenta a curva de distribuição de poros para a peneira #200 considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado, pode-se considerar $O_{98} = 0,08 \text{ mm}$ para a peneira, que de acordo com o fabricante possui $O_{98} = 0,08 \text{ mm}$ e $O_{95} = 0,075 \text{ mm}$. Este ensaio foi fundamental para se constatar a melhoria na acurácia dos resultados obtidos.

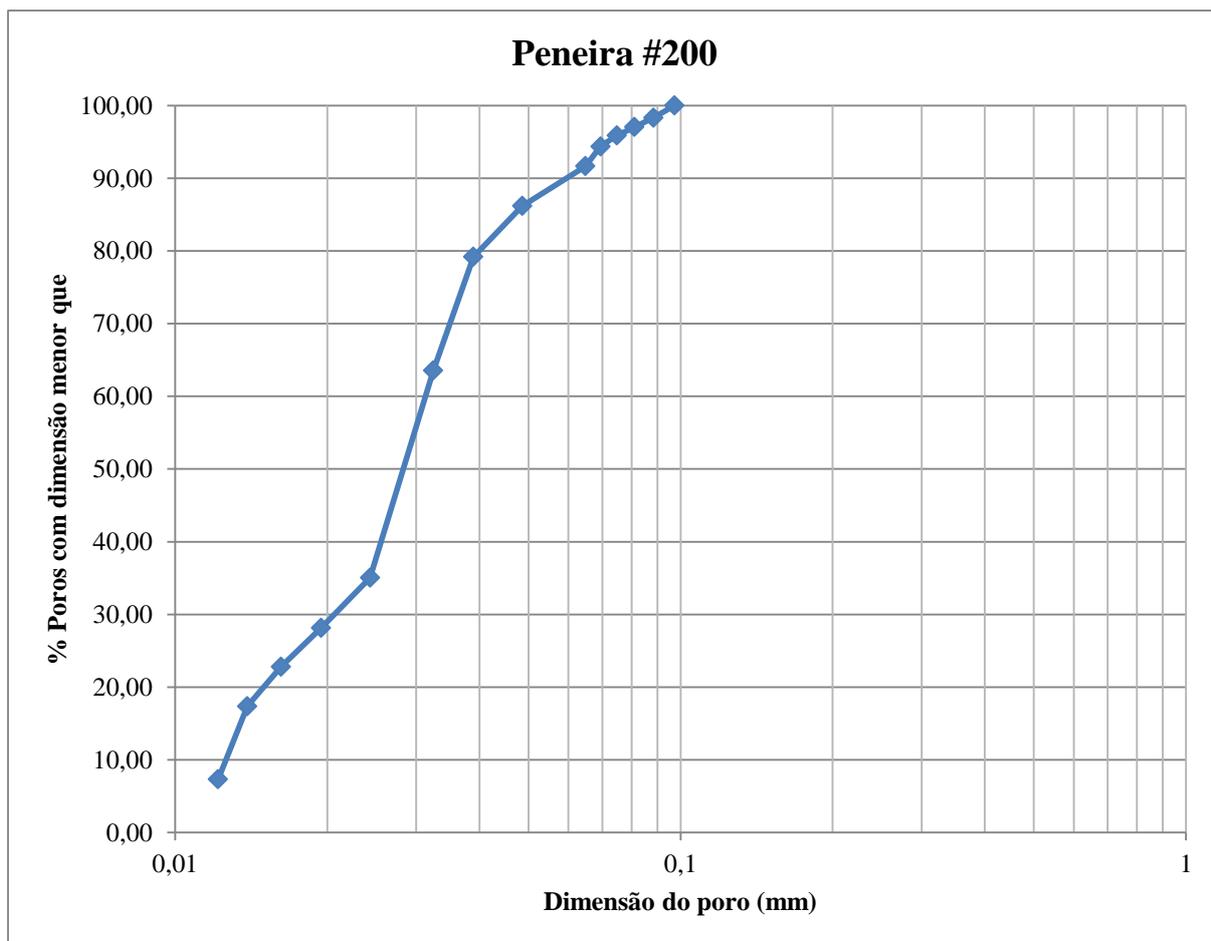


Figura 5.16 Curva de distribuição das aberturas da peneira #200.

A Figura 5.17 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil de gramatura 200 g/m², com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime saturado, tendo como fluido de saturação o etanol. Nesse caso, não foi possível verificar qual a pressão ocorre a drenagem do geotêxtil, pois atentou-se para as pressões mais baixas em função da necessidade de mensuração dos poros de maior abertura de filtração (0,1 a 0,4 mm) com maior acurácia.

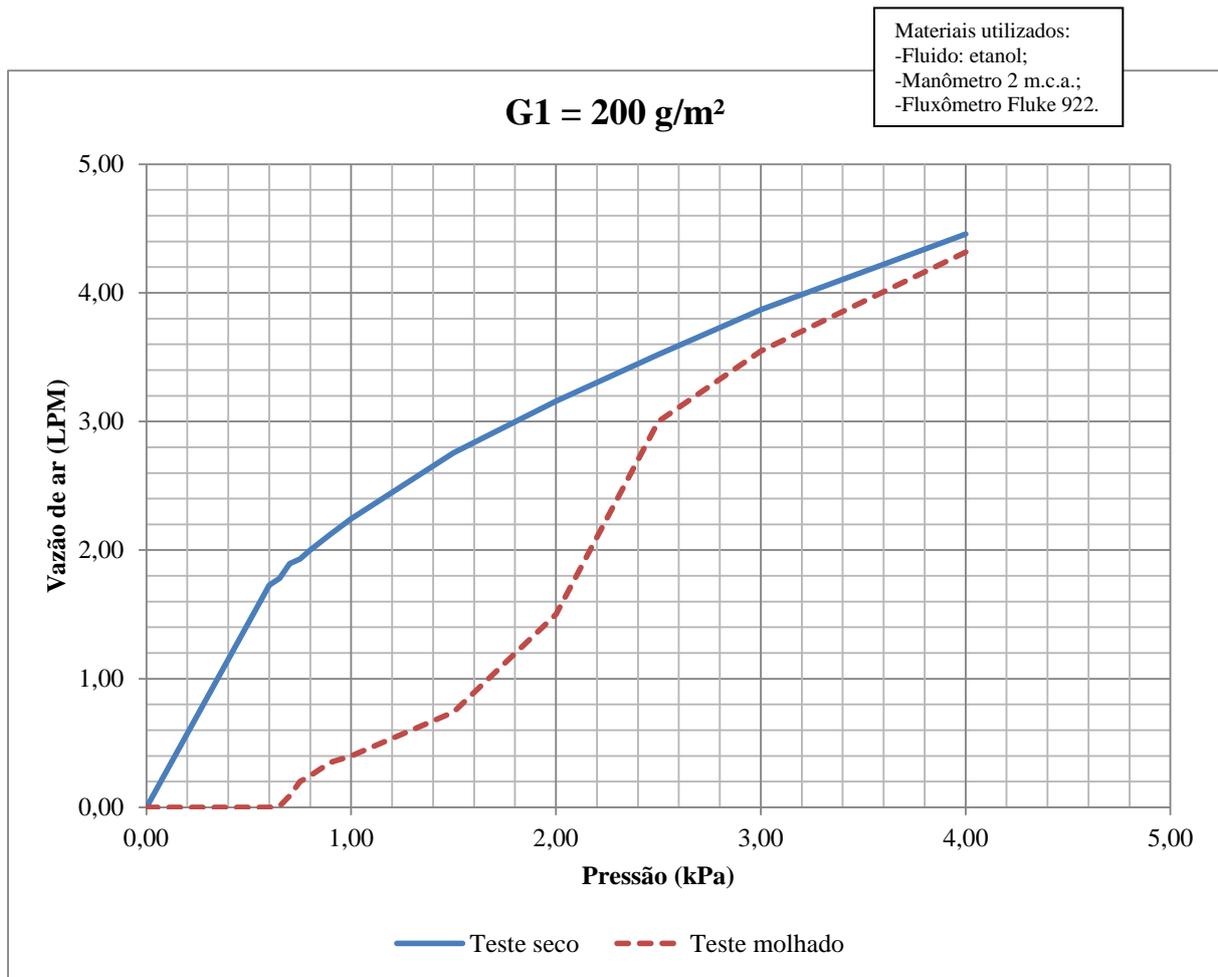


Figura 5.17 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m².

A Figura 5.18 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de gramatura 200 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado, pode-se considerar $O_{98} = 0,15$ mm para este geotêxtil.

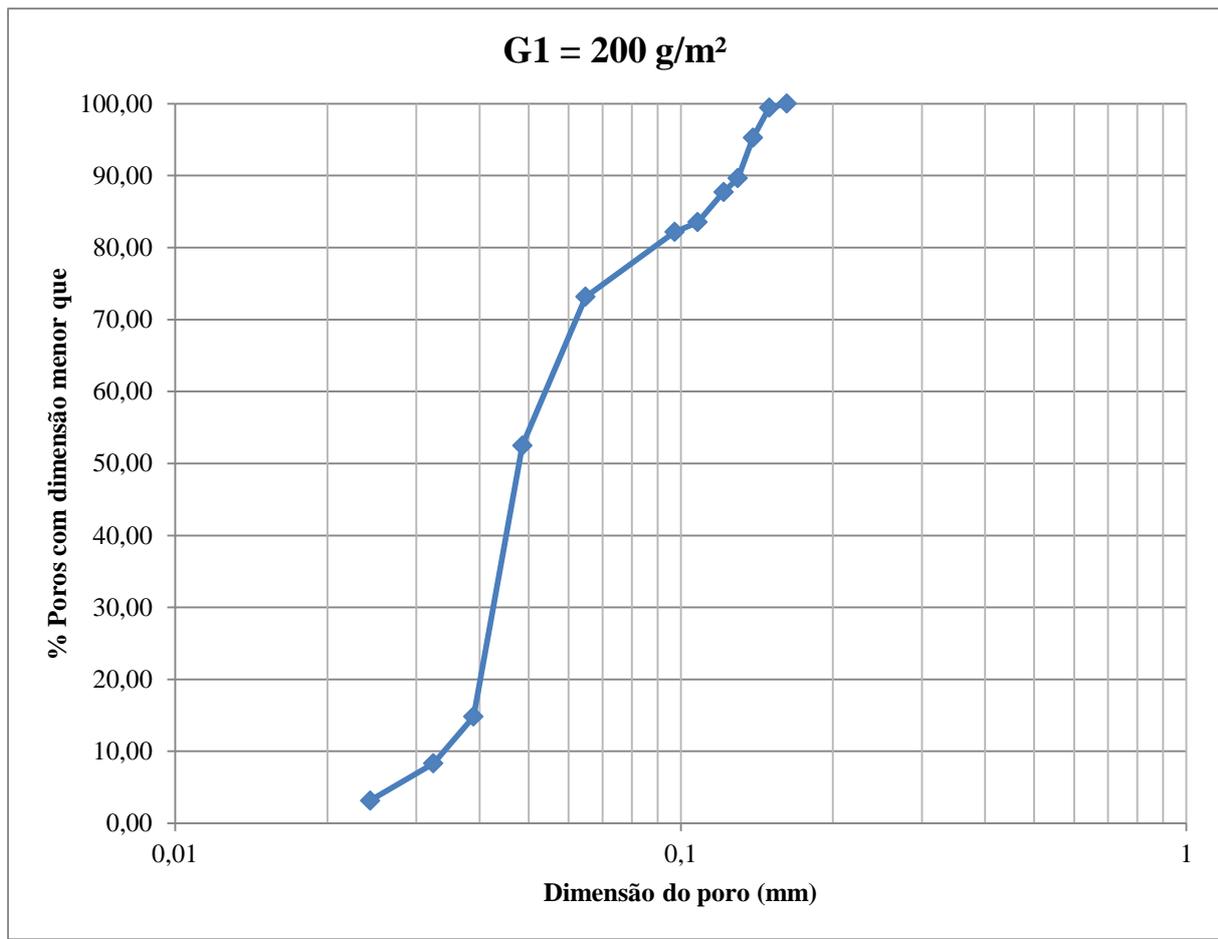


Figura 5.18 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m².

O resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de gramatura 300 g/m², tendo como fluido de saturação o etanol, é mostrado na Figura 5.19. A Figura 5.20 apresenta a curva de distribuição de poros obtida pelo ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com 300 g/m². O diâmetro equivalente de poro para o ponto de bolha nesta amostra foi $O_{98} = 0,14$ mm próximo do obtido pelo geotêxtil de gramatura 200 g/m².

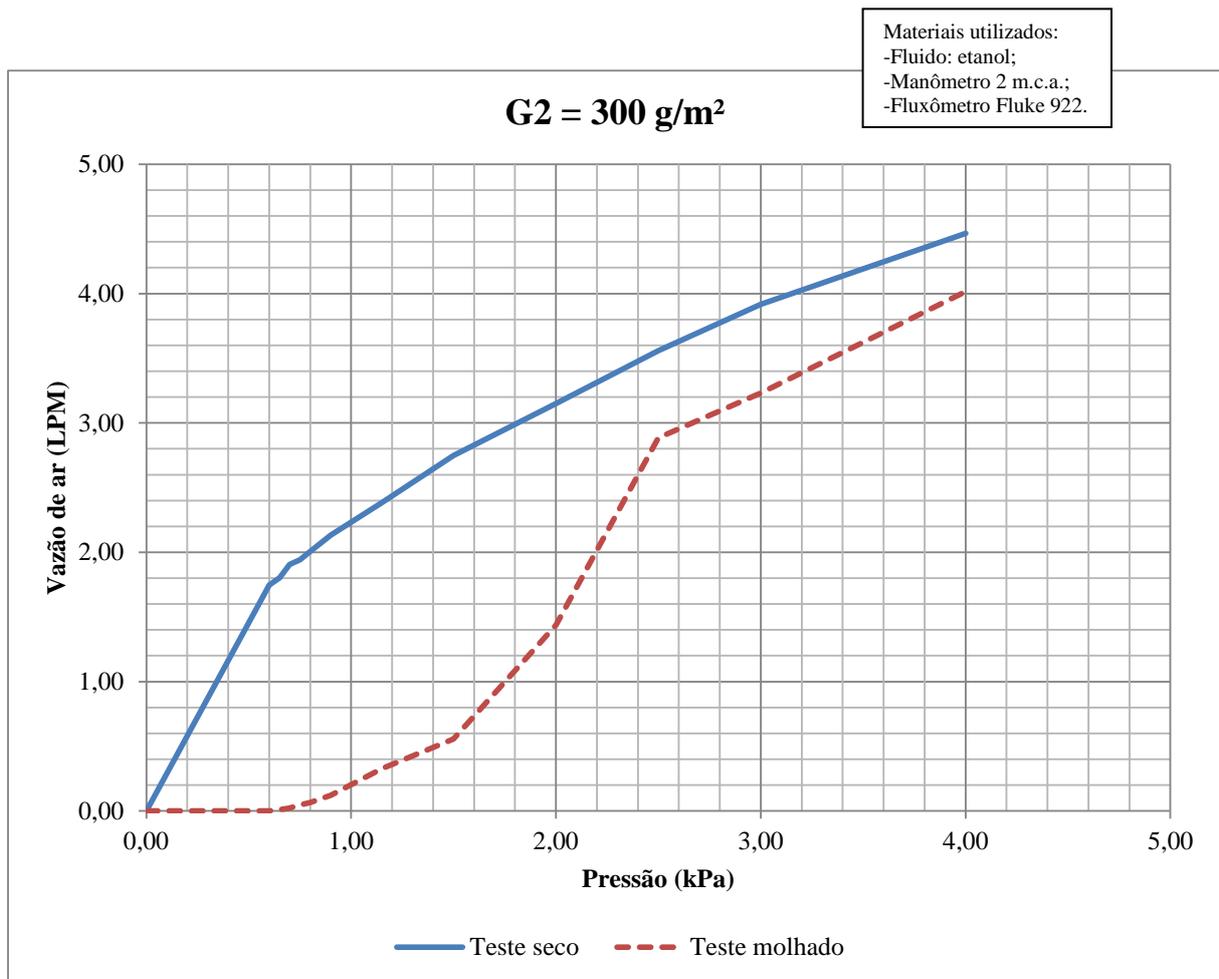


Figura 5.19 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m².

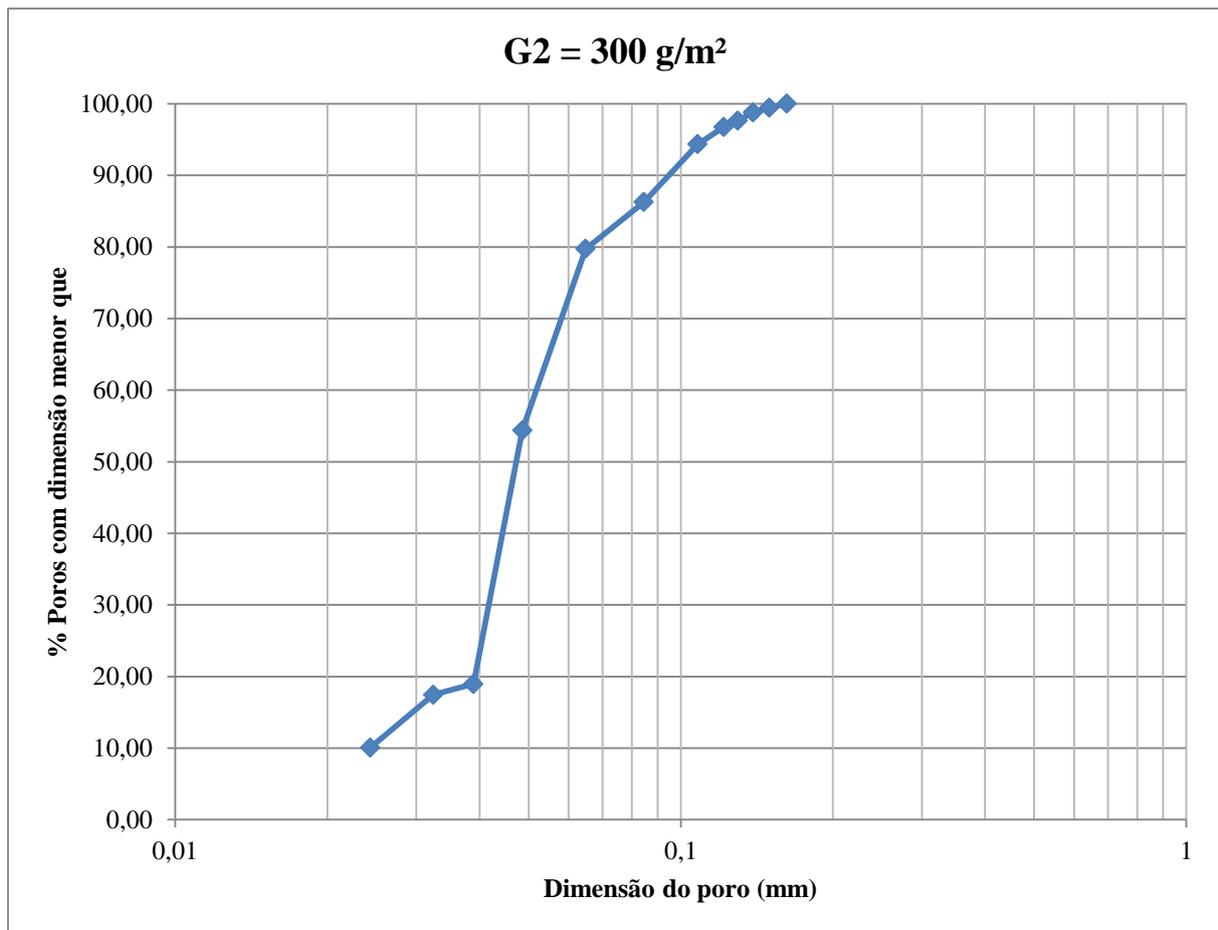


Figura 5.20 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m².

Na Figura 5.21, é apresentado o resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com gramatura igual a 400 g/m². A Figura 5.22 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de 400 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado, pode-se considerar $O_{98} = 0,13 \text{ mm}$ para este geotêxtil.

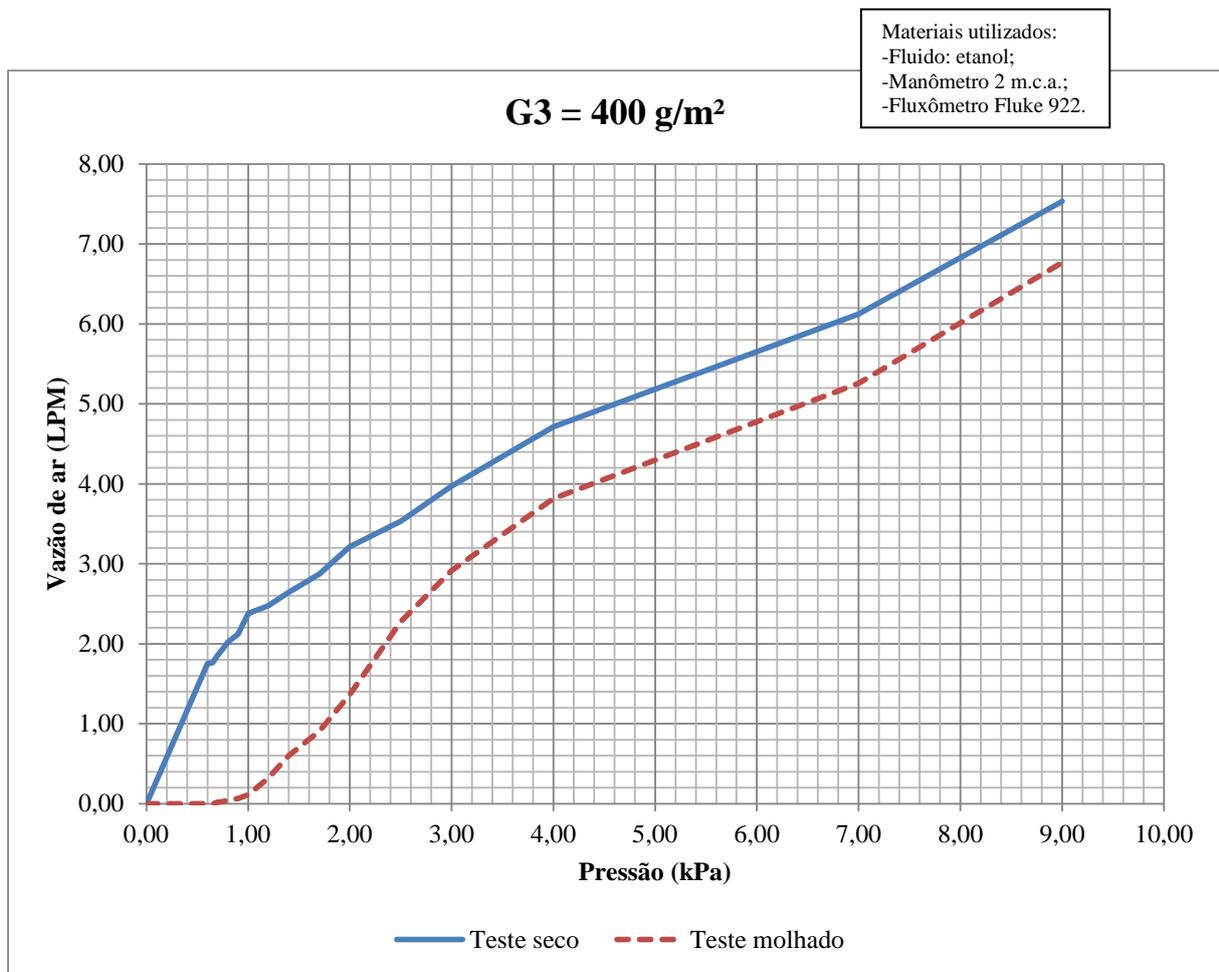


Figura 5.21 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m².

