

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

**AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB CONFINAMENTO E PARCIALMENTE
COLMATADOS**

HEYDY LUCERO TREJOS GALVIS

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-263/16

BRASÍLIA / DF: MARÇO/ 2016

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

**AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS SOB CONFINAMENTO E PARCIALMENTE
COLMATADOS**

HEYDY LUCERO TREJOS GALVIS

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

APROVADA POR:

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

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

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

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 DE MARÇO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

TREJOS GALVIS, HEYDY

Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados [Distrito Federal] 2016

xxii, 142 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Geotêxteis

2. Bubble Point

3. Abertura de filtração

4. Impregnação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TREJOS, H. (2016). Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-263/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Heydy Lucero Trejos Galvis

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados.

GRAU / ANO: Mestre / 2016

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.

Heydy Lucero Trejos Galvis

Asa Norte, CLN 208, Bl. C, Apto 109.

CEP: 70853-530 - Brasília/DF - Brasil

DEDICATÓRIA

A mí amada madre Mery y hermana Marcela por el amor y apoyo incondicional que me dan todos los días de mi vida. A mis sobrinos adorados Jerónimo, Juan Pablo, Valentina y Valeria por ser una motivación para sacar todos mis proyectos adelante. A mis abuelos Javier y Gerardo, por darme amor de padres. A mi abuela Marta, que siempre me motivó, me apoyó y me consintió en todos los momentos de mi vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me dar a força para conseguir todos meus objetivos, por colocar as pessoas certas na minha vida. Agradeço a minha família por me apoiar em cada passo que dou, por me dar tanto amor todos os dias da minha vida e acreditar em mim sempre, a minha mãe por se sentir tão orgulhosa de mim e me amar incondicionalmente. A minha irmã Marcela pelo apoio em todas as etapas da minha vida. A minha querida amiga e irmã de coração Leidy Londono por estar ao meu lado em praticamente todos os momentos da minha vida, por me apoiar e animar quando senti que não tinha mais forças.

Agradeço a todos os professores do mestrado, pelos conhecimentos compartilhados nas aulas e pela sua contribuição à minha formação profissional. Agradeço muito ao meu querido orientador, o professor Ennio, por estar sempre presente para esclarecer minhas dúvidas e me ajudar com muita paciência e atenção. Estou orgulhosa de ter trabalhado com o senhor.

Agradeço aos meus queridos amigos colombianos e brasileiros, por formar parte da minha vida e contribuir nessa experiência longe de casa, Amarillo, Nairo, Jaime, Cris, Jader, Burgos, Gaby, Renato, Flavio e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para alcançar este logro. Às minhas amigas loucas que adoro muito Aleja, Ele, Betty, Lore, Pao, Clau, obrigada por fazer desses últimos meses no Brasil inesquecíveis.

Agradeço à Andressa Messias da Silva pela ajuda e compreensão na hora de me ensinar a utilizar os equipamentos durante a execução dos ensaios e ao Marlon por me fornecer informações para o melhor entendimento dos ensaios.

Agradeço imensamente à CNPq e à Capes pelo financiamento e à empresa BIDIM pelo fornecimento de materiais geotêxteis para o desenvolvimento dessa pesquisa.

“Dizem que o que procuramos é um sentido para vida. Penso que o que procuramos são experiências que nos façam sentir que estamos vivos”

“Precisamos estar dispostos a nos livrar da vida que planejamos, para podermos viver a vida que nos espera. A pele velha tem que cair para que uma nova possa nascer”

Joseph Campbell

Geotêxteis são comumente utilizados como filtros em obras geotécnicas e geoambientais. Para o dimensionamento de tais filtros é de fundamental importância o conhecimento da abertura de filtração do geotêxtil. Com o objetivo de considerar condições mais realistas nas propriedades hidráulicas da manta de geotêxtil quando usada como filtros e drenos, foram realizados ensaios de aplicação de tensão de compressão e ensaios de ponto de bolha (Bubble Point Test) em cinco tipos de geotêxteis não tecidos, agulhados, com massas por unidade de área de 200, 300 e 600 g/m². Além disso, foram avaliadas configurações de duas e três camadas de geotêxtil de 600 g/m² para se conseguirem gramaturas de 1200 g/m² e 1800 g/m². Com o intuito de comparar o comportamento dos geotêxteis segundo a matéria prima utilizada na sua fabricação, foram ensaiados geotêxteis de poliéster (PET) e polipropileno (PP) de 200 g/m² e 300 g/m². Os ensaios foram realizados sobre geotêxteis virgens (limpos) e impregnados com microesferas de vidro com a finalidade de conhecer os efeitos isolada e conjuntamente do nível de confinamento e da impregnação na abertura de filtração do geotêxtil.

Os ensaios de compressão uniaxial permitiram conhecer a compressibilidade dos materiais virgens e impregnados, para depois ser levada em conta nos ensaios de ponto de bolha, os quais forneceram a curva de distribuição dos tamanhos das aberturas dos geotêxteis empregados sob diferentes condições de confinamento e impregnação. Assim, com estes resultados foi possível avaliar aberturas de filtração de amostras virgens e impregnadas.

Com os resultados obtidos nos diferentes ensaios e utilizando várias metodologias encontradas na literatura, foram estimados os coeficientes de permeabilidade e as aberturas de filtração dos geotêxteis. As previsões foram comparadas aos resultados de ensaios com acurácia satisfatória dependendo do método considerado.

Segundo as análises realizadas, conclui-se que os critérios convencionais de retenção de grãos e permeabilidade de filtros geotêxteis são conservadores. Os dados obtidos contribuem para melhorar estimativas de abertura de filtração de geotêxteis para dimensionamentos de filtros de obras geotécnicas e geoambientais.

ABSTRACT

Geotextiles are commonly used as filters in geotechnical and geoenvironmental works. The evaluation of the geotextile filtration opening size is of utmost importance in the design of such filters. In order to consider more realistic conditions for the evaluation of hydraulic properties of geotextiles when used as filters and drains, uniaxial compression and bubble point tests were carried out on five types of nonwoven, needle punched, geotextiles, with masses per unit area of 200, 300 and 600 g/m². Furthermore, tests were also conducted on configurations with two and three layers of a 600 g/m² geotextile to achieve masses per unit of 1200 g/m² and 1800 g/m². Tests on polyester (PET) and polypropylene (PP) geotextiles with 200 and 300g/m² were executed to assess the influence of polymer type on the behavior of compressibility and hydraulic properties of geotextiles . The tests were done on virgin (clean) geotextile specimens and on specimens impregnated with glass beads to investigate the influences of these factors on geotextile filtration opening size.

The uniaxial compression tests provided knowledge on the compressibility of virgin and impregnated materials and these results were taken into account in the bubble point tests, which provided the opening size distribution curves of the geotextiles tested under different conditions of confinement and impregnation.

The accuracies of some methods in the literature for the prediction of permeability and filtration opening sizes of geotextiles were assessed by comparing their predictions with test results. In general, the comparisons were satisfactory depending on the method considered.

The results obtained show that conventional retention and permeability criteria are conservative. These results contribute to improve the estimates of geotextile filtration opening sizes for filter design in geotechnical and geoenvironmental applications.

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	2
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.4. ESTRUTURA DA DISERTAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1. DEFINIÇÃO DE GEOTÊXTEIS	4
2.1.1. FABRICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS	5
2.1.1.1. GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO AGULHADO (GTNa):	7
2.1.1.2. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO TERMOLIGADO (GTNt)	8
2.1.1.3. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO RESINADO (GTNr)	8
2.1.2. FUNÇÕES DOS GEOTÊXTEIS	10
2.2. PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS	11
2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS.....	12
2.2.1.1. MASSA POR UNIDADE DE ÁREA, OU GRAMATURA (M_A).....	12
2.2.1.2. ESPESSURA NOMINAL (t_{GT}).....	13
2.2.1.3. POROSIDADE (η_{GT})	14
2.2.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS.....	15
2.2.2.1. PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO E PERMISSIVIDADE	18
2.2.2.2. PERMEABILIDADE TRANSVERSAL E TRANSMISSIVIDADE... 	20
2.2.2.3. ABERTURA DE FILTRAÇÃO	21
2.3. MÉTODO BUBBLE POINT TEST	25
2.4. APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM.....	31
2.4.1. BARRAGEM DE VALCROS – FRANÇA	34
2.5. CRITÉRIOS DE FILTRO	35
2.5.1. CRITÉRIO DE RETENÇÃO DE GRÃOS	35

2.5.2.	CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE DO FILTRO	41
2.5.3.	CRITÉRIO CONTRA COLMATAÇÃO DO FILTRO	42
2.5.4.	CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA OU RESISTÊNCIA E DURABILIDADE	46
2.6.	INFLUÊNCIA DAS TENSÕES E NÍVEL DE IMPREGNAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS: PESQUISAS ANTERIORES.....	46
2.6.1.	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS COM O NÍVEL DE TENSÃO.....	47
2.6.2.	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS COM A IMPREGNAÇÃO	49
3.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	50
3.1.	MATERIAIS UTILIZADOS	50
3.1.1.	GEOTÊXTEIS.....	50
3.1.2.	MICROESFERAS DE VIDRO.....	52
3.2.	EQUIPAMENTOS.....	53
3.2.1.	EQUIPAMENTO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	53
3.2.2.	EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>)	55
4.	METODOLOGIA DA PESQUISA	61
4.1.	PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO	61
4.1.1.	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTIL	61
4.1.2.	IMPREGNAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO (MEV).....	64
4.2.	ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL: AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DO GEOTÊXTIL COM A TENSÃO NORMAL.....	67
4.3.	ENSAIO DE <i>BUBBLE POINT</i> COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTIL E IMPREGNAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO	68
4.3.1.	LIQUIDO DE SATURAÇÃO	68
4.3.2.	SIMULAÇÃO DE TENSÃO - REDUÇÃO DE ESPESSURA.....	68
4.3.3.	PROCEDIMENTO DE ENSAIO	69
5.	RESULTADOS E ANÁLISES.....	71
5.1.	ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL: AVALIAÇÃO DE ESPESSURA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL.....	71

5.2.	ENSAIOS DE <i>BUBBLE POINT</i> : CALIBRAÇÃO E REPETIBILIDADE	76
5.3.	ENSAIOS DE <i>BUBBLE POINT</i> : AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL.....	79
5.4.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO GEOTÊXTIL	88
5.5.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO E DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL.....	97
5.6.	ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE GEOTÊXTEIS IMPREGNADOS E SUBMETIDOS A TENSÃO.....	106
5.6.1.	PERMEABILIDADE SOB CONDIÇÕES VIRGENS E IMPREGNADAS	106
5.6.2.	ABERTURA DE FILTRAÇÃO SOB CONDIÇÕES VIRGENS E IMPREGNADAS	116
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	120
6.1.	CONCLUSÕES.....	120
6.1.1.	EFEITO DA TENSÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS	122
6.1.2.	EFEITO DA IMPREGNAÇÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS	122
6.1.3.	EFEITO TENSÃO-IMPREGNAÇÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS	123
6.2.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	APÊNDICES.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Características em filtração e drenagem dos geotêxteis segundo processo de fabricação (modificada de Corbet, 1993).	10
Tabela 2.2 Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado - Palmeira & Gardoni, 2000b). 38	
Tabela 2.3 Critérios de permeabilidade (Palmeira, 2003).....	42
Tabela 2.4 Critérios contra colmatção (modificado - Christopher & Fischer, 1992).....	45
Tabela 3.1. Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados	51
Tabela 3.2. Características granulométricas das microesferas de vidro (Tatto, 2010).....	52
Tabela 4.1. Teores de impregnação para os geotêxteis analisados	65
Tabela 4.2. Verificação da não influência da tela metálica e da costura na obtenção de dados de abertura de filtração (Messias da Silva, 2014).	69
Tabela 5.1. Porcentagem de redução da espessura à máxima tensão aplicada	76
Tabela 5.2. Aberturas de filtração geotêxtil PP 200g /m ²	78
Tabela 5.3 Valores de O ₉₈ obtidos para os geotêxteis impregnados.	86
Tabela 5.4 Valores de O ₉₅ obtidos para os geotêxteis impregnados.	86
Tabela 5.5 Valores de O ₉₈ obtidos para os geotêxteis comprimidos.....	95
Tabela 5.6 Valores de O ₉₅ obtidos para os geotêxteis comprimidos.....	95
Tabela 5.7 Valores de O ₉₈ e O ₉₅ obtidos para os geotêxteis comprimidos e impregnados. ...	105
Tabela 5.8 Valores fixos utilizados no cálculo das propriedades hidráulicas.	108
Tabela 5.9 Valores típicos do coeficiente de permeabilidade nos solos (Modificado- Ribeiro, 2013).....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2003).	5
Figura 2.2 Processos de fabricação de geotêxteis tecidos e não tecidos (Vertematti, 2001)	5
Figura 2.3 Fabricação dos geotêxteis tecidos (Vertematti, 2001)	6
Figura 2.4 Fabricação dos Geotêxteis não tecidos cardados (Vertematti, 2001).	7
Figura 2.5 Fabricação dos Geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos (Vertematti, 2001).	7
Figura 2.6 Diagrama do processo de agulhagem e agulha utilizada (modificada de Koerner, 2005).....	8
Figura 2.7 Diferentes tipos de geotêxteis:(a) geotêxtil tecido, (b) geotêxtil não tecido ligado mecanicamente (por agulhagem), (c) geotêxtil não tecido ligado termicamente, e (d) geotêxtil não tecido ligado quimicamente (modificado - Ferreira, 2001).....	9
Figura 2.8 Principais funções dos geotêxteis (Vertematti, 2001).	11
Figura 2.9 Espessura dos geotêxteis com a tensão (modificada – Faure <i>et al.</i> , 1990).....	14
Figura 2.10 Esquema ensaio de permissividade (modificado - Palmeira, 2003).	19
Figura 2.11 Resultados Experimentais- Ensaio de permeabilidade em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado - Lafleur & Rollin, 1983).....	19
Figura 2.12 Esquema ensaio de transmissividade (modificado - Palmeira & Gardoni, 2002)	20
Figura 2.13 Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2003).	23
Figura 2.14 Resultados de diferentes métodos de avaliação da abertura de filtração de geotêxteis (Bhatia <i>et al.</i> , 1996).....	24
Figura 2.15 <i>Bubble point test</i> convencional (Elton & Hayes, 2007).....	25
Figura 2.16 Efeito do ângulo de contato na distribuição dos tamanhos de poros num geotêxtil (modificado - Elton & Hayes, 2007).	27
Figura 2.17 Curvas obtidas em ensaios de ponto de bolha (Messias da Silva, 2014).....	28