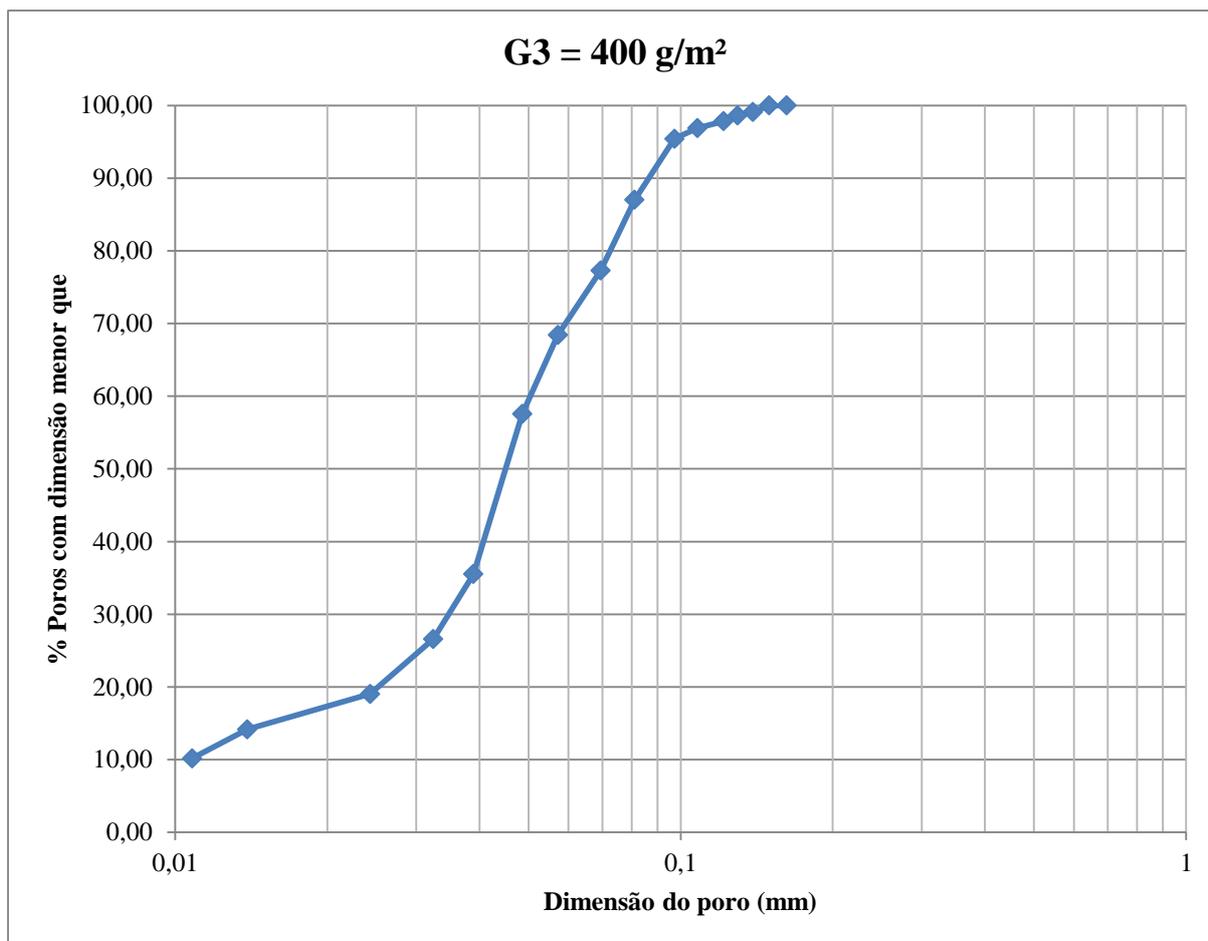


Figura 5.22 Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m².

A Tabela 5.3 apresenta as dimensões de poros a partir dos resultados obtidos no equipamento para Teste do Ponto de Bolha (norma ASTM D-6767) obtidos a partir das curvas de distribuição de poros de cada material ensaiado no equipamento com novo manômetro e Fluke 922, utilizando etanol como fluido de saturação. Pelos resultados apresentados pelo equipamento para o Teste de Ponto de Bolha, pode-se concluir que o equipamento atende ao previsto na norma ASTM D 6767, sendo possível utilizar esta técnica para determinar a distribuição de poros em geotêxteis não tecidos.

Tabela 5.3 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis.

Amostra	Unidade	O ₉₈	O ₉₅	O ₉₀	O ₈₅	O ₆₀	O ₃₀	O ₁₅	O ₁₀
200 g/m ²	mm	0,15	0,14	0,13	0,12	0,05	0,04	0,04	0,03
300 g/m ²	mm	0,14	0,12	0,09	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02
400 g/m ²	mm	0,13	0,10	0,09	0,08	0,05	0,03	0,01	0,01

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ABERTURA DE FILTRAÇÃO – ÁGUA VERSUS ETANOL

Com a relativa variação de abertura de filtração notada nos resultados apresentados, verificou-se a necessidade de comparação entre os valores obtidos durante os experimentos. Sendo assim, a Tabela 5.4 apresenta a comparação da abertura de filtração dos resultados utilizando água como fluido de saturação e sua diminuição quando comparada aos resultados do etanol. Por exemplo, o O_{98} do ensaio de abertura de filtração com etanol foi 51,61% menor do que aquele realizado tendo água como fluido de saturação. Sendo assim, pode-se notar uma relevante variação de resultados e aumento da acurácia dos valores experimentais. A variação mais crítica ocorreu para O_{15} de 300 g/m² onde a abertura de filtração chegou a diminuir 66,67%.

Tabela 5.4 Comparação entre resultados de abertura de filtração – água versus etanol.

Amostra	Unidade	O_{98}	O_{95}	O_{90}	O_{85}	O_{60}	O_{30}	O_{15}	O_{10}
200 g/m ²	mm	-51,61%	-51,72%	-51,85%	-50,00%	-61,54%	-55,56%	-50,00%	-57,14%
300 g/m ²	mm	-51,72%	-52,00%	-55,22%	-55,56%	-58,33%	-55,56%	-66,66%	-60,00%
400 g/m ²	mm	-51,85%	-51,90%	-50,00%	-50,00%	-54,55%	-57,14%	-66,67%	-50,00%

5.5 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE ESPESSURA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL

De acordo com o escopo desse trabalho, foram executados ensaios de aplicação de tensão normal e verificação da espessura normal de acordo com o tipo de geotêxtil. Nesse caso, foram aplicadas tensões de 6, 10, 15, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1500, 2000 kPa. Foram realizados 6 ensaios em espécimes diferentes para cada gramatura.

Observa-se que as Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25 representam os resultados dos referidos ensaios para os geotêxteis não tecidos de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m² respectivamente. Nota-se relativa diminuição da espessura do geotêxtil com o aumento do confinamento através da tensão normal.

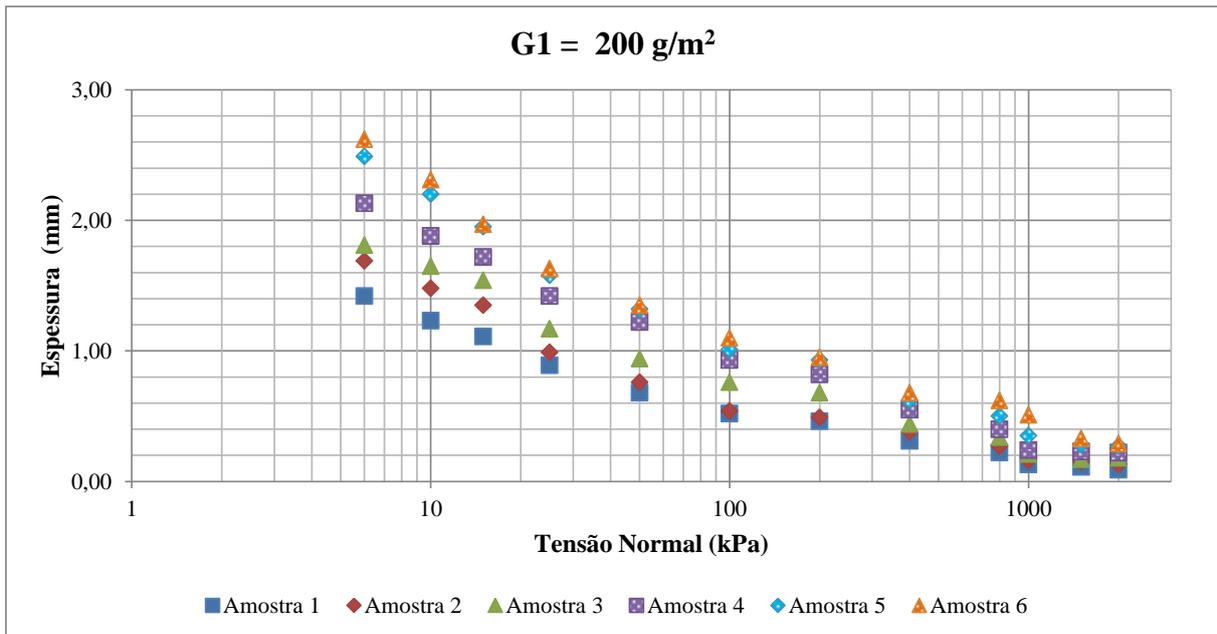


Figura 5.23 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 = 200 g/m².

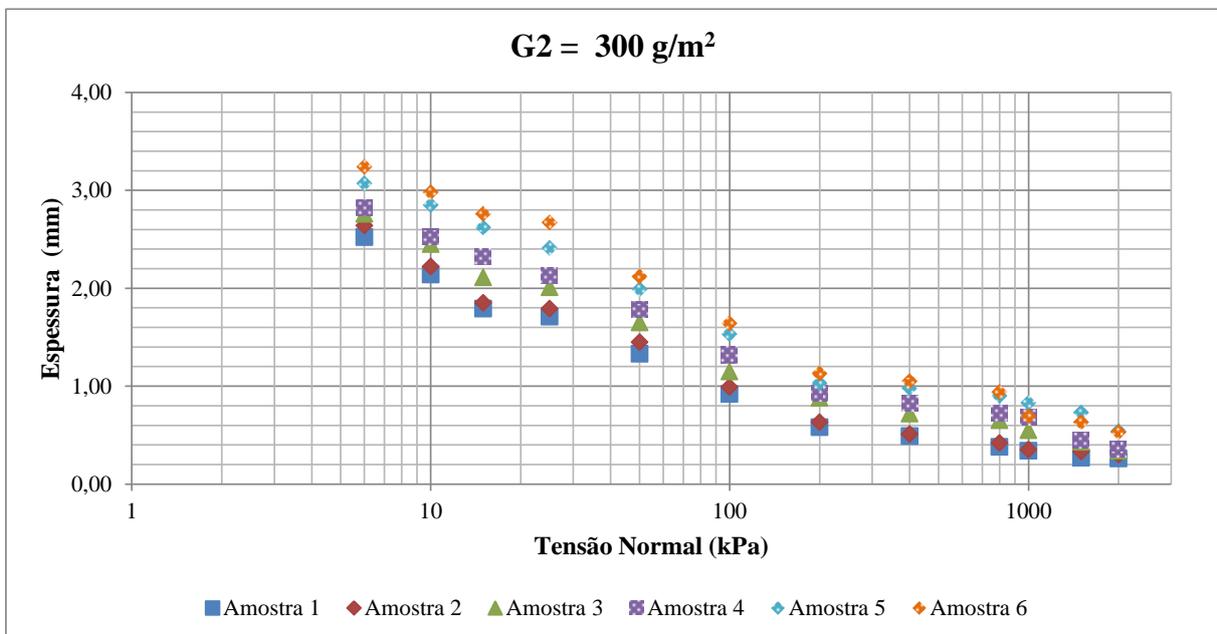


Figura 5.24 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G2 = 300 g/m².

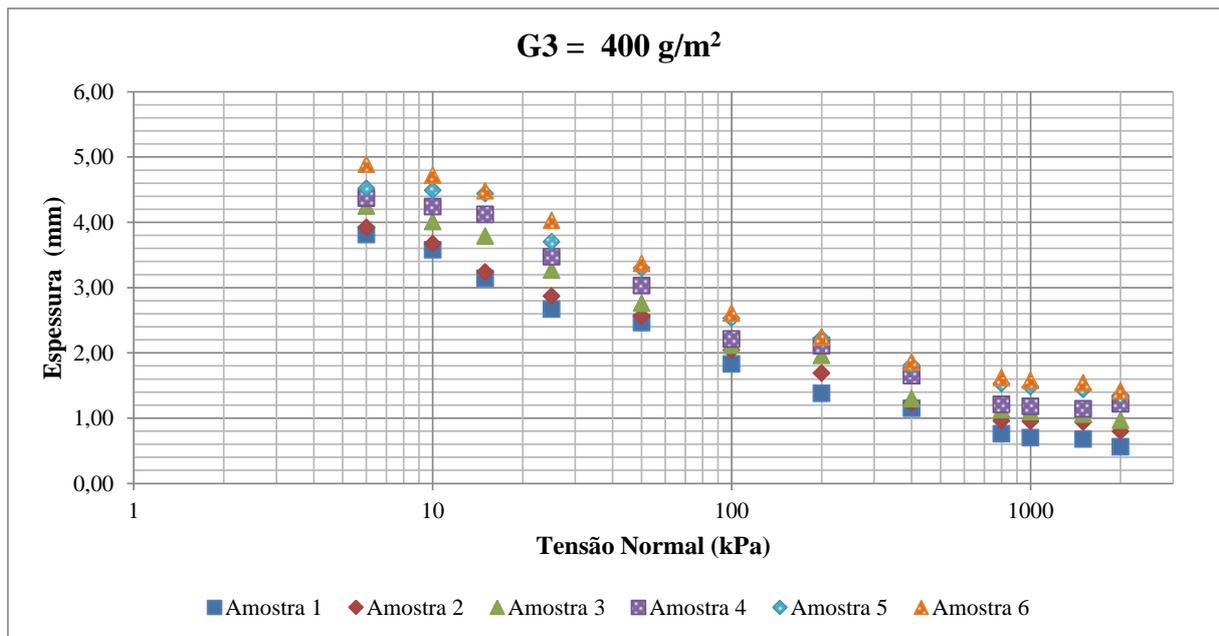


Figura 5.25 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G3 = 400 g/m².

5.6 AVALIAÇÃO DE ESPESSURA MÉDIA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL

Foi obtida a média dos resultados de espessura versus tensão normal para cada gramatura. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.26, nota-se a tendência de diminuição da espessura média com o aumento da tensão normal. As curvas de G1 e G2 são mais próximas enquanto a curva G3 possui uma espessura média maior em relação às demais, isso decorre em função de sua maior quantidade de fibras por metro quadrado.

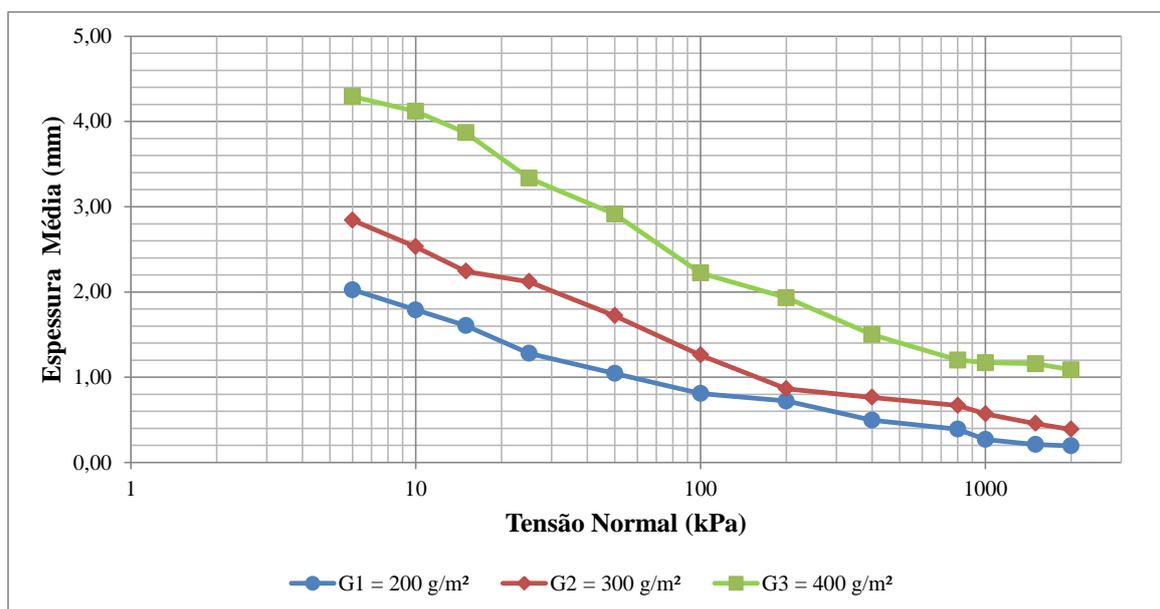


Figura 5.26 Variação da espessura média com a tensão normal para G1 = 200 g/m², G2 = 300 g/m² e G3 = 400 g/m² (escala horizontal logarítmica).

5.7 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO GEOTÊXTIL

Para a avaliação da influência da tensão normal, utilizaram-se espécimes de geotêxtil comprimidas. Como espessura do espécime está associada a uma determinada tensão de confinamento, pôde-se obter variações de aberturas de filtração em geotêxteis confinados. Para diminuir a espessura da amostra, foram utilizadas telas superior e inferior envolvendo o geotêxtil, sendo estas costuradas na amostra. A distância entre a tela superior e inferior representa a espessura (t_{GT}) do espécime, que seria a que ele apresentaria sob determinada tensão normal, que pode ser obtida a partir das relações espessura versus tensão apresentadas anteriormente. O espécime comprimido foi então ensaiado no equipamento de ponto de bolha.

A Figura 5.27 apresenta a variação do fluxo de ar de acordo com cada tensão vertical sobre o geotêxtil G1 sendo necessário 1 teste seco e 5 testes saturados. Dentre os testes saturados com etanol, 1 deles foi executado com a espessura natural do espécime e 4 deles foram executados com espessuras menores, correspondentes às aquelas provocadas por tensões de 10, 100, 400 e 1000 kPa.

Para verificar se a utilização da tela metálica e a costura interferem no resultado de obtenção da abertura de filtração foi realizada a comparação entre os testes seco e saturado dos espécimes ensaiados. A Tabela 5.5 contém resultados que indicam que praticamente não há diferença entre realizar o ensaio com a tela metálica sem a utilização desta.

Tabela 5.5 Verificação da não influência da tela metálica e da costura na obtenção de dados de abertura de filtração.

	G1 - 200 g/m ²	G2 - 300 g/m ²	G3 - 400 g/m ²
	Diâmetro (mm)		
Sem tela metálica	0,147	0,138	0,129
Com tela metálica	0,148	0,137	0,128

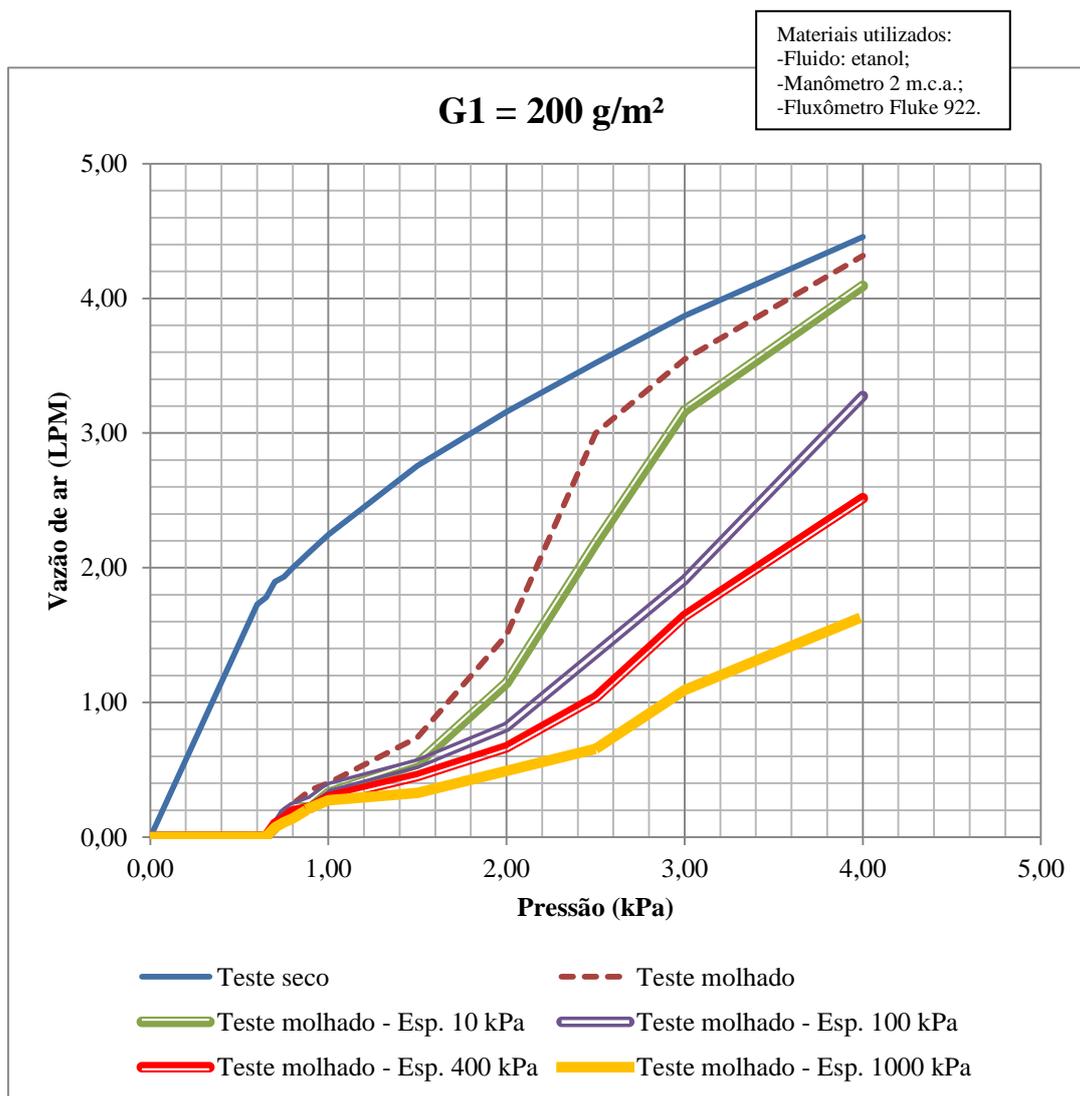


Figura 5.27 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m² confinado.

A Figura 5.28 mostra as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os testes saturados com etanol. A partir dessa figura pode-se inferir que o geotêxtil G1 possui a abertura de filtração O_{98} de 0,148 mm (sem tensão), 0,125 mm (10 kPa), 0,098 mm (100 kPa), 0,087 (400 kPa), 0,073 (1000 kPa). Obteve-se também para esse o geotêxtil valores de O_{95} iguais a 0,139 mm (sem tensão), 0,117 mm (10 kPa), 0,094 mm (100 kPa), 0,083 (400 kPa), 0,069 (1000 kPa).