Figura 2.18 Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha (Messias da Silva, 2014).	29
Figura 2.19 Esquema do equipamento para ensaio do Ponto de Bolha. Reproduzido de ASTM (2014).	30
Figura 2.20 Esquema da célula para ensaio do Ponto de Bolha. Reproduzido de ASTM (2014).	30
Figura 2.21 Aplicações de geotêxteis em sistemas dreno-filtrantes (a) barragem de terra, (b) enrocamento de contenção, (c) colchão drenante (d) pavimentos e aterros (Vertematti, 2001).	33
Figura 2.22 Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure <i>et al.</i> , 1999).	34
Figura 2.23 Formação de arcos de partículas (modificado-John,1987)	36
Figura 2.24 Mecanismos de colmatção de filtros geotêxteis (Palmeira, 2003):.....	44
Figura 2.25 Resultados de ensaios em geotêxteis não tecidos (Palmeira & Gardoni 2000 e 2002).	47
Figura 2.26 Variação da abertura de filtração (O_{98} e O_{95}) com a tensão normal de confinamento (Messias da Silva, 2014).	48
Figura 2.27 Efeitos da impregnação do geotêxtil nas suas propriedades físicas e hidráulicas (Palmeira & Fannin, 2002).	49
Figura 3.1. Espécimes de geotêxteis utilizados	50
Figura 3.2. Detalhe dos furos do processo de agulhagem nos geotêxteis de 200g/m ² obtidos com microscópio de alta resolução, ampliado em 50 vezes: (a) Poliéster, (b) Polipropileno..	51
Figura 3.3. Detalhe dos furos do processo de agulhagem nos geotêxteis de 200g/m ² obtidos com microscópio de alta resolução, ampliado em 100 vezes: (a) Poliéster, (b) Polipropileno	52
Figura 3.4. Detalhe das microesferas de vidro (Tatto, 2010).	52
Figura 3.5. Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrassom (Tatto, 2010).	53
Figura 3.6. Equipamento de adensamento usado para ensaios de compressão uniaxial.....	54
Figura 3.7. Equipamento utilizado para determinação da curva de distribuição de poros em geotêxteis.....	55

Figura 3.8. Fonte de ar limpo e pressurizado	56
Figura 3.9 Válvula para controle de pressão no <i>Bubble Point Test</i>	56
Figura 3.10. Manômetro de ramo aberto	57
Figura 3.11 Célula onde é ensaiada a amostra de geotêxtil.	58
Figura 3.12. Placa perfurada com diâmetros variados.	58
Figura 3.13 Dois o’rings posicionados externamente à célula.	59
Figura 3.14. Medidor digital Fluke 922	59
Figura 3.15 Coletor de fluido de saturação.	60
Figura 4.1 Amostragem de geotêxtil (a) Amostra sem irregularidades, sendo acomodada em uma superfície plana e limpa, permanecendo neste local por 24 horas, (b) Marcação de 196 quadrados de 15 cm x 15 cm, (c) Identificação dos quadrados com números, (d) Recorte dos espécimes com números obtidos aleatoriamente.	63
Figura 4.2. Espécimes de geotêxtil identificados com detalhe: identificação das áreas de menor gramatura.....	63
Figura 4.3 Saturação do espécime de geotêxtil em etanol.	64
Figura 4.4. Geotexteis impregnados com microesferas de vidro (a) ampliada 100 vezes, (b) ampliada 200 vezes.	66
Figura 4.5. Geotêxtil comprimido para controle da espessura das amostras durante a realização do ensaio de <i>Bubble Point</i> para simular compressão sob tensão.	69
Figura 5.1 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m ² (virgem).	72
Figura 5.2 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m ² ($\lambda=0,5$).	72
Figura 5.3 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m ² ($\lambda=1$).	72
Figura 5.4 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m ² ($\lambda=3$).	73
Figura 5.5 Variação da espessura média com a tensão normal para G1– PP 200g/m ²	73

Figura 5.6 Variação da espessura média com a tensão normal para G2– PP 300g/m ²	73
Figura 5.7 Variação da espessura média com a tensão normal para G3– PET 200g/m ²	74
Figura 5.8 Variação da espessura média com a tensão normal para G4– PET 300g/m ²	74
Figura 5.9 Variação da espessura média com a tensão normal para G5– PET 600g/m ²	74
Figura 5.10 Variação da espessura média com a tensão normal para G6– PET 1200g/m ²	75
Figura 5.11 Variação da espessura média com a tensão normal para G7– PET 1800g/m ²	75
Figura 5.12 Vazão de ar versus pressão – Peneira #170.	76
Figura 5.13 Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170.....	77
Figura 5.14 Vazão de ar versus pressão – GT PP 200 g/m ²	77
Figura 5.15 Repetibilidade do ensaio: curva de distribuição das aberturas de GT PP 200 g/m ²	78
Figura 5.16 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 200 g/m ² impregnado.....	79
Figura 5.17 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 200 g/m ² impregnado.....	80
Figura 5.18 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 300 g/m ² impregnado.....	80
Figura 5.19 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 300 g/m ² impregnado.....	81
Figura 5.20 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 200 g/m ² impregnado.	81
Figura 5.21 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 200 g/m ² impregnado.	82
Figura 5.22 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 300 g/m ² impregnado.	82
Figura 5.23 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 300 g/m ² impregnado.....	83
Figura 5.24 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 600 g/m ² impregnado.	83
Figura 5.25 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 600 g/m ² impregnado.	84
Figura 5.26 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1200 g/m ² impregnado.	84
Figura 5.27 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1200 g/m ² impregnado.	85
Figura 5.28 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1800 g/m ² impregnado.	85
Figura 5.29 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1800 g/m ² impregnado.	86
Figura 5.30 Variação do O ₉₈ com o nível de impregnação.	87

Figura 5.31	Variação do O_{95} com o nível de impregnação.	87
Figura 5.32	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 200 g/m ² confinado.	88
Figura 5.33	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 200 g/m ² confinado.	89
Figura 5.34	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 300 g/m ² confinado.	89
Figura 5.35	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 300 g/m ² confinado.	90
Figura 5.36	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 200 g/m ² confinado.	90
Figura 5.37	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 200 g/m ² confinado.	91
Figura 5.38	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 300 g/m ² confinado.	91
Figura 5.39	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 300 g/m ² confinado.	92
Figura 5.40	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 600 g/m ² confinado.	92
Figura 5.41	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 600 g/m ² confinado.	93
Figura 5.42	Vazão de ar versus pressão – PET 1200 g/m ² confinado.	93
Figura 5.43	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1200 g/m ² confinado.	94
Figura 5.44	Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1800 g/m ² confinado.	94
Figura 5.45	Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1800 g/m ² confinado.	95
Figura 5.46	Variação do O_{98} com o nível de tensão.	96
Figura 5.47	Variação do O_{95} com o nível de tensão.	96
Figura 5.48	Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G1.	98
Figura 5.49	Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G1.	98
Figura 5.50	Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G2.	99
Figura 5.51	Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G2.	99
Figura 5.52	Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G3.	100
Figura 5.53	Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G3.	100
Figura 5.54	Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G4.	101
Figura 5.55	Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G4.	101
Figura 5.56	Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G5.	102

Figura 5.57 Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G5.	102
Figura 5.58 Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G6.	103
Figura 5.59 Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G6.	103
Figura 5.60 Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G7.	104
Figura 5.61 Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G7.	104
Figura 5.62 Obtenção de O_j e p_j do gráfico dos ensaios de BBP	107
Figura 5.63 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G1 (PP 200 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	109
Figura 5.64 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G2 (PP 300 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	110
Figura 5.65 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G3 (PET 200 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	111
Figura 5.66 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G4 (PET 300 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	112
Figura 5.67 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G5 (PET 600 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	113
Figura 5.68 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G6 (PET 1200 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	114
Figura 5.69 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G7 (PET 1800 g/m ²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer <i>et al.</i> (1995).....	115
Figura 5.70 Comparação entre abertura de filtração (O_{95}) normalizada dos geotêxteis virgens obtida no <i>Bubble point test</i> com o método de Giroud (1996).	117

Figura 5.71 Comparação entre abertura de filtração (O_{95}) normalizada dos geotêxteis impregnados obtida no <i>Bubble point test</i> com o método de Giroud (1996).	118
Figura 5.72 Comparação entre abertura de filtração (O_{98}) normalizada dos geotêxteis virgens obtida no <i>Bubble point test</i> com o método de Giroud (1996).	118
Figura 5.73 Comparação entre abertura de filtração (O_{98}) normalizada dos geotêxteis impregnados obtida no <i>Bubble point test</i> com o método de Giroud (1996).	119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

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

I_D	Densidade relativa
IGS	International Geosynthetics Society
ISO	International Organization for Standardization
k	Coefficiente de permeabilidade
k^*	Coefficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado
k_f	Coefficiente de permeabilidade do filtro
k_n	Coefficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
k_p	Coefficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil
k_{pc}	Fator de redução por colmatção do geotêxtil
$k\sigma$	Fator de redução por confinamento do geotêxtil
k_s	Permeabilidade do solo
LPM	Litros Por Minuto
M_A	Gramatura - massa por unidade de área
m.c.a.	Metro de coluna de água
MEV	Microesferas de vidro
M_f	Massa das fibras do geotêxtil
M_s	Massa das partículas de solo no geotêxtil
mm	Milímetro
N	Número que depende do critério de filtro utilizado
NBR	Norma Brasileira
n_{GT}	Porosidade do geotêxtil
n_{ef}	Porosidade efetiva
O_{50}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 50% passando
O_{85}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 85% passando
O_{90}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 90% passando
O_{95}	Diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passando
O_{98}	Tamanho máximo de poros
O_f	Abertura de filtração do geotêxtil
O_f^*	Abertura de filtração do geotêxtil confinado e impregnado
PA	Poliamida

PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PET	Poliéster
POA	Percentagem de área aberta
PSD	<i>Pore Size Distribution</i>
Q	Vazão
Q _{dry}	fluxo de ar que passa através da amostra no teste seco no BBP
Q _{wet}	fluxo de ar que passa através da amostra no teste úmido no BBP
T	Tensão superficial
t _{GT}	Espessura do geotêxtil
UnB	Universidade de Brasília
USACE	United States Army Corps of Engineers
β	Fator de forma, função da tortuosidade do meio
η_w	Viscosidade dinâmica do fluido
θ	Transmissividade
ρ_f	Massa específica de fibras
ρ_w	Massa específica do fluido
ξ	Parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio
ψ	Permissividade
Θ	Ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil no ensaio de ponto de bolha

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Os geotêxteis têm sido usados por mais de 40 anos como drenos e filtros em obras geotécnicas e de proteção ambiental. A escolha do geotêxtil adequado é feita utilizando critérios empíricos, resultando comumente em projetos não muito realistas (Palmeira & Fannin, 2002). É importante definir condições mais reais que sejam ajustadas à realidade à qual o geotêxtil estará submetido na obra. Como material de filtro, é importante conhecer a abertura de filtração disponível para a passagem dos grãos de solo através do geotêxtil não tecido, propriedade que apresenta variações segundo o estado de tensões imposto ao geotêxtil (Messias da Silva, 2014). O comportamento do filtro também pode mudar ao longo do tempo, devido à colmatação, bloqueamento ou cegamento dos poros do geotêxtil.