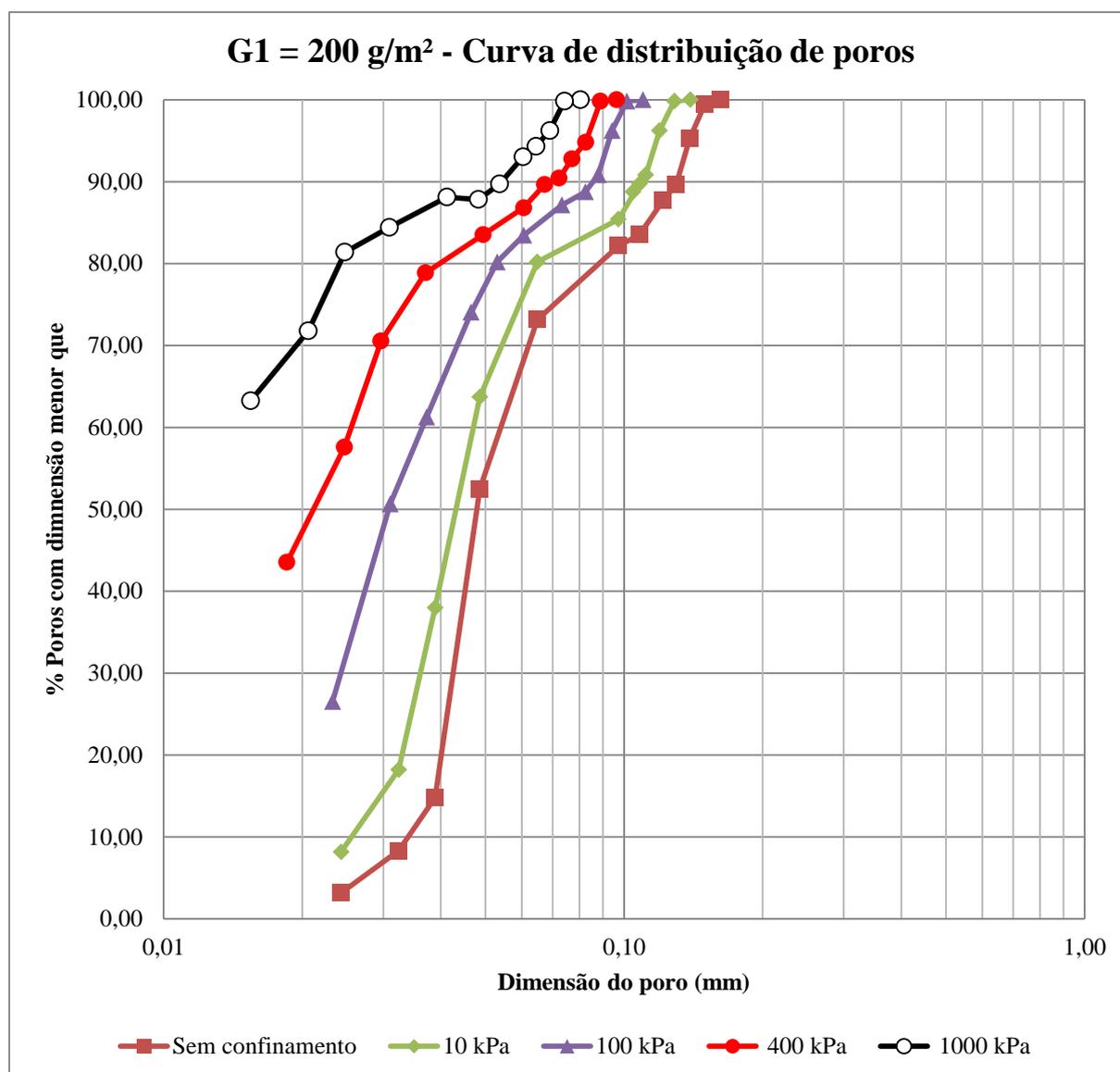


Figura 5.28 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 200 g/m² confinado.

A Figura 5.29 apresenta a variação do fluxo de ar de acordo com cada tensão vertical do geotêxtil G2, também ensaiando-se 1 teste seco e 5 testes saturados com etanol. Dentre os testes saturados, 1 deles foi executado com a espessura natural da amostra e 4 deles foram executados com redução da espessura, simulando as tensões de 10, 100, 400 e 1000 kPa, como no caso dos ensaios com o geotêxtil G1. No intervalo entre 0 e 1 kPa, a distância entre o teste seco e as demais curvas deve-se à barreira capilar imposta pelo fluido de saturação à fibra do geotêxtil, esta barreira é vencida em torno de 0,8 kPa.

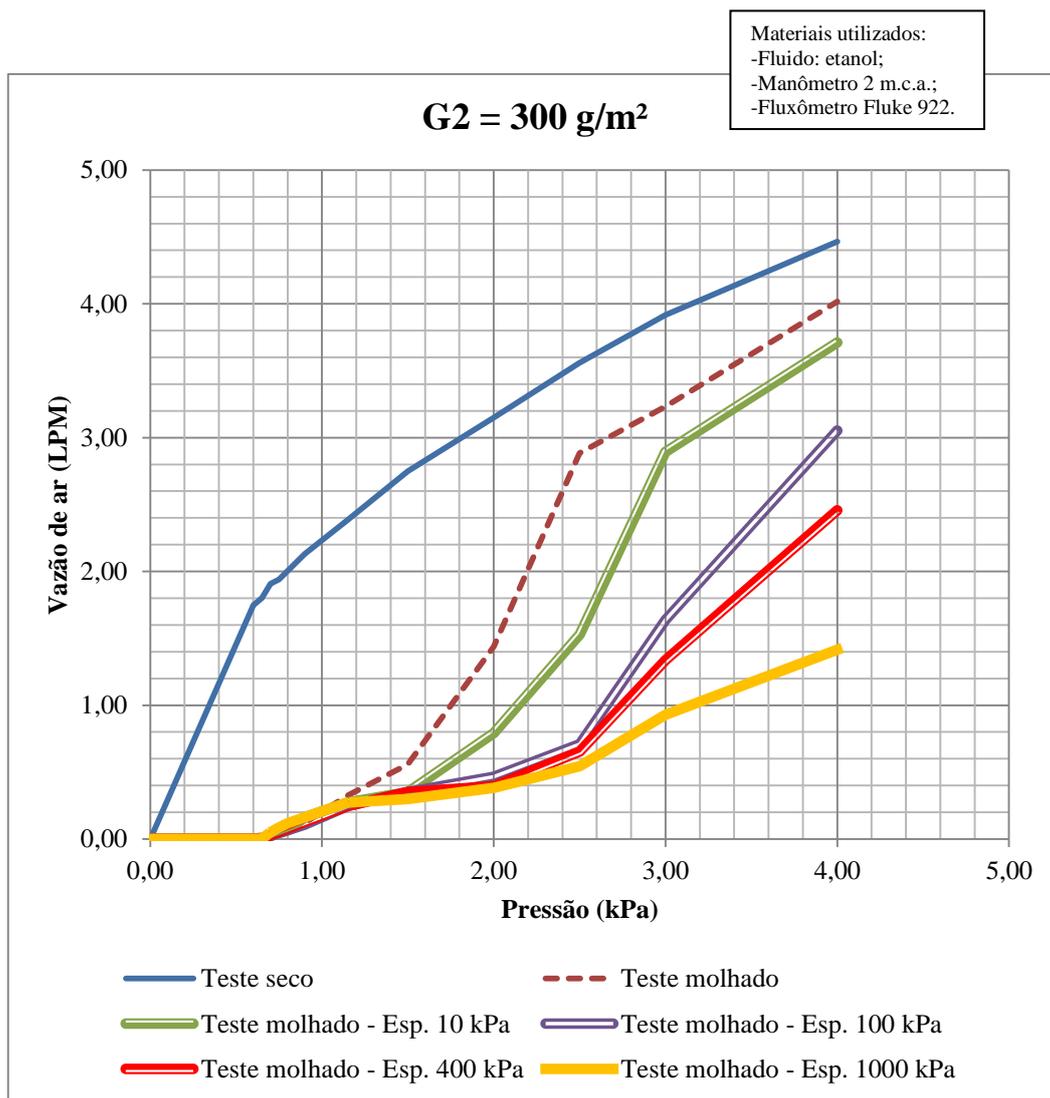


Figura 5.29 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m² simulando variação de tensão normal.

A Figura 5.30 mostra as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os testes saturados com etanol. A partir dessa figura pode-se observar que o geotêxtil G2 possui a abertura de filtração O_{98} de 0,137 mm (sem tensão), 0,107 mm (10 kPa), 0,073 mm (100 kPa), 0,065 (400 kPa), 0,047 (1000 kPa). Também pode-se notar que o geotêxtil de 300 g/m² possui a abertura de filtração O_{95} de 0,110 mm (sem tensão), 0,093 mm (10 kPa), 0,064 mm (100 kPa), 0,058 (400 kPa), 0,043 (1000 kPa).

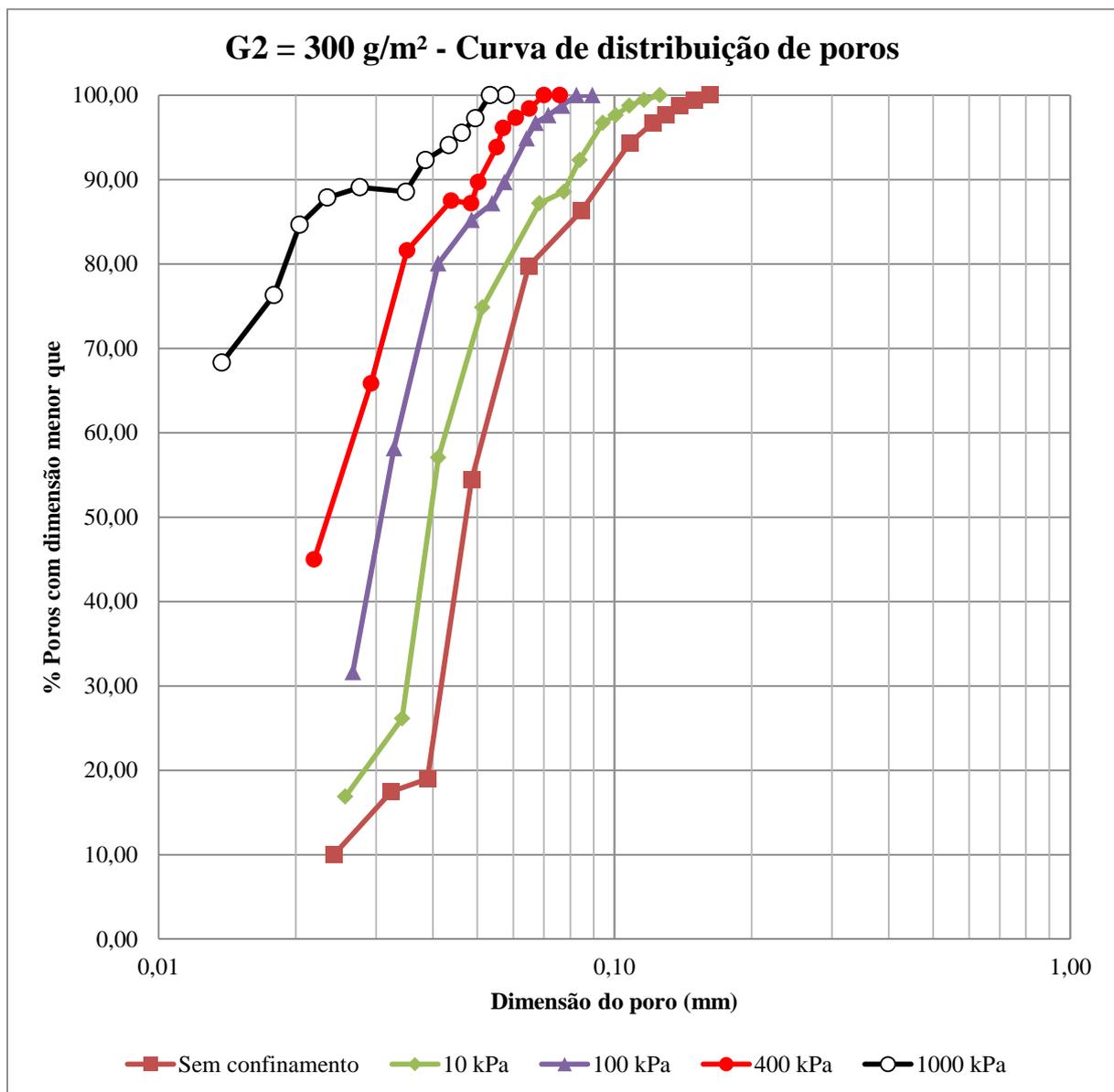


Figura 5.30 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 300 g/m² confinado.