Por causa do processo de fabricação, os geotêxteis não tecidos não têm uma medida uniforme dos seus poros, uma vez que durante a fabricação as fibras são dispostas aleatoriamente. Considerando isto, é importante determinar qual a ocorrência de poros de diversas dimensões na matriz do geotêxtil. Esta medida é estimada a partir da definição da curva de distribuição de poros do material, que apresenta a frequência com que ocorre cada medida de poro (Lima, 2014).

Atualmente, são feitos ensaios para a determinação da abertura de filtração por meio de ensaios sem confinamento e sem levar em conta a impregnação do solo no geotêxtil, a qual pode se apresentar no campo durante o espalhamento e compactação das camadas do solo sobre o filtro ou, também, pelo regime de fluxo que arrasta as partículas em suspensão (Palmeira & Fannin, 2002). Levando em conta esses fatores, é importante a realização de ensaios que reproduzam condições mais realistas que serão impostas ao geotêxtil nos que, se possa observar as variações apresentadas sob diferentes estados de tensão e a possibilidade de impregnação de material dentro dos seus poros.

O valor da abertura de filtração dos geotêxteis submetido a tensões de compressão em ensaios quando comparado com os valores obtidos em ensaios sem confinamento devido à compressão dos poros (Giroud, 1996; Palmeira et al., 1996; Palmeira & Gardoni, 2002; Messias da Silva, 2014). Além disso, quando o geotêxtil está parcialmente colmatado por intrusão de grãos de

solo nos vazios a sua compressibilidade diminui. Assim, a simulação dos dois efeitos, ocorrendo simultaneamente, permitirá uma avaliação mais realista do comportamento de filtros geotêxteis no campo.

Essa dissertação visa conhecer a variação nas propriedades de permeabilidade dos geotêxteis não tecidos devido ao confinamento da amostra combinado com a colmatação parcial.

1.2. OBJETIVO GERAL

Analisar os efeitos das tensões de compressão e da impregnação dos poros na abertura de filtração de geotêxteis não tecidos, por meio dos ensaios de ponto de bolha (*Bubble point test*).

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar o comportamento da variação da espessura do geotêxtil quando submetido a compressão, em função da quantidade de partículas sólidas nos seus poros.

Analisar o comportamento da abertura de filtração com a quantidade de material impregnado.

Avaliar a variação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos (limpos e impregnados) com o nível de tensões.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 6 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a descrição do tema da dissertação, incluindo a introdução, a motivação da pesquisa, o objetivo geral e os específicos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica que permitiu uma melhor compreensão do tema de estudo e subsidiou os capítulos seguintes. Este capítulo se inicia com a definição básica de geotêxtil: tipos, processo de fabricação, funções e propriedades. Ainda na fundamentação teórica, a dissertação mostra a utilização prática da aplicação de geotêxteis em obras de filtração e drenagem e os resultados obtidos de pesquisas anteriores, importantes para o tema de pesquisa. O Capítulo 3 apresenta os materiais e os equipamentos que foram utilizados nos ensaios, suas especificações e propriedades. O Capítulo 4 fornece a metodologia empregada na pesquisa, onde são descritos os procedimentos para a preparação das amostras para os tipos

de geotêxteis, além do processo de impregnação e posterior obtenção da curva de distribuição de poros. O Capítulo 5 descreve os resultados obtidos nos ensaios e as análises, levando-se em conta a presença das partículas de microesferas de vidro dentro dos poros do geotêxtil, além da variação do confinamento e da gramatura do material. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

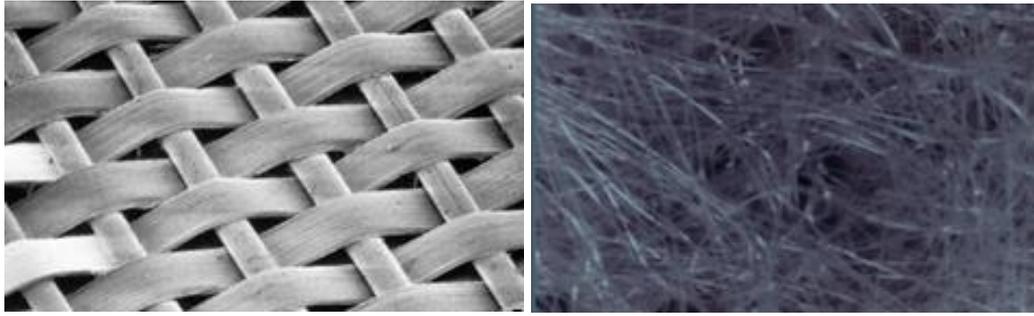
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Visando à compreensão das atividades desenvolvidas para a realização do presente trabalho, é importante definir os fundamentos teóricos que foram levados em conta. Nessa parte da dissertação são apresentadas as definições do material geotêxtil, os tipos de geotêxteis segundo a metodologia de fabricação, as funções e propriedades principais dos geotêxteis, as aplicações de geotêxteis em sistemas de drenagem e filtração, os critérios de filtro e resultados obtidos em pesquisas anteriores.

2.1. DEFINIÇÃO DE GEOTÊXTEIS

O geotêxtil é um tipo de geossintético definido pela norma NBR ISO 10318 (ABNT, 2013) como um produto têxtil tridimensional permeável, composto por fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhem várias funções numa obra geotécnica. Os polímeros mais comuns utilizados para a sua fabricação são o poliéster (PET) e o polipropileno (PP). Os geotêxteis são usados para aplicações de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões e, são classificados como apresentado na Figura 2.1.

- **Geotêxtil tecido:** produto obtido do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais denominadas *trama* (sentido transversal) e *urdume* (sentido longitudinal).
- **Geotêxtil não tecido:** produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos (agulhado), químicos (resinado) ou térmicos (termoligado) ou pela combinação destes.



(a)

(b)

Figura 2.1 Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2003).

2.1.1. FABRICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis tecidos e não tecidos diferem entre si pelos processos de fabricação, como é apresentado na Figura 2.2. Devido ao processo de confecção os geotêxteis não tecidos normalmente têm maior espessura do que os tecidos (Basham *et al.*, 2004)

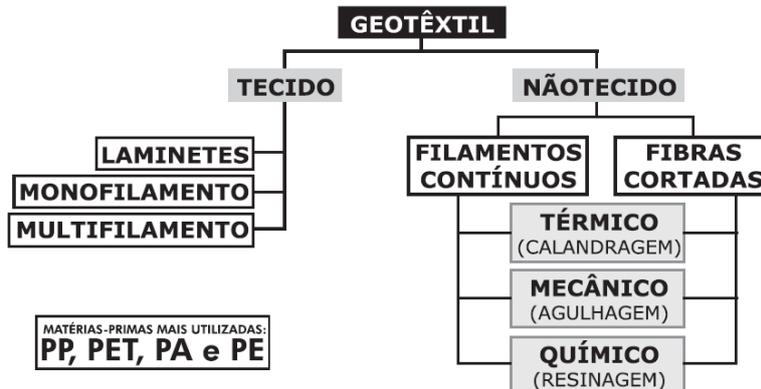


Figura 2.2 Processos de fabricação de geotêxteis tecidos e não tecidos (Vertematti, 2001)

Segundo Vertematti (2001), os geotêxteis tecidos, basicamente são fabricados em teares que atramam os fios ou laminetes em duas direções perpendiculares entre si: a trama perpendicular à direção de fabricação e o urdume, a própria direção de fabricação. Uma vista esquemática do equipamento usado a é apresentada na Figura 2.3.

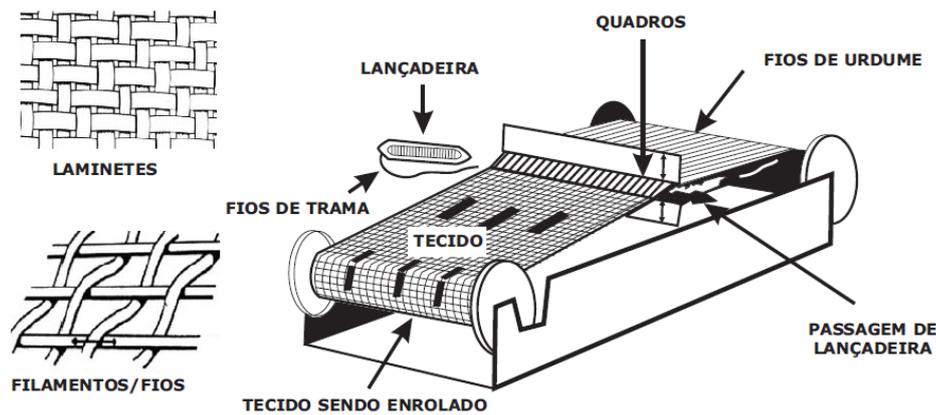


Figura 2.3 Fabricação dos geotêxteis tecidos (Vertematti, 2001)

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

No processo de fabricação dos não-tecidos cabe destacar os produzidos via carda e via fundida por serem os mais utilizados no mundo. No processo via carda, as fibras fornecidas em fardos são paralelizadas por cilindros recobertos de dentes penteadores que formam os véus, os quais são dobrados formando as mantas. Estas são consolidadas por intensa agulhagem mecânica, calandragem ou resinagem, resultando no produto final (Figura 2.4). No processo via fundida, é destacada a fiação contínua por extrusão onde os filamentos são resfriados, estirados e depositados sobre uma esteira rolante em forma de mantas. Estes são consolidados por intensa agulhagem mecânica, calandragem ou resinagem, resultando no produto final (Vertematti, 2001). Na Figura 2.5 é apresentado o processo de fabricação com filamentos contínuos.

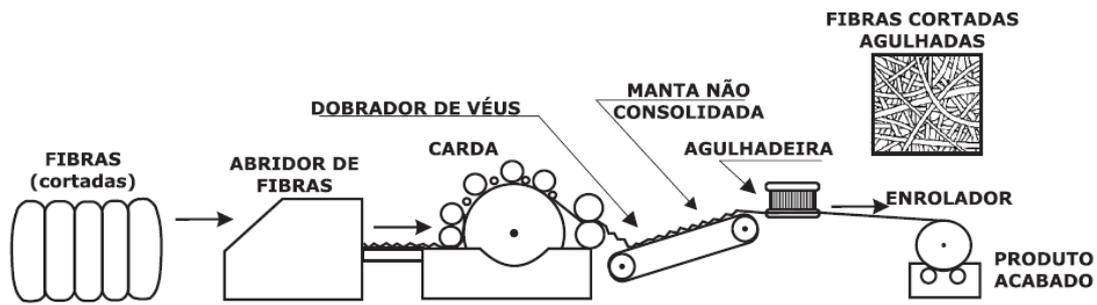


Figura 2.4 Fabricação dos Geotêxteis não tecidos cardados (Vertematti, 2001).

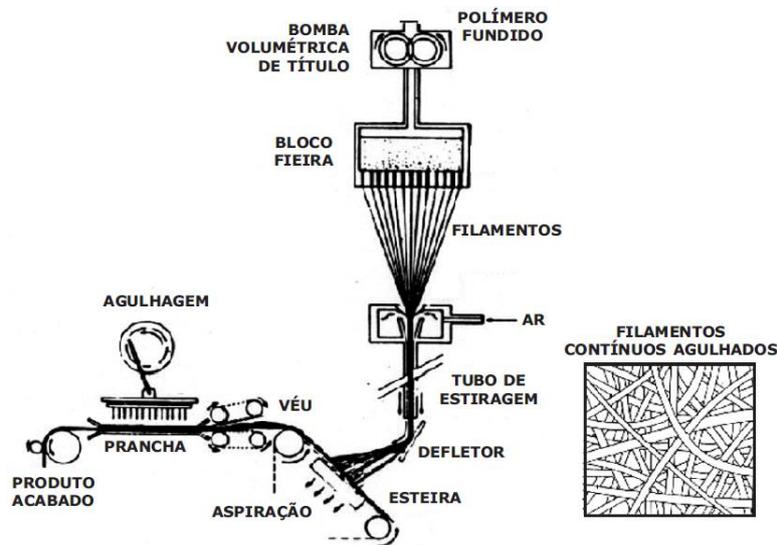


Figura 2.5 Fabricação dos Geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos (Vertematti, 2001).

2.1.1.1. GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO AGULHADO (GTNa):

São formados pelo entrelaçamento das fibras ou filamentos misturados aleatoriamente, formando uma manta, a qual é consolidada passando por uma prancha constituída por uma série de agulhas. Essas agulhas movem-se aleatoriamente, subindo e descendo a altas velocidades penetrando na manta e entrelaçando as fibras; isto é obtido porque as agulhas são dentadas (Figura 2.6), o que faz com que elas penetrem na manta entrelaçando os filamentos. A frequência de penetrações das agulhas vai consolidando a manta de geotêxtil não tecido (Basham et al., 2004; Koerner, 2005; PAVCO, 2012).