A Figura 5.31 apresenta a variação de vazão de ar de acordo com cada tensão vertical para o geotêxtil G3, seguindo-se a mesma metodologia adotada para os geotêxteis G1 e G2.

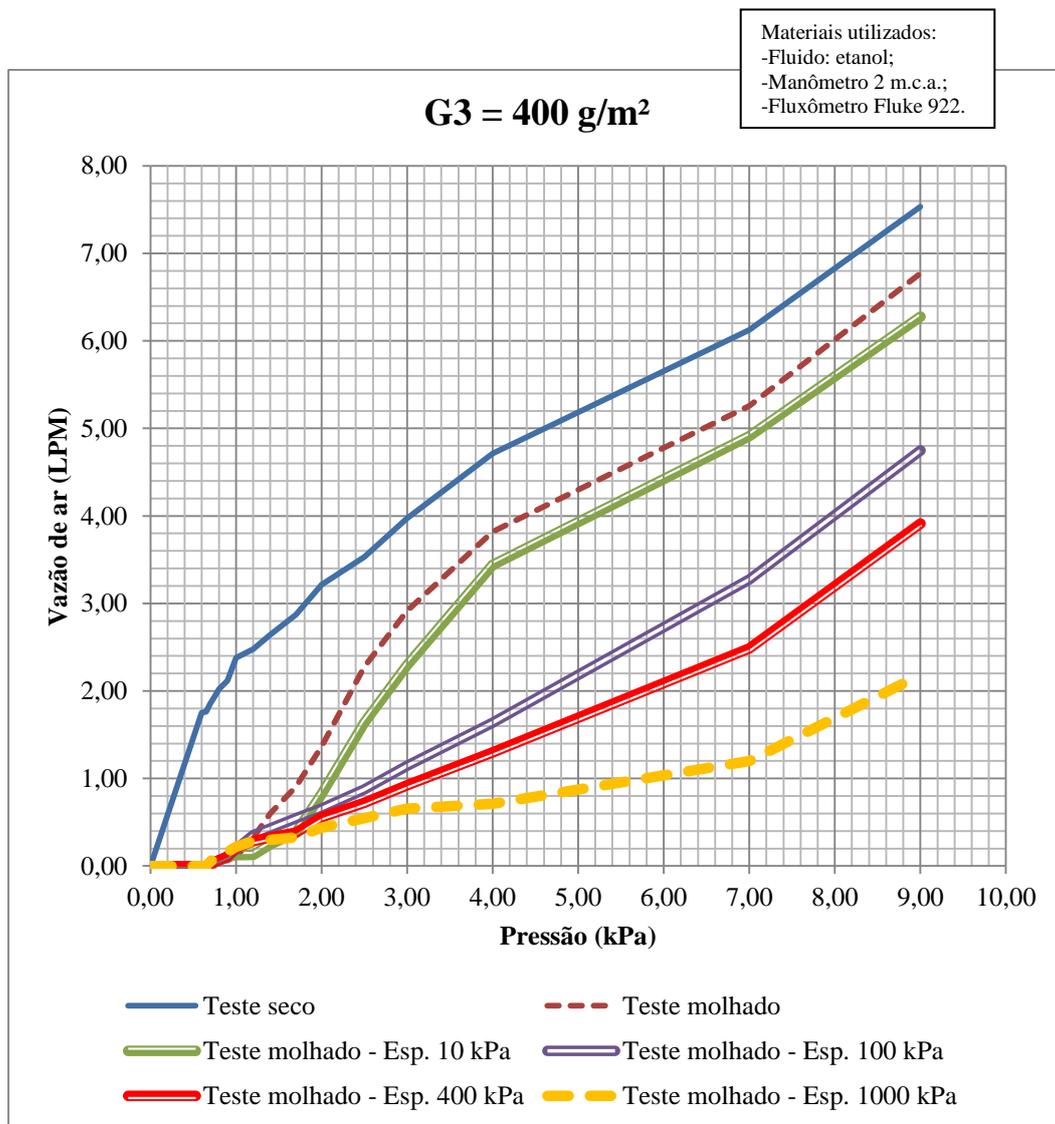


Figura 5.31 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m² simulando variação de tensão normal.

A Figura 5.32 mostra as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os testes saturados com etanol. A partir dessa figura pode-se notar que o geotêxtil G3 possui abertura de filtração O_{98} de 0,128 mm (sem tensão), 0,086 mm (10 kPa), 0,059 mm (100 kPa), 0,048 (400 kPa), 0,030 (1000 kPa). Também pode-se observar valores de O_{95} iguais a 0,097 mm (sem tensão), 0,075 mm (10 kPa), 0,047 mm (100 kPa), 0,039 (400 kPa), 0,028 (1000 kPa).

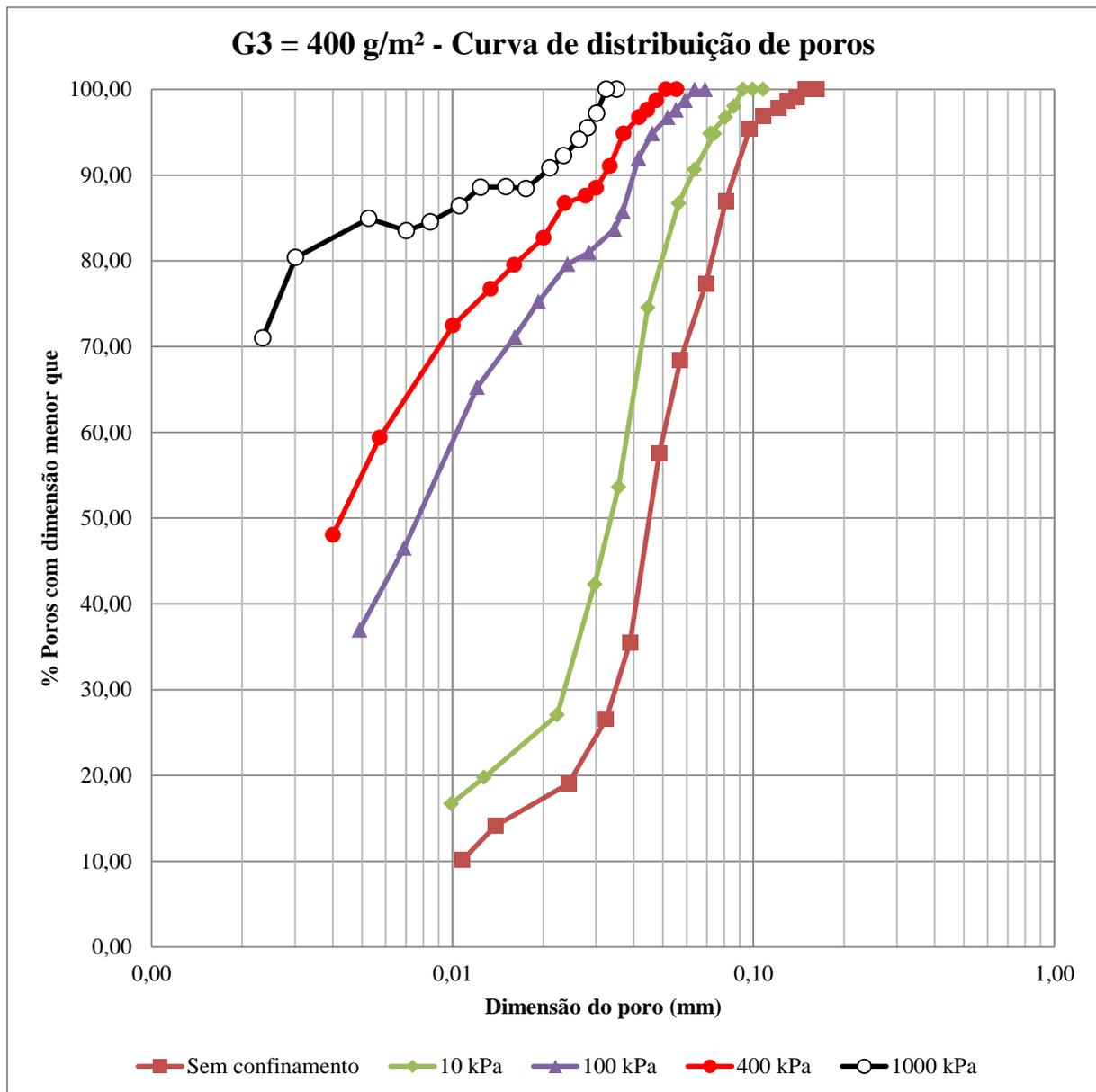


Figura 5.32 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de 400 g/m² confinado.

A partir dos resultados observados foi possível obter a variação da abertura de filtração O_{98} com a tensão normal de confinamento. Os resultados são apresentados na Figura 5.33 (escala linear) e na Figura 5.34 (escala logarítmica). Análise semelhante também foi realizada para a abertura de filtração de O_{95} , como se pode visualizar na Figura 5.35 (escala linear) e na Figura 5.36 (escala logarítmica).

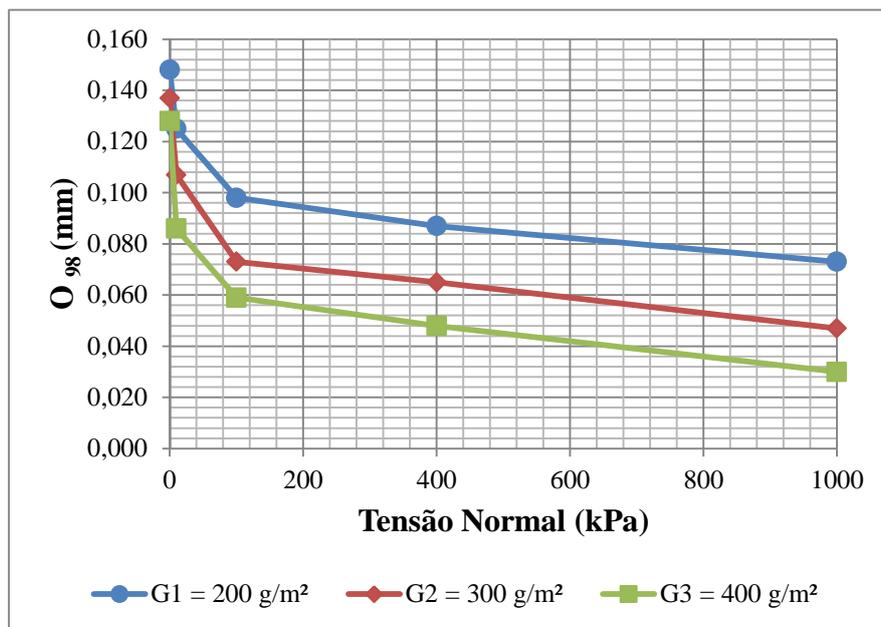


Figura 5.33 Variação da abertura de filtração O_{98} com a tensão normal (escala linear).