Os geotêxteis não-tecidos fabricados por esse processo têm boas características mecânicas, o que proporciona muito boa adaptabilidade às desconformidades do terreno, excelentes propriedades de proteção (efeito colchão) e além disso, muito boas funções de filtração e separação. (PAVCO, 2012).

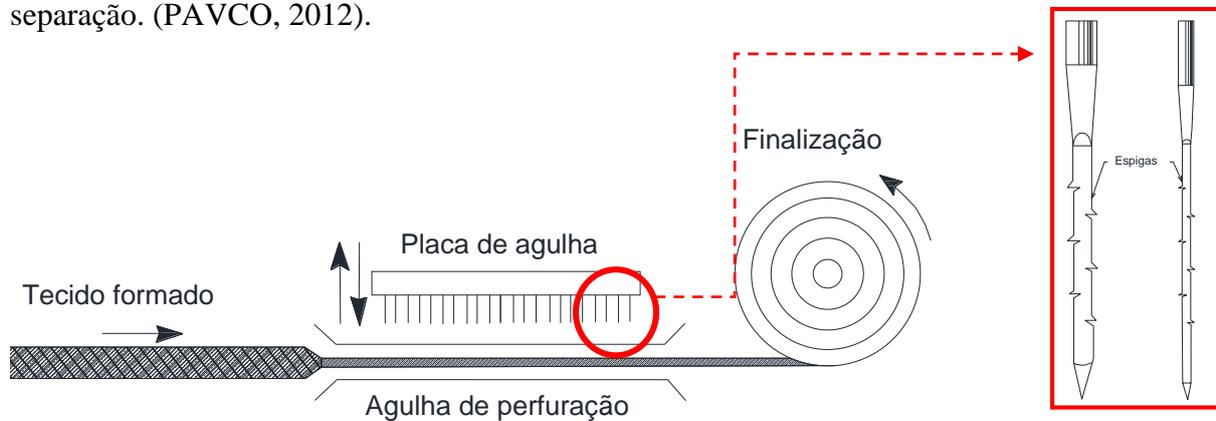


Figura 2.6 Diagrama do processo de agulhagem e agulha utilizada (modificada de Koerner, 2005)

2.1.1.2. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO TERMOLIGADO (GTNt)

São confeccionados por meio da incorporação de fibras do mesmo tipo de polímero, mas com diferentes pontos de fusão na esteira, ou por meio da utilização de heterofilamentos, isto é, fibras compostas por um tipo de polímero no interior e coberta ou revestida com um polímero que tem um ponto de fusão mais baixo (Basham *et al.*, 2004). A ligação acontece pela fusão parcial das fibras por calandras, este processo pode provocar a ligação tanto de alguns pontos, como também de regiões mais extensas da manta (Vertematti, 2001). Sua espessura e alongamento são sensivelmente menores do que os agulhados, por conta disto sua transmissibilidade e permeabilidade são menores, possui boas propriedades mecânicas, porém pouca flexibilidade (PAVCO, 2012).

2.1.1.3. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO RESINADO (GTNr)

Neste caso a ligação entre os filamentos é conseguido pela incorporação de ligantes químicos ou resinas, por exemplo, resina acrílica aplicada por imersão ou pulverização (Vertematti, 2001). Este sistema não é usado para a fabricação de geotêxteis de proteção e de separação, uma vez que, na sua composição devem ser evitados elementos químicos que possam alterar as propriedades químicas e causar incompatibilidade com outros materiais com que podem estar em contato. A sua utilização não é generalizada devido ao custo mais elevado. (PAVCO, 2012)

A seguir, é apresentada a estrutura dos geotêxteis segundo seu processo de fabricação (Figura 2.7, Ferreira 2001), o qual proporciona características e propriedades diferentes do produto final.

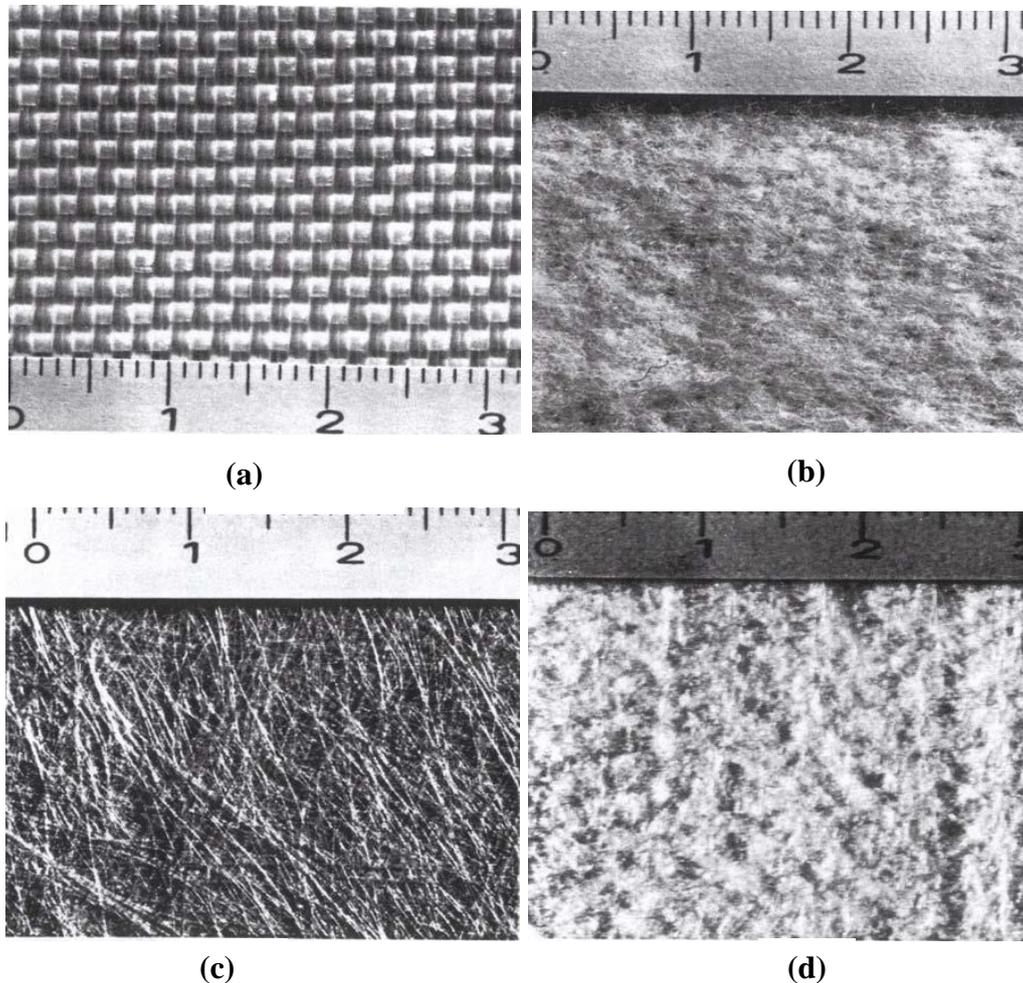


Figura 2.7 Diferentes tipos de geotêxteis:(a) geotêxtil tecido, (b) geotêxtil não tecido ligado mecanicamente (por agulhagem), (c) geotêxtil não tecido ligado termicamente, e (d) geotêxtil não tecido ligado quimicamente (modificado - Ferreira, 2001)

Os geotêxteis não tecidos apresentam uma estrutura muito mais complexa que os tecidos, possuindo a espessura como um parâmetro complementar importante. Eles, quando usados como elementos filtrantes, atuam não como uma simples interface, mas sim como um meio tridimensional, visto que a espessura passa a ser um parâmetro relevante (Muñoz, 2005). A aleatoriedade das fibras, no caso dos geotêxteis não tecidos, é o que faz mais complexa a determinação de algumas propriedades que serão estudadas mais adiante. O método de

fabricação e os tipos de polímeros usados afetam as propriedades dos geotêxteis e precisam ser entendidos antes do projeto ser empreendido (Corbet, 1993). Na Tabela 2.1 são apresentadas as características filtrantes e drenantes dos geotêxteis segundo o método de fabricação e os tipos de fibras usadas.

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

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

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

2.1.2. FUNÇÕES DOS GEOTÊXTEIS

As funções básicas a que se destinam os geotêxteis (Figura 2.8), segundo a *International Association of Geosynthetics* (IGS, 2000), são:

- **Separação do solo:** o geotêxtil atua na separação de duas camadas de solo, que tem distribuições de partículas diferentes.

- **Drenagem:** o geotêxtil age como um dreno que carrega o fluido através de solos com menor permeabilidade.
- **Barreira:** geotêxteis impregnados são empregados como barreiras para impedir o escoamento de líquidos e gases. Além disso, nestas condições podem ser utilizados na capa asfáltica de pavimentos, no envelopamento de solos expansivos e na contenção de resíduos.
- **Filtração:** o geotêxtil permite a livre passagem de água através do solo enquanto retém as partículas sólidas.
- **Reforço:** o geotêxtil 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 maciço.
- **Controle de processos erosivos:** o geotêxtil trabalha para reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e pelo escoamento superficial da água.

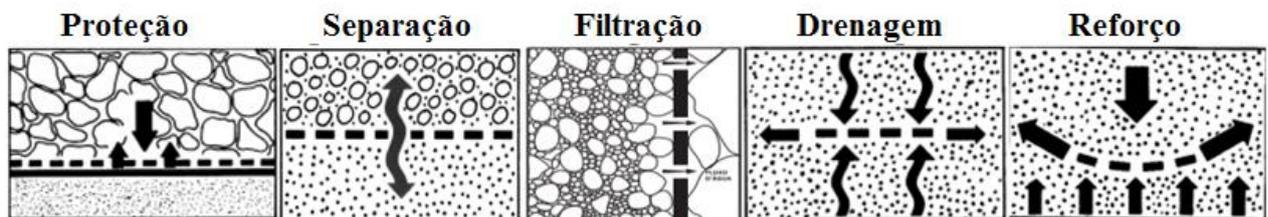


Figura 2.8 Principais funções dos geotêxteis (Vertematti, 2001).

2.2. PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS

A avaliação das propriedades dos geotêxteis é de suma importância em sua utilização, já que com elas é possível determinar a qualidade dos produtos e obter parâmetros para o dimensionamento de determinados projetos. A seguir, são apresentadas as principais propriedades dos geotêxteis utilizadas nas especificações de projetos segundo Bueno & Vilar (2004).

- a. Propriedades físicas: massa por unidade de área, ou gramatura, espessura nominal e porosidade.

- b. Propriedades hidráulicas: Permissividade, transmissividade, abertura de filtração e abertura aparente.
- c. Propriedades mecânicas: compressibilidade, resistência à tração, resistência ao puncionamento, resistência à propagação do rasgo, resistência ao estouro e fluência sob tração.
- d. Propriedades de durabilidade ou desempenho: resistência a tração confinada, fluência confinada, resistência de interface, resistência à abrasão, filtração de longa duração e danos de instalação.

Dentre as propriedades apresentadas acima, as físicas e hidráulicas apresentam maior relevância para o presente estudo, sendo que ele está direcionado para o desempenho dos geotêxteis não tecidos como materiais filtrantes e de drenagem sob diferentes condições de tensão e impregnação.

2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas dos geotêxteis podem também ser consideradas propriedades índices, que servem para a identificação dos produtos; é fundamental a caracterização destes para posterior distinção em função dos seus aspectos físicos e seleção apropriada do geossintético de acordo com a sua função (Messias da Silva, 2014). O comportamento hidráulico dos geotêxteis é influenciado pelas propriedades físicas. Com o intuito de ter uma melhor compreensão dos ensaios executados e dos resultados obtidos nessa pesquisa, a seguir são explicadas as propriedades físicas.

2.2.1.1. MASSA POR UNIDADE DE ÁREA, OU GRAMATURA (M_A)

A gramatura é um dos parâmetros mais utilizados para a identificação dos geotêxteis não tecidos; ela é a relação entre a massa e a área de um corpo de prova de geometria regular. O valor médio de dez determinações, expresso em g/m^2 , representa a gramatura média do geotêxtil (Bueno & Vilar, 2004), sua determinação encontra-se normatizada pela norma brasileira NBR ISO 9864 (ABNT, 2013) e pela norma americana D5261 (ASTM, 2010). Além da identificação do produto, essa propriedade também pode ser utilizada para estimar a abertura de filtração do geotêxtil (Gourc & Faure, 1990). Entretanto, ela não deve ser utilizada isoladamente como propriedade de especificação, pois, dependendo dos processos de fabricação, produtos com a

mesma gramatura podem apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas totalmente diferentes (Bueno & Vilar, 2004).

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 *et al.* (2000) realizaram 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.

2.2.1.2. ESPESSURA NOMINAL (t_{GT})

A espessura nominal de um geotêxtil é expressa em milímetros e é determinada registrando-se a distância interna entre duas placas rígidas que comprimem corpos de prova sob uma tensão vertical de 2 kPa. A área de contato entre as placas, deve ser 2.500 mm². O ensaio está normatizado pela norma NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013) e pela norma americana D5199 (ASTM, 2012). O valor da espessura é requerido para calcular parâmetros hidráulicos como a permissividade e a transmissividade.