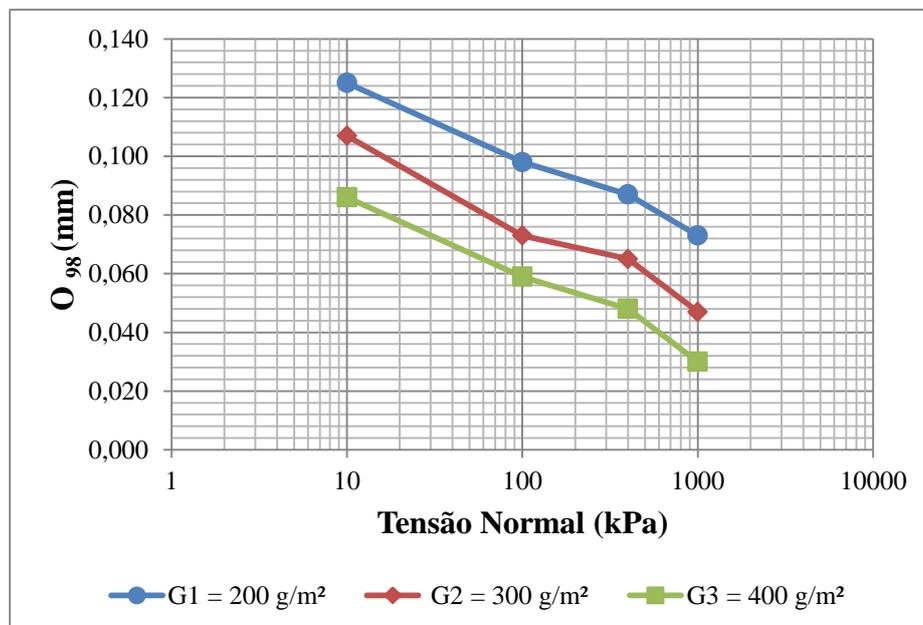


Figura 5.34 Variação da abertura de filtração O_{98} com a tensão normal (escala logarítmica).

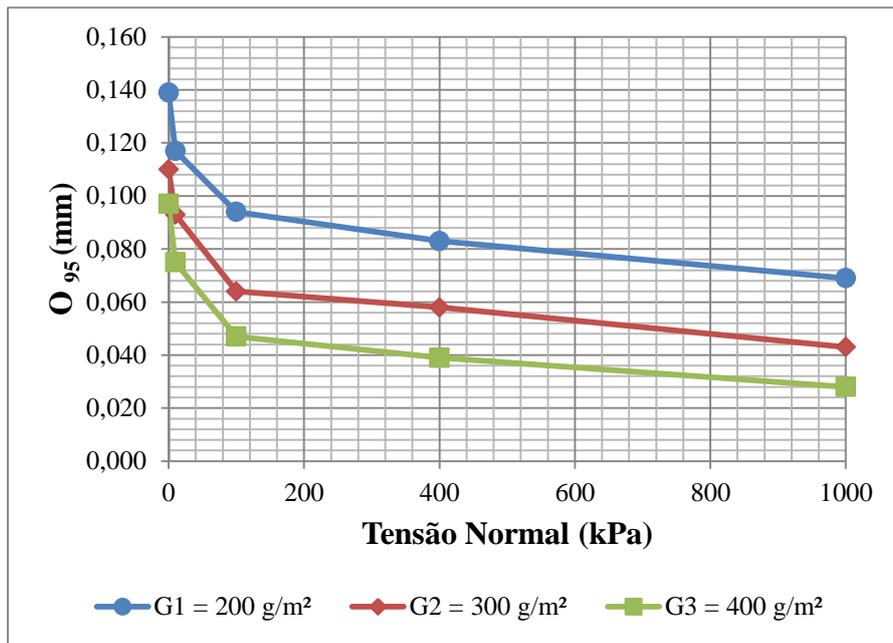


Figura 5.35 Variação da abertura de filtração O_{95} com a tensão normal (escala linear).

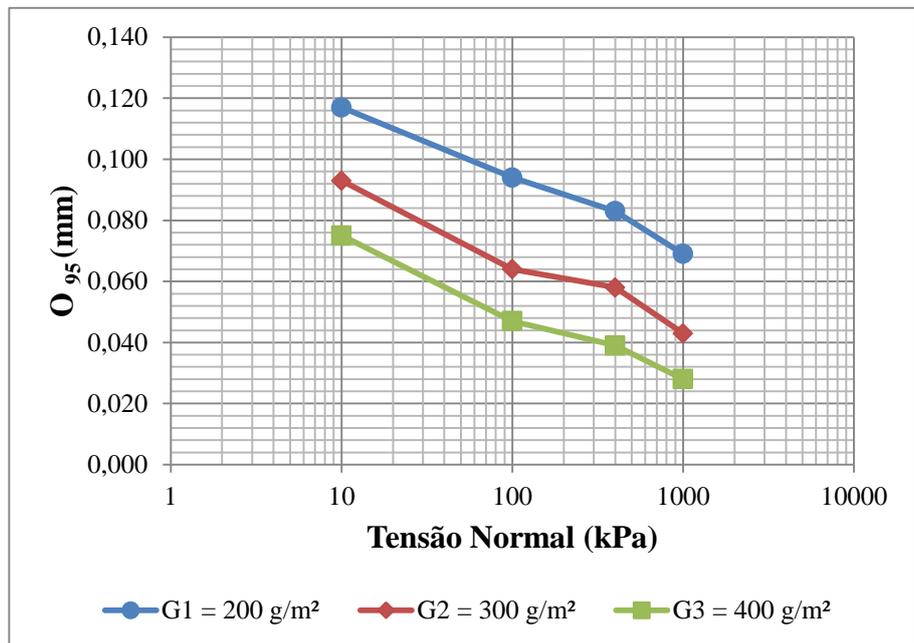


Figura 5.36 Variação da abertura de filtração O_{95} com a tensão normal (escala logarítmica).

A Tabela 5.6 apresenta um resumo dos resultados de aberturas de filtração O_{98} e O_{95} apresentados graficamente na Figura 5.33, Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36 para os geotêxteis ensaiados. Os resultados preenchem a lacuna antes existente em relação à dados sobre abertura de filtração de geotêxteis confinados.

Tabela 5.6 Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis simulando diversas tensões.

Tensão (kPa)	O_{98}			O_{95}		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²
	Diâmetro (mm)			Diâmetro (mm)		
0	0,148	0,137	0,128	0,139	0,110	0,097
10	0,125	0,107	0,086	0,117	0,093	0,075
100	0,098	0,073	0,059	0,094	0,064	0,047
400	0,087	0,065	0,048	0,083	0,058	0,039
1000	0,073	0,047	0,030	0,069	0,043	0,028

Para facilitar a utilização dos dados da Tabela 5.6 pelos projetistas, realizou-se a Tabela 5.7 de comparação dos valores de abertura de filtração sob confinamento em relação à valores da faixa granulométrica de solo. Sendo assim, de acordo com ABNT (1995), a abertura de filtração foi classificada como:

- silte quando representa um solo de partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;
- areia fina quando representa uma areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 0,2 mm;

Tabela 5.7 Comparação dos valores de abertura de filtração sob confinamento em relação à faixa granulométrica de solo.

Tensão (kPa)	O ₉₈			O ₉₅		
	G1 200 g/m ²	G2 300 g/m ²	G3 400 g/m ²	G1 200 g/m ²	G2 300 g/m ²	G3 400 g/m ²
	Diâmetro (mm)			Diâmetro (mm)		
0	Areia fina					
10	Areia fina					
100	Areia fina	Areia fina	Silte	Areia fina	Areia fina	Silte
400	Areia fina	Areia fina	Silte	Areia fina	Silte	Silte
1000	Areia fina	Silte	Silte	Areia fina	Silte	Silte

A Tabela 5.8 exibe a redução da abertura de filtração com o aumento de confinamento. O resultado é apresentado de forma percentual e pode ser utilizado em casos práticos. Por exemplo: o engenheiro que irá projetar o uso do geotêxtil na obra utiliza como dado a abertura de filtração $G3 = 0,128$ mm, sendo que na realidade, o geotêxtil está submetido a uma tensão de 100 kPa, onde a abertura de filtração de fato é $G3 = 0,059$ mm. Nesse caso, o engenheiro tem uma abertura de filtração 53,91% menor do que a planejada, isso interfere diretamente nos critérios de filtro e pode comprometer as funções de retenção e permeabilidade do geotêxtil não tecido, provocando instabilidade do talude e posterior ruptura deste. Este exemplo mostra a relevância da análise dos dados obtidos nos ensaios. O caso mais crítico, ou seja, onde a abertura de filtração sofre maior variação ocorre no $G3 = 400$ g/m², submetido à tensão vertical de 1000 kPa, onde a redução da abertura de filtração pode chegar a 76,56 %.

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

Tensão (kPa)	O ₉₈			O ₉₅		
	G1 200 g/m ²	G2 300 g/m ²	G3 400 g/m ²	G1 200 g/m ²	G2 300 g/m ²	G3 400 g/m ²
	Variação percentual (%)			Variação percentual (%)		
10	15,54	21,90	32,81	15,83	15,45	22,68
100	33,78	46,72	53,91	32,37	41,82	51,55
400	41,22	52,55	62,50	40,29	47,27	59,79
1000	50,68	65,69	76,56	50,36	60,91	71,13

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O intuito de realização desta dissertação foi conhecer melhor as propriedades do geotêxtil não tecido, material sintético utilizado amplamente em projetos de filtros em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Durante a realização dos ensaios foi possível investigar a influência das variações de diversos parâmetros, entre eles: gramatura do geotêxtil, tensão normal, diâmetro, espessura e curva de distribuição de poros do geotêxtil.

Os ensaios para determinação da distribuição de poros dos geotêxteis conseguiram registrar com maior acurácia as aberturas de filtração de poros de 0,01 a 0,2 mm. Realizou-se a ampliação da pressão para valores de até 19 kPa, o que mostrou que a projeção das curvas do ensaio seco e úmido podem coincidir ao final do ensaio, por ser mais fácil se atingir a drenagem total do material inicialmente saturado. Com as alterações feitas na configuração do equipamento, a precisão na aplicação de pressão melhorou e obteve-se também maior acurácia de medição do fluxo de ar pelo fluxômetro, o que permitiu averiguar as aberturas de filtração de maior diâmetro.

Ensaio demonstraram que os geotêxteis G1, G2 e G3 submetidos aos confinamentos de 6, 10, 15, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1500, 2000 kPa tiveram sua espessura diminuída com o aumento da tensão normal. Foi possível avaliar a curva de distribuição de poros dos geotêxteis G1, G2 e G3 quando submetidos à tensões normais nos valores de 10, 100, 400 e 1000 kPa. Com estas curvas pôde-se concluir que a abertura de filtração diminui quando há o aumento de confinamento. Foram executadas tabelas com dados de tensão normal e abertura de filtração, estas podem ser utilizadas como base para se avaliar o comportamento do geotêxtil em obras onde este trabalha confinado.

Estes valores de abertura de filtração são relevantes para projetistas que se preocupam com o devido dimensionamento do geotêxtil, tentando evitar possíveis rupturas, aumento de poropressão, cegamento, bloqueamento e colmatação dos poros do geotêxtil. Com os dados fornecidos o engenheiro pode realizar uma estimativa - que considera o efeito do confinamento - para o cálculo dos critérios de retenção, permeabilidade, anti-colmatação e durabilidade dependendo de cada obra. Isto evita a ocorrência de rupturas e de projetos muito

conservativos, auxiliando na escolha do geotêxtil com a abertura de filtração adequada a cada tipo de solo e tensão submetida.

Para os fins acadêmicos a que se destina a pesquisa, o equipamento desenvolvido na UnB se mostrou promissor, de forma que, com o devido ajuste dos sistemas de medição de volume de ar e de pressão, tornou-se um instrumento importante para a compreensão da estrutura porosa de geotêxteis.