O geotêxtil não tecido é um material com compressibilidade elevada devido à sua alta porosidade, e a sua espessura é extremamente dependente da tensão aplicada. Por essa razão, é necessário fazer medições da espessura aplicando diferentes tensões de compressão. A espessura é reduzida quando aplicada a tensão e essa redução é ocasionada predominantemente pela redução dos volumes dos poros do geotêxtil, dependendo da estrutura inicial e das condições de contorno (Shukla & Yin, 2006)

A espessura dos geotêxteis varia tipicamente de 0,2 a 10 mm, dependendo do produto (Messias da Silva, 2014). A Figura 2.9 exemplifica a dependência da espessura dos geotêxteis não tecidos com o nível de tensão. Segundo Bueno & Vilar (2004), os geotêxteis agulhados são os mais compressíveis.

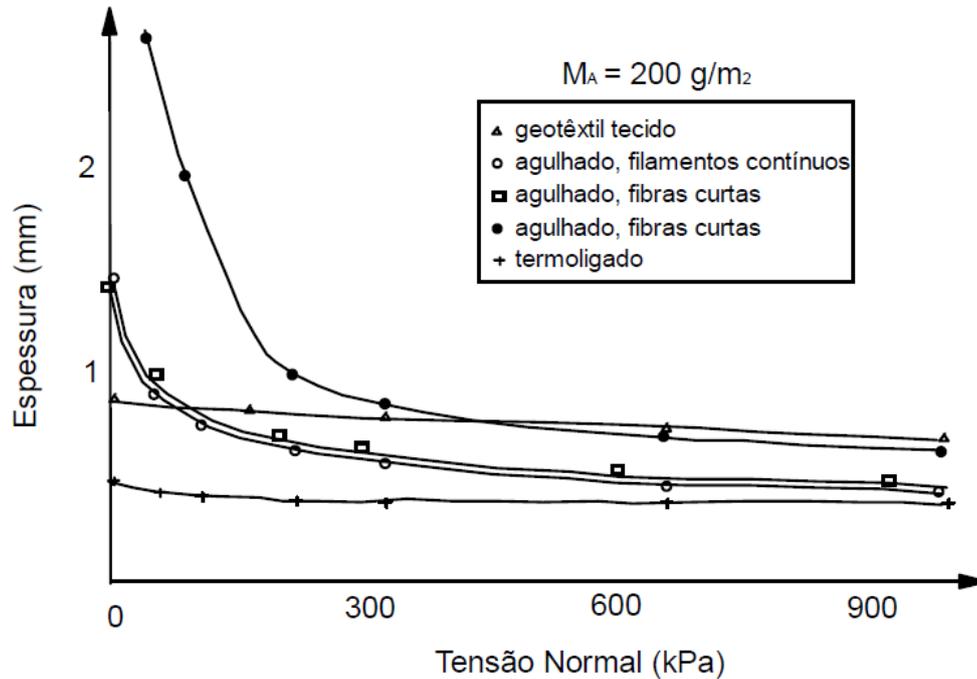


Figura 2.9 Espessura dos geotêxteis com a tensão (modificada – Faure *et al.*, 1990)

A espessura é um parâmetro físico de significativa influência nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos (Duquennoi *et al.*, 2008). Rauman (1982), Koerner *et al.* (1984), Campbell & Wu (1994), Palmeira & Fannin (2002), Palmeira & Gardoni (2002), Messias da Silva (2014), estudaram o comportamento das propriedades hidráulicas quando o geotêxtil não tecido é comprimido sob diferentes magnitudes de tensões.

2.2.1.3. POROSIDADE (η_{GT})

Da mesma forma que para o caso dos solos, a porosidade dos geotêxteis é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra e é geralmente expressa em porcentagem. É uma característica importante dos geotêxteis não tecidos e pode ser obtida por meio da expressão:

$$\eta_{GT} = \left(1 - \frac{M_A}{t_{GT} * \rho_f} \right) \quad (2.1)$$

M_A = gramatura;

ρ_f = massa específica da fibra ou do filamento que constitui o geotêxtil; e

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

Como visto na Equação 2.1(2.1, a porosidade depende das outras propriedades físicas, tais como a gramatura e a espessura do geotêxtil e da mesma maneira que a espessura varia com o nível de tensão, a porosidade também varia. O valor da porosidade do geotêxtil sem confinamento é função do processo de fabricação e do material que o compõe (Giroud, 1996).

2.2.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

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

Para aplicações de filtração, os ensaios mais utilizados são àqueles destinados à determinação do coeficiente de permeabilidade (k), parâmetro que indica a facilidade de percolação do fluido, e à obtenção da abertura de filtração. Nesse último caso, determina-se o diâmetro equivalente da maior partícula que pode atravessar o geotêxtil. Em vez de se considerar o coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil (k_n), muitas vezes prefere-se trabalhar com a permissividade, que representa a relação entre k_n e a espessura do geotêxtil (Costa *et al.*, 2008). Para aplicações de drenagem são utilizados ensaios que permitem a determinação do coeficiente de permeabilidade no plano (k_p) e da capacidade de fluxo no plano do geotêxtil (vazão no plano por unidade de largura).

Existem modelos teóricos para calcular o coeficiente de permeabilidade vertical dos geotêxteis não tecidos. Giroud (1996), propôs as seguintes expressões baseadas no método de Kozeny-Carman e na hipótese de fluxo laminar em tubos capilares, respetivamente:

$$k = \frac{\beta \rho_w g}{16 \eta_w} \frac{n_{GT}^3}{(1 - n_{GT})^2} d_f^2 \quad (2.2)$$

$$k = \frac{\rho_w g n_{GT} O_f^2}{32 \eta_w} \quad (2.3)$$

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade;

ρ_w = massa específica do fluido;

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

n_{GT} = porosidade do geotêxtil;

η_w = viscosidade dinâmica do fluido;

β = fator de forma;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

O_f = abertura de filtração do geotêxtil.

O fator adimensional β é função da tortuosidade do caminho no meio. Giroud (1996) sugere um valor médio de $\beta=0,11$ para geotêxteis não tecidos.

As Equações 2.2 e 2.3 se tornaram ferramentas bastante úteis para a previsão de permeabilidade de geotêxteis sob pressão. Gardoni & Palmeira (1999) e Palmeira & Gardoni (2000a) aferiram soluções teóricas apresentadas por Giroud (1996) com os resultados de ensaios de laboratório para mantas virgens não tecidas e obtiveram boa concordância entre resultados.

A impregnação do geotêxtil pela presença de partículas reduz a compressibilidade e a porosidade do material. Giroud (1994) apresentou um estudo das características hidráulicas do geotêxtil, levando em conta a presença de partículas de solo aprisionadas nos seus poros. Usando a equação de Kozeny-Carman para permeabilidade em meios porosos, Giroud (1994) derivou uma expressão para a permeabilidade de geotêxteis parcialmente colmatados, assumindo que as partículas de solo são uniformemente dispersas nos poros do geotêxtil. Essa expressão foi modificada e reescrita por Palmeira & Gardoni (2000^a) como:

$$k^* = \frac{\beta \rho_w g}{\eta_w} \frac{\left[n_{GT} - \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} (1 - n_{GT}) \right]^3}{\left(\frac{4}{d_f} + \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{6}{d_s} \right)^2 (1 - n_{GT})^2} \quad (2.4)$$

Com:

$$\lambda = \frac{M_s}{M_f} \quad (2.5)$$

$$\frac{d_s}{d_f} = \sqrt{\frac{\pi}{1 - n_{GT}}} - 1 \quad (2.6)$$

Onde:

k^* = Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado;

d_s = diâmetro das partículas de solo (assumidas esféricas) dentro do geotêxtil;

ρ_f = densidade das fibras do geotêxtil;

ρ_s = densidade das partículas de solo;

M_f = massa das fibras do geotêxtil;

M_s = massa das partículas de solo no geotêxtil;

λ = nível de impregnação do geotêxtil;

n_{GT} = porosidade do geotêxtil sem considerar a presença das partículas.

Liu *et al.* (2008) também apresenta uma outra metodologia para o cálculo da permeabilidade, na qual é preciso assumir: fibras cilíndricas com mesmo diâmetro e densidade, todas as fibras são distribuídas aleatoriamente no plano do geotêxtil e ele é homogêneo; a distância entre as fibras e o seu comprimento são muito maiores do que seu diâmetro, isto é, geotêxtil tem alta porosidade; o líquido é movimentado só na direção vertical; as forças inerciais do fluido são insignificantes (baixo número de Reynolds). Levando em conta estas hipóteses, eles encontraram que o coeficiente de permeabilidade para geotêxteis não tecidos pode ser calculado por meio de:

$$K = \frac{\sqrt{2} \rho_w g}{32 \mu_w} * \frac{\rho_f d_f^2 t_{GT}}{M_a} \quad (2.7)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade vertical (m/s);

ρ_w = massa específica do fluido (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

μ_w = viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);

ρ_f = massa específica das fibras (kg/m^2);

d_f = diâmetro das fibras (m);

t_{GT} = espessura do geotêxtil (m);

M_a = gramatura do geotêxtil (kg/m^2).

A partir dessa metodologia é possível observar que o coeficiente de permeabilidade vertical está diretamente relacionado com a gramatura e a espessura do geotêxtil, assim como o diâmetro e a densidade das fibras. O desenvolvimento completo da Equação 2.7 pode ser visto em Liu *et al.* (2008).

2.2.2.1. PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO E PERMISSIVIDADE

A permissividade descreve a capacidade que tem um fluido de passar através do plano do material e é útil para quantificar o fluxo normal ao geotêxtil. A sua determinação está normatizada pela norma brasileira NBR ISO 11058 (ABNT, 2013) e pela norma americana ASTM D5493 (2011). O ensaio consiste em fazer passar a água de maneira perpendicular através de um geotêxtil como pode ser visto na Figura 2.10. A permissividade (Ψ) é obtida em função do coeficiente de permeabilidade normal k_n (m/s) e da espessura do geossintético (t_{GT}) como:

$$\Psi = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (2.8)$$

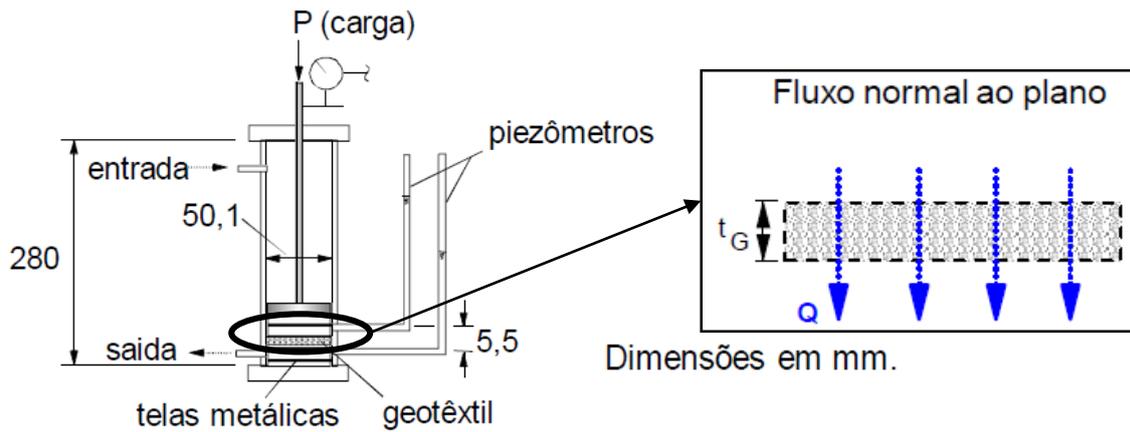


Figura 2.10 Esquema ensaio de permissividade (modificado - Palmeira, 2003).

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.

A permissividade é uma propriedade cujo valor vai depender das características tanto do geotêxtil, como das condições de campo. Lafleur & Rollin (1983) analisaram o comportamento dessa propriedade variando a gramatura, tamanho de fibras (curtas ou contínuas) e tipo de material (poliéster ou polipropileno) do geotêxtil não tecido agulhado e os resultados obtidos são apresentados (Figura 2.11).

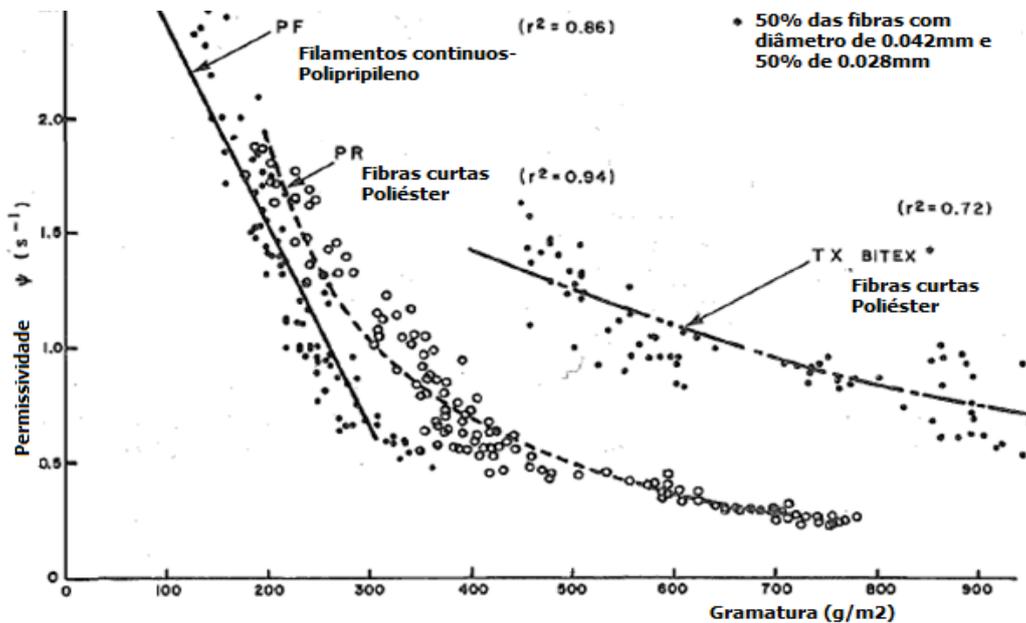


Figura 2.11 Resultados Experimentais- Ensaio de permeabilidade em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado - Lafleur & Rollin, 1983).

É notória a variabilidade da permissividade com as outras características do material. Para um dado geotêxtil, é possível assumir que parâmetros como a gramatura podem ser usados para estimar características de filtração (Lafleur & Rollin, 1983).

2.2.2.2. PERMEABILIDADE TRANSVERSAL E TRANSMISSIVIDADE

Quando há interesse na consideração de drenagem através do geotêxtil é necessário conhecer a sua **transmissividade**, a qual descreve a capacidade de escoamento de fluido ao longo do plano do material. A determinação dessa propriedade é normatizada pela norma NBR ISO 12958 (ABNT, 2013) e pela norma americana ASTM D4716 (2014). O ensaio está esquematizado na Figura 2.12. A transmissividade de um geotêxtil é definida por:

$$\theta = k_n t_{GT} \quad (2.9)$$

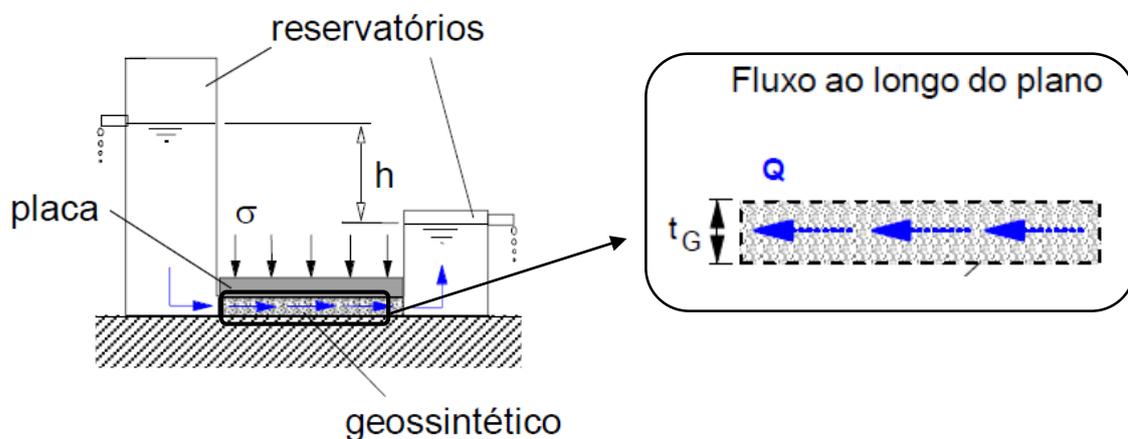


Figura 2.12 Esquema ensaio de transmissividade (modificado - Palmeira & Gardoni, 2002)

Gardoni & Palmeira (1998) e Gardoni & Palmeira (1999) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade 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.

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.

2.2.2.3. ABERTURA DE FILTRAÇÃO

Os poros no geotêxtil não tecido são de tamanhos variados. A distribuição de tamanhos dos poros pode ser representada da mesma forma como a distribuição dos tamanhos das partículas no solo. De fato, o geotêxtil é similar ao solo em que tem vazios (poros) e partículas (filamentos e fibras). No entanto, devido à forma, o arranjo dos filamentos e à compressibilidade da estrutura dos geotêxteis, as relações geométricas entre filamentos e vazios são mais complexas do que nos solos (Shukla & Yin, 2006). O valor da **abertura de filtração** (O_f) do geotêxtil é usualmente assumido como o valor do maior grão que passou pelo geotêxtil em ensaios de abertura de filtração (Holtz *et al.*, 1998; Messias da Silva, 2014) e está associada às dimensões dos poros e constrições no geotêxtil (IGS, 2000). Segundo Shukla & Yin (2006), o termo original era *equivalent opening size (EOS)*, que nos Estados Unidos é chamado de *apparent opening size (AOS)*, enquanto que nos países da Europa e no Canadá o termo usado é *filtration opening size (FOS)*. Ele é tomado como O_{98} ou O_{95} em diferentes partes do mundo e dependendo do processo para sua obtenção (Palmeira *et al.*, 1996).

Um valor comumente utilizado para a abertura de filtração é o O_{95} , que é o diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passando.

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

propriedade está diretamente relacionada com outras características físicas e hidráulicas dos geotêxteis. Rigo *et al.* (1990) apresentaram equações que mostram a influência de fatores tais como o processo de fabricação, a gramatura, espessura, porosidade e densidade do material, baseados nos resultados de ensaios de laboratório feitos por seis entidades diferentes.

Existem soluções teóricas disponíveis para determinar a distribuição dos tamanhos de poros (Lombard, 1985; Faure, 1988 e Vermeersch *et al.*, 1997) baseados nos parâmetros dos geotêxteis. Faure *et al.* (1989), 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. Palmeira *et al.* (1996) fizeram comparações entre predições baseadas nesse estudo-estatístico e os valores obtidos em ensaios sob diferentes níveis de tensão vertical e obtiveram boa concordância.

Para determinação de O_f , Giroud (1996) propôs a seguinte equação semi-empírica:

$$\frac{O_f}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1 - n_{GT}}} - 1 + \frac{\xi n_{GT}}{(1 - n_{GT})t_{GT}/d_f} \quad (2.10)$$

Esta equação é equivalente a:

$$\frac{O_f}{d_f} = \left[\frac{t_{GT}/d_f}{M_A/(\rho_f d_f)} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 + \frac{\xi \left[1 - \frac{M_A/(\rho_f d_f)}{t_{GT}/d_f} \right]}{M_A/(\rho_f d_f)} \quad (2.11)$$

Onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

M_A = gramatura do geotêxtil;

ξ = parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio. Giroud (1996) sugeriu um valor de 10 para geotêxteis não tecidos; Palmeira & Gardoni (2002) encontraram que para geotêxteis de poliéster o valor que apresentou melhor ajuste com os resultados de ensaios de laboratório foi $\xi=15$.

As Equações 2.10 e 2.11 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. Na Figura 2.13 é possível ver como a abertura de filtração é afetada pela tensão de compressão e pela impregnação. Esse fenômeno pode se apresentar devido ao espalhamento do material e a compactação das camadas do solo sobre o filtro geotêxtil, além do regime de fluxo que pode carrear partículas em suspensão para o filtro (Palmeira & Fanin, 2002).

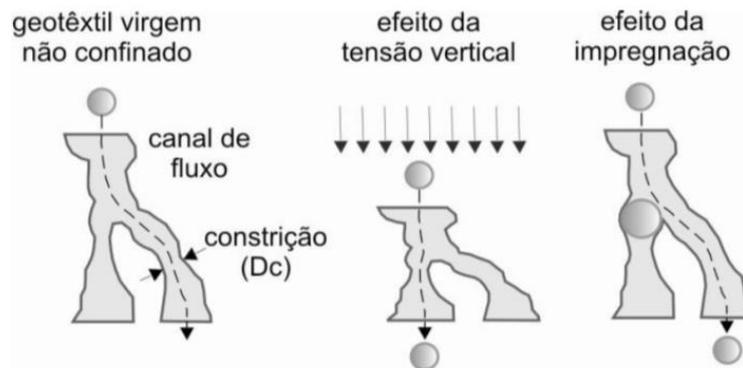


Figura 2.13 Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2003).

Devido à importância da distribuição dos tamanhos de poros para o dimensionamento de filtros, vários métodos têm sido desenvolvidos para a medição da abertura de filtração dos geotêxteis:

Métodos diretos como a técnica de peneiramento, que pode ser dividida em três tipos: o **peneiramento seco**, no qual microesferas de vidro esféricas, e de tamanhos conhecidos, ou partículas de areia de quartzo calibradas são peneiradas em condição seca através de uma tela feita do espécime de geotêxtil, numa armação de peneira, por um período de tempo constante, geralmente 10 min. Deve ser usado um peneirador mecânico, com movimentos verticais e laterais, causando às partículas diferentes orientações com respeito à superfície da manta (Shukla & Yin, 2006). Sobre o peneiramento seco recaem questionamentos como o efeito da eletricidade estática e número de ensaios, que influenciam a qualidade dos resultados (Hernandez, 2012). O **peneiramento úmido** consiste no peneiramento por vibração enquanto a água é jogada sobre as esferas ou partículas de areia. Já no **peneiramento hidrodinâmico** 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 e emersão repetidas e um tanque.

Também existem métodos indiretos, que requerem cálculos para derivar os tamanhos de abertura de filtração a partir das medidas efetuadas, como os métodos da capilaridade e da análise de imagens. O método da **análise de imagens** foi desenvolvido por Rollin *et al.* (1977) e nele o espaço dos poros do geotêxtil é preenchido por uma resina transparente e se emprega um analisador de imagens que permite a visualização dos poros e a obtenção de medidas em seções transversais do geotêxtil. A **intrusão de mercúrio** fornece a distribuição de poros baseado no volume total de poros, mas não dá nenhuma informação sobre o número de poros ou tamanho de constrições do geotêxtil (Bhatia *et al.*, 1996). O método de **Bubble point Test (BBP)** é baseado no princípio do fluxo capilar, no qual o material poroso somente permitirá a passagem do líquido quando a tensão aplicada exceder a atração capilar do líquido no maior poro e fornece informação da distribuição completa dos tamanhos das aberturas, o qual permite obter melhores critérios para projeto dos filtros (Elton & Hayes, 2007). Bhatia *et al.* (1996) apresentam comparações de aberturas de filtração obtidas por diferentes metodologias para um geotêxtil de polipropileno, não tecido, agulhado e de filamentos contínuos (Figura 2.15).

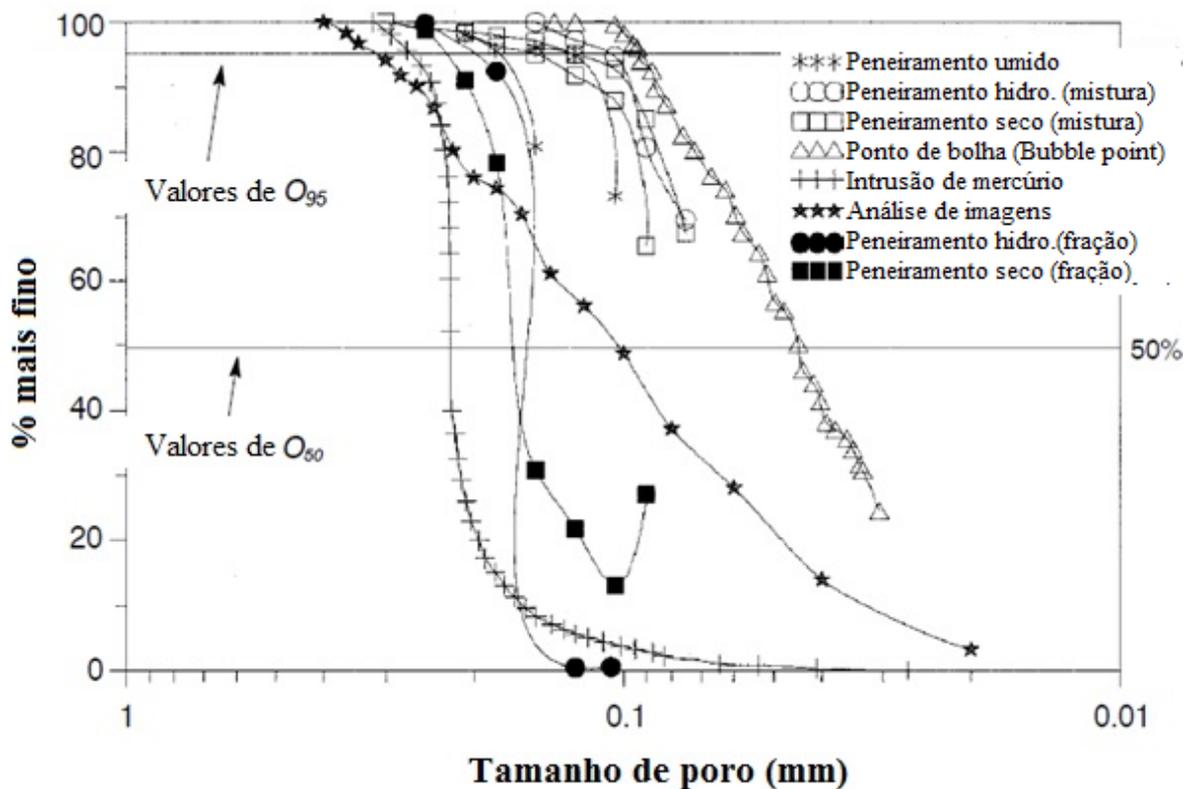


Figura 2.14 Resultados de diferentes métodos de avaliação da abertura de filtração de geotêxteis (Bhatia *et al.*, 1996).