Como sugestões para pesquisas futuras, pode-se apontar:

i) a obter equipamentos com aquisição automática de dados, isto é uma medida prática para se implantar no equipamento, considerando que se perde uma grande quantidade de tempo para a leitura da pressão;

ii) adaptar a célula com mecanismo de controle da espessura do espécime, isto facilita a leitura da espessura e diminui o tempo de preparação das amostras, dispensando a necessidade de costura do geotêxtil;

iii) realizar de ensaios do geotêxtil não tecido com microesferas de vidro (MEV) para obtenção de curva granulométrica do material passante do geotêxtil confinado. Assim seria possível a comparação com os resultados obtidos neste trabalho;

iv) importar o líquido porosil que possui tensão superficial extremamente baixa e utilizá-lo como fluido de saturação, isto deverá melhorar a acurácia na medição da abertura de filtração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1992). Geotêxteis – Determinação da Espessura. NBR 12569, São Paulo, 2p.
- ABNT (1992). Geotêxteis – Determinação da Gramatura. NBR 12568, São Paulo, 2p.
- ABNT (1995). Rochas e solos. NBR 6502, Rio de Janeiro, 18p.
- ABNT (2013). Geotêxteis – Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. NBR ISO 9862, Rio de Janeiro, 4p.
- Akagi, T. (1994). Hydraulic applications of geosynthetics to filtration and drainage problems with special reference to prefabricated band-shaped drains. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 99-119.
- ASTM (1991). Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes, ASTM D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216-218.
- ASTM (1994). Standard Terminology for Geosynthetics. Sponsored by ASTM Committee D4439-98 on Geosynthetics.
- ASTM (2011). 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.
- Aydilek, A.H. & Edil, T. (2004). Evaluation of woven geotextile pore structure parameters using image analysis. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 1:1-14.
- Baveye, P.; Vandevivere, P.; Hoyle, B.L. et al (1998). Environmental Impact and Mechanisms of Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v.28, n.2, pp. 123-191.
- Bessa da Luz, D. W. (2004). Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração sob Tensão, Publicação n° G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.
- Bhatia, S. K. & Smith, J. L. (1995). Application of the bubble point method to the characterization of the pore-size distribution of geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, 18(1): 94-105.
- Bhatia, S. K. & Smith, J. L. (1996). Geotextile Characterization and pore size distribution: part 2, a review of the test methods and results. *Geosynthetics International*, Vol. 3, No.2:155–179.
- Bhatia, S. K., Smith, J. L. & Christopher, B. R. (1994). Interrelationship between pore openings of geotextiles and methods of evaluation. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, pp. 705-710.
- Calhoun, C. C. (1972). Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths. U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station. Vicksburg, Technical Report, pp. 72-77.
- Campbell, R. P. & Wu, J. T. H. (1994). In-plane flow of four geosynthetics for landfill drainage. *Geotechnical Testing Journal*, 17(1): 3-16.
- Carroll, R. G. JR. (1983). Geotextile Filter Criteria in Design Parameters in Geotechnical Engineering. BGS, London, Vol. 2, pp. 121-129.

- Christopher, B. R. & Holtz, R. D. (1985). *Geotextile Engineering Manual*. [S.l.]: U.S. Federal Highway Administration FHWA, 1044 p.
- 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*, Thomas Telford, London, pp. 29-40.
- Dib, P. S. & Aguiar, P. R. (1986). Tucurui-dam: nonwoven geotextile as one of the antipiping barriers. *Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, pp. 279-284.
- Elton, D. J. & Hayes, D.W. (2009). Residual fluid as a source of error in bubble point testing. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 2:1-8.
- Elton, D. J., Hayes, D.W. & Adanur S. (2006). Bubble point testing of geotextiles: apparatus and operation. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 1:1-8.
- 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.
- Fannin, R. J, Choy, H. W. & Atwater, J. W. (1998). Interpretation of transmissivity test data for geonets. *Geosynthetics International*, 5(3): 265-285.
- Fannin, R. J., Vaid, Y. P & Shi, Y. C. (1994). Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 555-563.
- Faure, Y. H., Farkouh, B., Delmas, P. & Nancey, A. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextile and Geomembrane*, 17: 353-370.
- Faure, Y. H., Gourc, J. P. & Gendrin, P. (1990). Structural Study of Porometry and Filtration Opening Size of Geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I. D. Peggs Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 102-119.
- Fayoux, D. & Evon, E. (1982). Influence of the fibre size on the filtration characteristics of needled-punched geotextiles. *Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 49-53.
- Fayoux, D. (1977). Filtration hydrodynamique des sols par des textiles. *First International Conference on Geotextiles*, Paris, pp: 329-332.
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Freedonia Group Inc. (2013). *World Geosynthetics - New Forecasts for 2017 & 2022 in 19 countries*, December 2013, 4 p.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1999). Transmissivity of geosynthetics under high normal stresses. *Geosynthetics'99*, Boston, Massachusetts, USA, 2: 769-782.
- Gardoni, M. G. A. (1995). *Avaliação da Aplicabilidade de Ensaios de Laboratório e Critérios de Filtros para a Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-024A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 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, 1:127-133.
- Gerry, B. S. & Raymond, G. P. (1983). Equivalent opening size of geotextiles. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 6(2): 53-63.
- Giroud, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 3-27.
- Giroud, J. P., Delmas, P. & Artières, O. (1998). Theoretical basis for the development of a two-layer geotextile filter. Sixth International Conference on Geosynthetics, pp. 1037-1044.
- Giroud, J. P., Zhao, A. & Richardson, G. N. (2000). Effect of thickness reduction on geosynthetic hydraulic transmissivity. Special Issue on Liquid Collection Systems, Geosynthetics International, Vol. 7, Nos. 4-6, pp. 433-452.
- Giroud, J.P. (1980) "Introduction to Geotextiles and their Applications", Proceedings of the First Canadian Symposium on Geotextiles, Calgary, Alberta, Canada, September 1980, pp. 3-31.
- Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. Geofilters'96. J. Lafleur & Rollin A.L. (eds.). Montreal. Quebec. Canada, pp. 565-678.
- Giroud, J.P. (2005). Quantification of geosynthetic behaviour. Geosynthetics International, 12(2): 2-27
- Giroud, J.P., (1982) "Filter Criteria for Geotextiles", Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles; Vol. 1, Las Vegas, NV, USA, August 1982, pp. 103-108.
- Gourc, J. P. & Faure, Y. H. (1990). The soil, the water and the fiber: a fruitful interaction now controlled. Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 3: 949-972.
- 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.
- Hoare, D.J. (1982). Synthetics Fabrics as Soil Filters: A Review, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 108 (GT10): 1230-1241.
- Holtz, R. D. (2003). The Civil Engineering Handbook, Second Edition. Chapter 24: Geosynthetics. University of Washington, Seattle, 11 p.
- Hsuan, Y.G. & Koerner, R.M. (2002). Durability and lifetime of polymer fibers with respect to reinforced geosynthetic clay barriers; i.e., reinforced GCLs. Zanzinger, Koerner & Gattung (eds.), Clay Geosynthetic Barriers. Balkema, Netherlands, pp. 73-86.
- IGS (2000). Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols. South Carolina, U.S.A. 17 p.
- Ingold, T. S. & Miller, K.S. (1988). Geotextiles Handbook. Thomas Telford, London, 152 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.; Omange, G.N. & Ume, CA. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43.
- Koerner, R. M. (1994). *Designing with Geosynthetics*, Third Edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 783 p.
- Lafleur, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, (17): 299-312.
- Lawson, C. R. (1986). Geotextiles filter criteria for tropical residual soils. *Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, Vol. 2, pp.557-562.
- 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.
- Lombard, G. (1985). *Analyse et Comportement Hydraulique des Geotextiles Thermolies et Thermosoudes*. Ph. D. Thesis, École Polytechnique, Université de Montréal, Québec, Canadá, 271p.
- Matheus, E. (1997). Comportamento de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração Sob Condições Severas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-048A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 121p.
- Mendes, M.J.A. (2006). Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confinada. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-142/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 152 p.
- Mlynarek, J., Lafleur, J. Rollin, A. L. & Lombard, G. (1993). Geotextile filter design based on filtration opening size obtained by hydrodynamic sieving. *Filter in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Edited by Brauns, Heibaum & Shuler, Balkema, Rotterdam (Proc. GeoFilters'92 Conference, Karlsruhe, Germany), pp. 27-33.
- Montez, F.T. (1987). Utilização de geotêxtil em barragens de rejeitos. *Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*, Rio de Janeiro, RJ, pp. 333-348.
- Ogink, H.J.M. (1975). Investigation on the hydraulic characteristics of synthetic fabrics. *Delft Hydraulics*, publication no. 146, May 1975.
- Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2000a). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International*, Special Issue on Liquid Collection Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 403-431.
- Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2000b). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. In: Mallek, A. (Ed.), *International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85-110.
- Palmeira, E. M. (1996). Propriedades Físicas e Hidráulicas de Geotêxteis Não Tecidos sob Pressão. *Solos e Rochas*, ABMS, 20(2): 69-78.
- Palmeira, E. M. (2000). *Manual de Encostas GeoRio*. Capítulo de Reforço com Geossintéticos, 60 p.
- Palmeira, E. M. (2005). *Notas de aulas. Drenagem e Filtração com geossintéticos*. Power Point. 29 p.

- Palmeira, E.M. (2012). 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. & Vaid, Y.P. (1996). A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, December, p. 899-912.
- Prapaharan, S., Holtz, R. D. & Luna, J. D. (1989). Pore size distribution of nonwoven geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 12(4): 261-268.
- Rao, J. P. (1994). Jute Based Geotextiles & Their Evaluation for Civil Engineering Applications. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes & Related Products, Singapore, 3:853-856.
- Remígio, A. F. N., 2006. Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-038/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 134 p.
- Rigo, J. M., Lhote, F., Rollin, A. L., Mlynarek, J. & Lombard, G. (1990). Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM. STP 1076, I. D. Peggs Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 90-101.
- Rollin, A. L., Masounave, J. & Dallaire, G. (1977). Study of the hydraulic properties of nonwoven fabrics. *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics Geotechnics*, Paris, pp. 201-206.
- Rollin, A. L., Masounave, J. & Lafleur, J. (1982). Pressures drop through nonwoven geotextiles. A new analytical model. *Second International Conference on Geotextile*, Las Vegas, USA, pp. 161-166.
- Shober, W. & Teindl, H. (1979). Filter Criteria for Geotextiles. *Design Parameters Geotechnical Engineering*, BGS, London, 2: 121-129.
- Shukla, S.K. (2002). *Fundamentals of Geosynthetics. Geosynthetics and their Applications*. Shukla (ed.). Thomas Telford. London, pp. 1-54.
- Silveira, A. (1965). An analysis of the problem of washing through in protective filters. *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canadá, pp. 551-555.
- Spada, J. L. G. (1992). Princípios da filtração com geotêxtil. *Seminário Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia, Geossintéticos'92*, UnB, Brasília, DF, pp. 93-120.
- 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.
- Van Zanten. K. (1986). The relation between specification of geotextiles and their essential properties. *Geotextiles and Geomembranes*. 3: 53-76.
- Vandevivere, P.; Baveye, P. (1992). Saturated Hydraulic Conductivity Reduction Caused by Aerobic Bacteria in Sand Columns, *Soil Science of America Journal*, Vol. 56, N. 1.
- Vermeersch, O. G. & Mlynarek, J. (1996). Determination of the pore size distribution of nonwoven geotextiles by a modified capillary flow porometry technique. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*, ASTM

- STP 1281, Shobia K. Bathia & David Suits (eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 19-34.
- Vertematti, J. C. (2001). Curso Básico de Geotêxteis. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG – ABINT, pp. 1-91.
- Wittman, L. (1982). Soil Filtration Phenomena of Geotextiles. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Nevada, USA, 1: 79-83.
- Zhao, A. & Montanelli, F. (1999). Effects of Soil Presence on Flow Capacity of Drainage Geocomposites Under High Normal Loads. Geosynthetics'99, Boston, Massachusetts, USA, (2): 799-812.