2.3. MÉTODO BUBBLE POINT TEST

O Teste do Ponto de Bolha, ou *Bubble Point Test* (BBP), permite caracterizar os tamanhos dos poros do geotêxtil completamente e com maior acurácia que os outros métodos disponíveis. Além disso, é possível avaliar a abertura de filtração do geotêxtil sob condições mais parecidas às quais ele estará submetido no campo, como confinamento e colmatação de diferentes naturezas. Palmeira & Gardoni (2000a) mostraram que é possível obter medidas acuradas de tamanho de aberturas de filtração, mesmo sob tensão de compressão, com essa metodologia. Com o objetivo de examinar a consistência do BBP, Elton *et al.* (2006), fizeram ensaios em três diferentes geotêxteis, usando três espécimes para cada. Os resultados obtidos mostraram excelente repetitividade.

O ensaio de BBP está padronizado pela norma americana ASTM D6767 (2014). Durante a execução do ensaio os poros do espécime são preenchidos com um líquido que é depois expelido por injeção de gás. O BBP é baseado no princípio de que o líquido de saturação é mantido nos canais dos poros contínuos do geotêxtil por atração capilar e tensão superficial e a pressão mínima necessária para forçar o líquido a passar por tais poros é função do diâmetro deles. Os poros vão sendo atravessados pelo líquido com o incremento da pressão de gás. O líquido é gradualmente empurrado para fora até que a interface gás-líquido atinja a constrição. Uma vez que a pressão de gás é suficientemente alta para superar a força de capilaridade do líquido na constrição, o fluido passa pela constrição (Figura 2.15). As constrições menores mostrarão comportamento similar sob pressões mais elevadas, pois a força devido à tensão capilar é inversamente proporcional ao quadrado do raio da abertura. A tensão necessária para a primeira bolha de ar atravessar o geotêxtil é conhecida como ponto de bolha e define o maior diâmetro de constrição do geotêxtil.

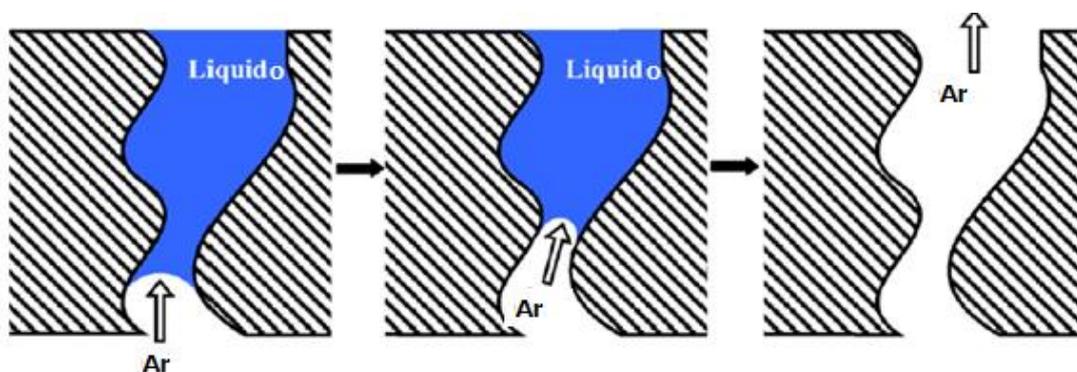


Figura 2.15 *Bubble point test* convencional (Elton & Hayes, 2007)

O método completo é baseado em dois ensaios, um teste úmido e um teste seco. No teste úmido o material poroso é saturado com líquido que seja facilmente absorvido por todos os poros do geotêxtil. A tensão de ar é então gradualmente aplicada de um lado do geotêxtil para ambos casos. Como o fluxo de ar é aumentado, o fluido sai dos poros de acordo com a equação de Washburn, que é derivada da aplicação de uma condição de equilíbrio com o fluido dentro de um tubo capilar. A equação de Washburn é apresentada na norma D6767 (ASTM, 2014) como:

$$d = \frac{4TB\cos\theta}{P} \quad (2.12)$$

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

$$d = \frac{2860T}{P} \quad (2.13)$$

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).

B = constante de capilaridade;

Θ = ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil, assumido zero, para líquidos com baixa tensão superficial;

Comparando a Equação 2.12 com a Equação 2.13, tem-se $4B = 2860$, logo $B = 715$. Convertendo as unidades da Equação 2.13 para o Sistema Internacional, tem-se que $B = 0.715$, valor que será usado na Equação 2.12 para o cálculo do diâmetro equivalente em cada nível de pressão.

É importante garantir que o ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil seja realmente próximo a zero, já que um erro na estimativa desse valor pode levar a aberturas de filtração muito distantes dos reais. Elton & Hayes, (2007) apresentam o efeito desse valor na distribuição dos tamanhos de poros (Figura 2.16). A água como líquido de saturação não apresenta ângulo de contato próximo de zero, para o qual estes autores acharam um valor de $67,53^\circ$. Os líquidos

mais indicados para fluidos de saturação são os de mais baixa tensão superficial, como o etanol, por exemplo (Messias da Silva, 2014).

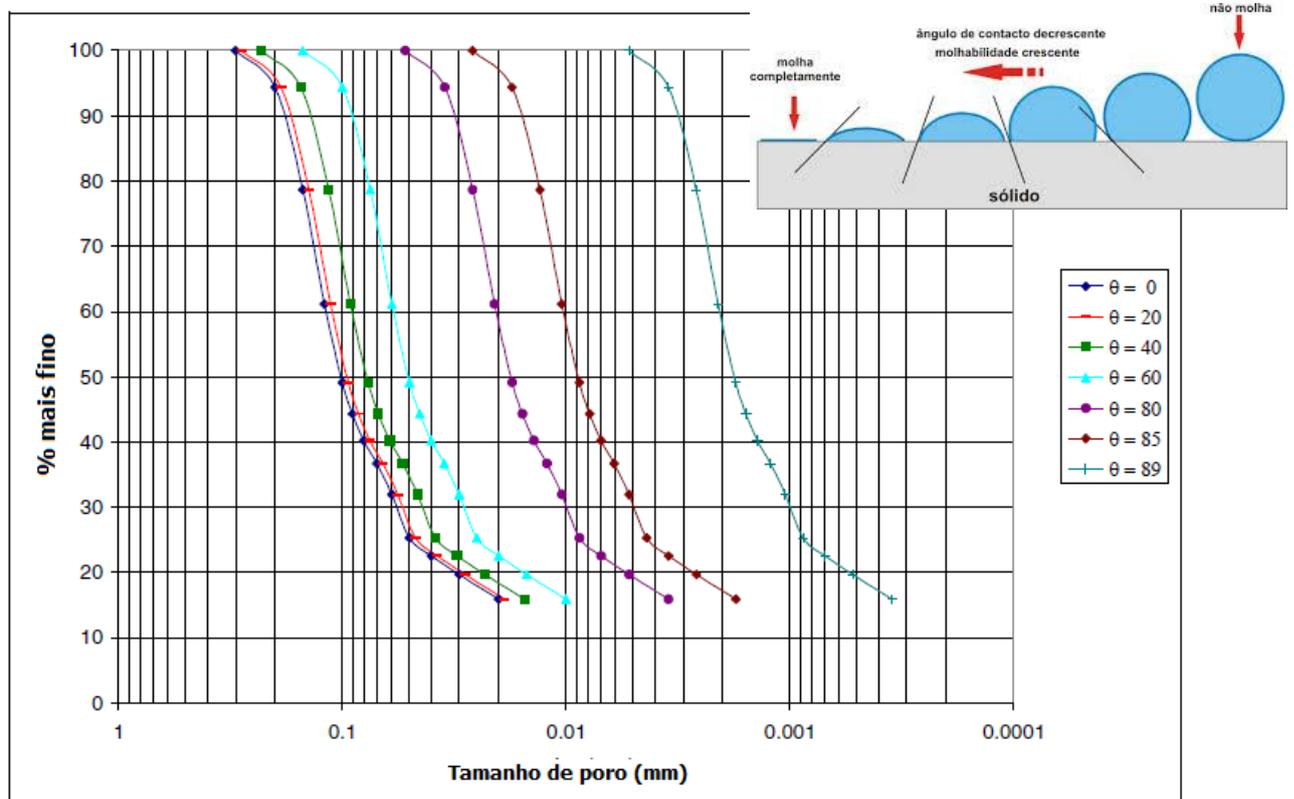


Figura 2.16 Efeito do ângulo de contato na distribuição dos tamanhos de poros num geotêxtil (modificado - Elton & Hayes, 2007).

Para uma dada diferença de pressão, ΔP , o fluido sai dos poros maiores do que d . Por isso, d é conhecido como “diâmetro de poro crítico”. Como a taxa de fluxo de ar incrementa gradualmente, a diferença de pressão através do geotêxtil aumenta, expulsando o líquido em primeiro lugar dos poros maiores, seguidos pelos poros menores. A fase de expulsar o fluido a partir de uma amostra inicialmente saturada é conhecida como “*wet run*” e para o caso seco como “*dry run*”. 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. A Figura 2.17 apresenta um exemplo das curvas úmida e seca em um ensaio de Ponto de Bolha.

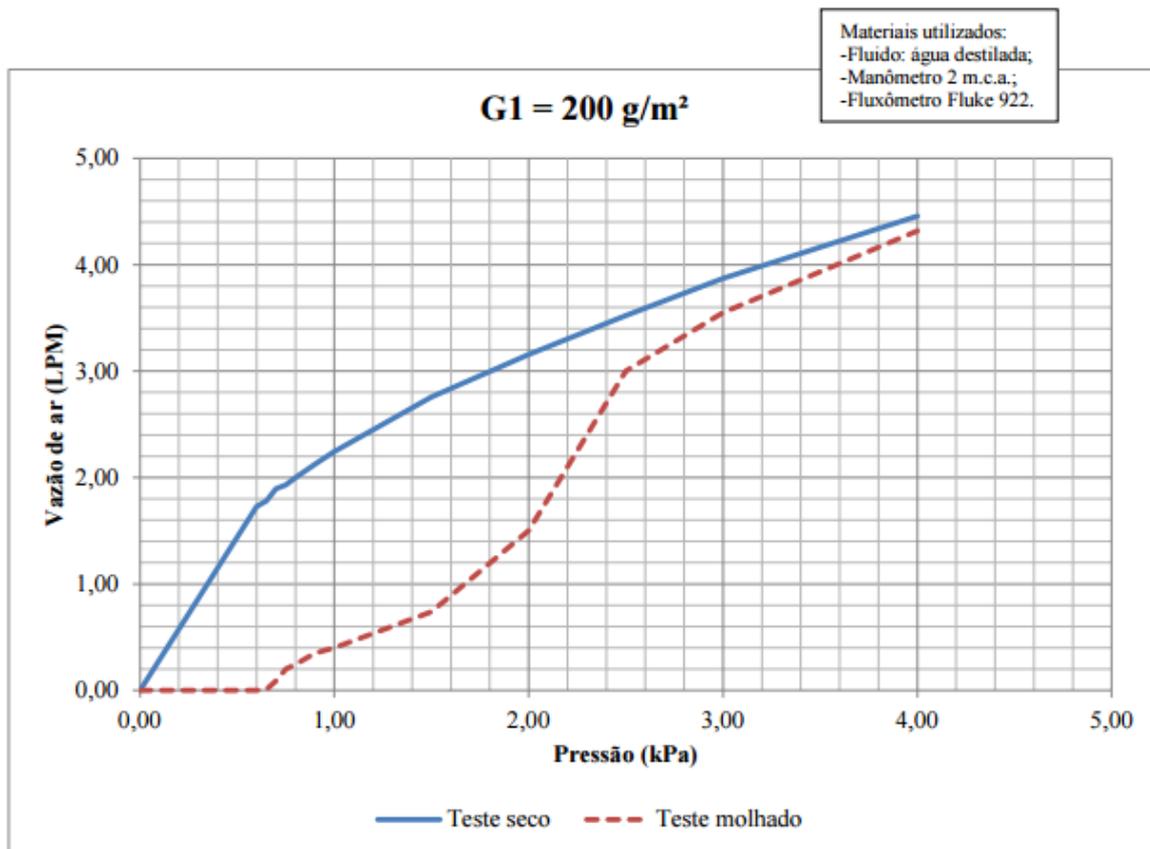


Figura 2.17 Curvas obtidas em ensaios de ponto de bolha (Messias da Silva, 2014)

As medidas obtidas pelo gráfico de pressão versus fluxo de ar, obtidas após o ensaio de ponto de bolha, são utilizadas para traçar a curva de distribuição de tamanho de poros da amostra. 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 é utilizada a expressão:

$$\%Menor\ que\ D = \left(1 - \frac{Q_{wet}}{Q_{dry}}\right) \times 100 \quad (2.14)$$

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 2.18 ilustra um exemplo de curva de distribuição de poros obtida após aplicação das Equações 2.12 e 2.14 para cada valor de pressão, a partir dos ensaios realizados por Messias da

Silva (2014) para diferentes geotêxteis não tecidos de polipropileno e poliéster sob confinamento.

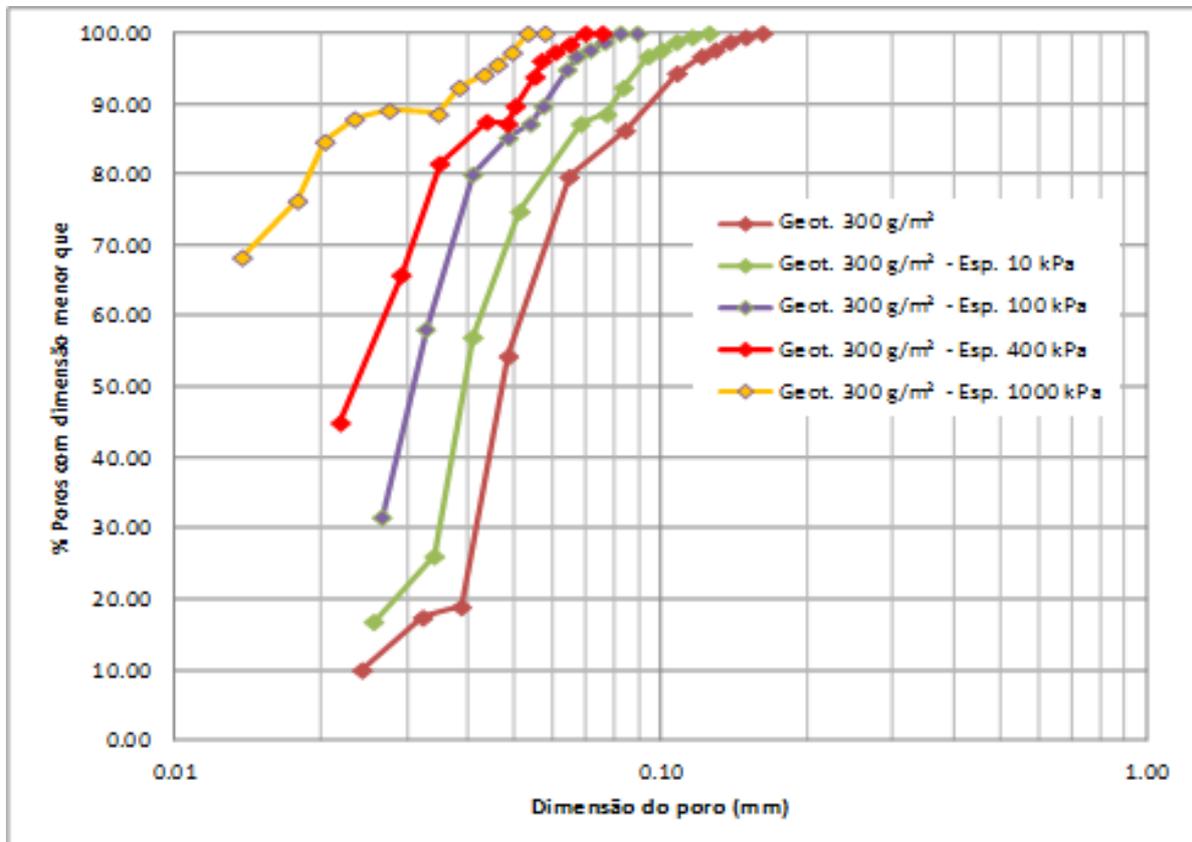


Figura 2.18 Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha (Messias da Silva, 2014).

O equipamento para o ensaio de ponto de bolha ou BBP, está composto principalmente por fonte de ar comprimido (fonte de pressão), o manômetro, que mede a pressão aplicada e deve cobrir os níveis de pressão necessários para os tamanhos de poro analisados; célula para acomodação da amostra e o fluxômetro que mede a quantidade de ar que passa pela amostra em cada incremento de pressão. Na Figura 2.19 se apresenta o esquema do equipamento segundo a norma D6767 (ASTM, 2014).

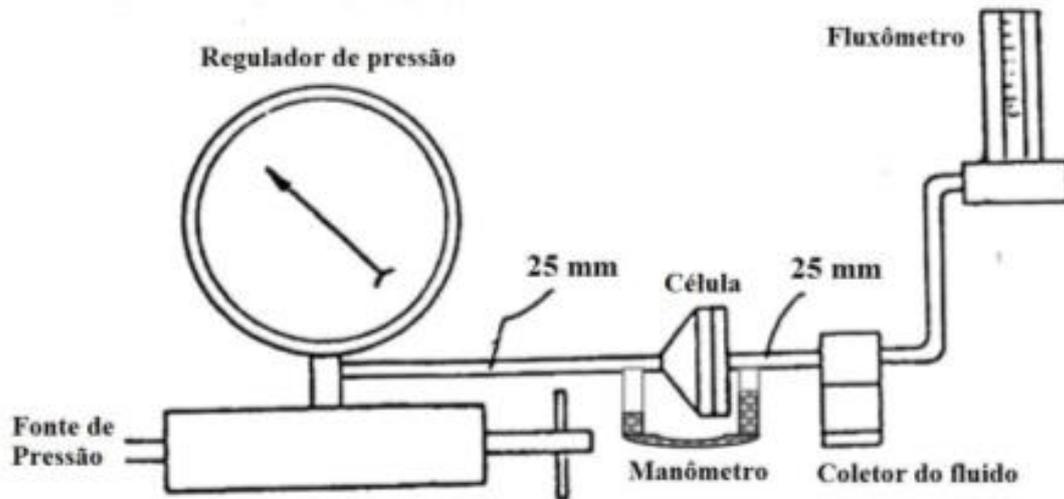


Figura 2.19 Esquema do equipamento para ensaio do Ponto de Bolha. Reproduzido de ASTM (2014).

O método do ponto de bolha é baseado no princípio do fluxo capilar, que estabelece que um material poroso apenas permitirá a passagem de um líquido quando a pressão aplicada exceder a atração capilar exercida pelo poro sobre o líquido. Esse fenômeno ocorre exatamente na célula do equipamento do Ponto de Bolha, representada detalhadamente na Figura 2.20.

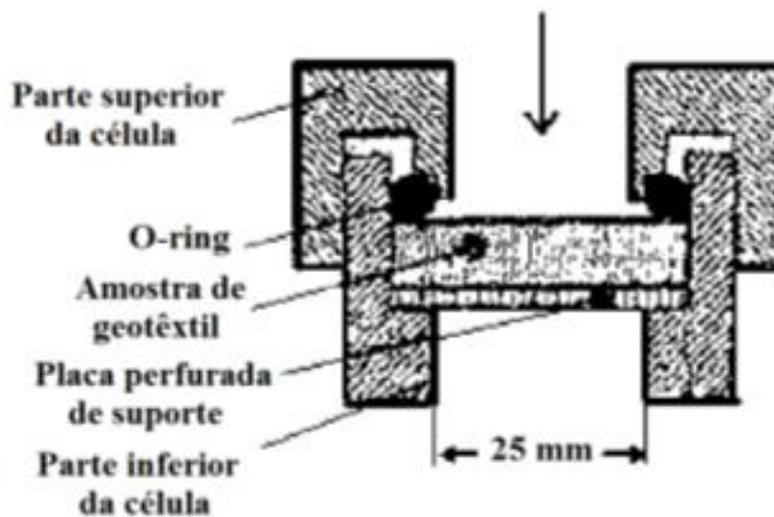


Figura 2.20 Esquema da célula para ensaio do Ponto de Bolha. Reproduzido de ASTM (2014).

2.4. APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

Dentre as várias funções desempenhadas pelos geotêxteis, duas estão associadas ao começo do seu desenvolvimento: a filtração e a drenagem. Na atualidade, os geotêxteis em filtração e drenagem têm a vantagem de menor custo em relação ao uso de materiais convencionais como os filtros granulares, por exemplo, principalmente devido à sua facilidade e praticidade na instalação, além de ser um material sintético, pelo qual é possível ter um melhor controle de qualidade (Rankilor, 1985; Sato & Futaki, 1986; Murty *et al.*, 1994, Palmeira *et al.*, 2010).

Os **drenos** são dispositivos usados para aliviar a pressão hidrostática em diferentes projetos de engenharia com o fim de manter os esforços efetivos no solo e, portanto, evitar perda da sua resistência. Um dreno funcionando corretamente deve reter o solo adjacente enquanto prontamente captura a água do solo e remove-a da área (Basham *et al.*, 2004). Entre os geossintéticos que normalmente são usados em drenagem estão os geotêxteis, georredes, geocompostos para drenagem, geoespaçadores, geotubos e geodrenos (Palmeira, 2003).

A efetividade da drenagem de um solo depende da capacidade de drenagem do geotêxtil usado e do gradiente de pressões ao longo do caminho de evacuação do fluido. Para realizar a drenagem satisfatoriamente a espessura deve ser suficiente ao aumentar a tensão normal ao plano de condução. Além disso, o geotêxtil deve impedir a passagem de finos, os quais podem reduzir a sua permeabilidade. O geotêxtil deve garantir o transporte da água no seu plano sem causar grandes perdas de pressão (PAVCO, 2012). A propriedade essencial que retrata a função de drenagem é a transmissividade.

Os **filtros** são destinados à retenção das partículas do solo por ação de obstrução, na qual o corpo sólido é retido e a fase líquida flui através do filtro. Portanto, os sistemas filtrantes devem ser concebidos para obedecer a dois critérios contraditórios: o de retenção e o de permeabilidade. Pelo critério de retenção, o filtro deve ter uma estrutura o suficientemente fechada para bloquear a passagem das partículas do solo sob ação de um fluxo de água, ou de compressões estáticas ou dinâmicas; já segundo o critério de permeabilidade, o filtro deve ter uma estrutura suficientemente aberta para permitir o livre escoamento dos fluidos sem elevações significativas na perda de carga (Aguiar & Vertematti, 2004; Hernandez, 2012). Adicionalmente, deve haver uma compatibilidade entre o solo e o geotêxtil de forma que ele não seja colmatado ao longo do tempo, com redução indesejável da permeabilidade (Hernandez, 2012).

Entre os tipos de mecanismos fundamentais de filtração definidos em Hutten (2007), têm-se:

- *De superfície (straining)*: a partícula é maior do que os poros e simplesmente não pode passar através do filtro. Partículas, menores do que os diâmetros dos poros passam. Isto se apresenta em materiais onde os diâmetros das aberturas são uniformes, como os geotêxteis tecidos.
- *De profundidade (Filtration)*: Trata-se de mecanismos para a remoção de partículas de um fluido, mesmo que o diâmetro das partículas seja menor do que o diâmetro da estrutura porosa em qualquer ponto.
- *De superfície ou cake (Filtration)*: envolve a captura de partículas na superfície, ou perto dela, de modo que as partículas se dispõem em uma camada, que participa no processo de filtração gerando uma superfície modificada.

Algumas das aplicações dos geotêxteis em obras geotécnicas relacionadas à drenagem e filtração são (Vertematti, 2001):

- ✓ Diques contínuos de contenção;
- ✓ Paliçadas de contenção;
- ✓ Drenos de pavimentos;
- ✓ Canais revestidos com gabiões ou concreto;
- ✓ Barragens de terra: proteção do talude de montante, dreno vertical ou chaminé, dreno ou tapete horizontal e dreno de pé de talude;
- ✓ Subsolos de edificações;
- ✓ Muros de contenção em gabiões;
- ✓ Enrocamento de contenção;
- ✓ Muros de arrimo de gravidade;
- ✓ Drenos verticais em solos compressíveis.

Exemplos do uso de geotêxteis em obras de drenagem e filtração podem ser vistos na Figura 2.21.

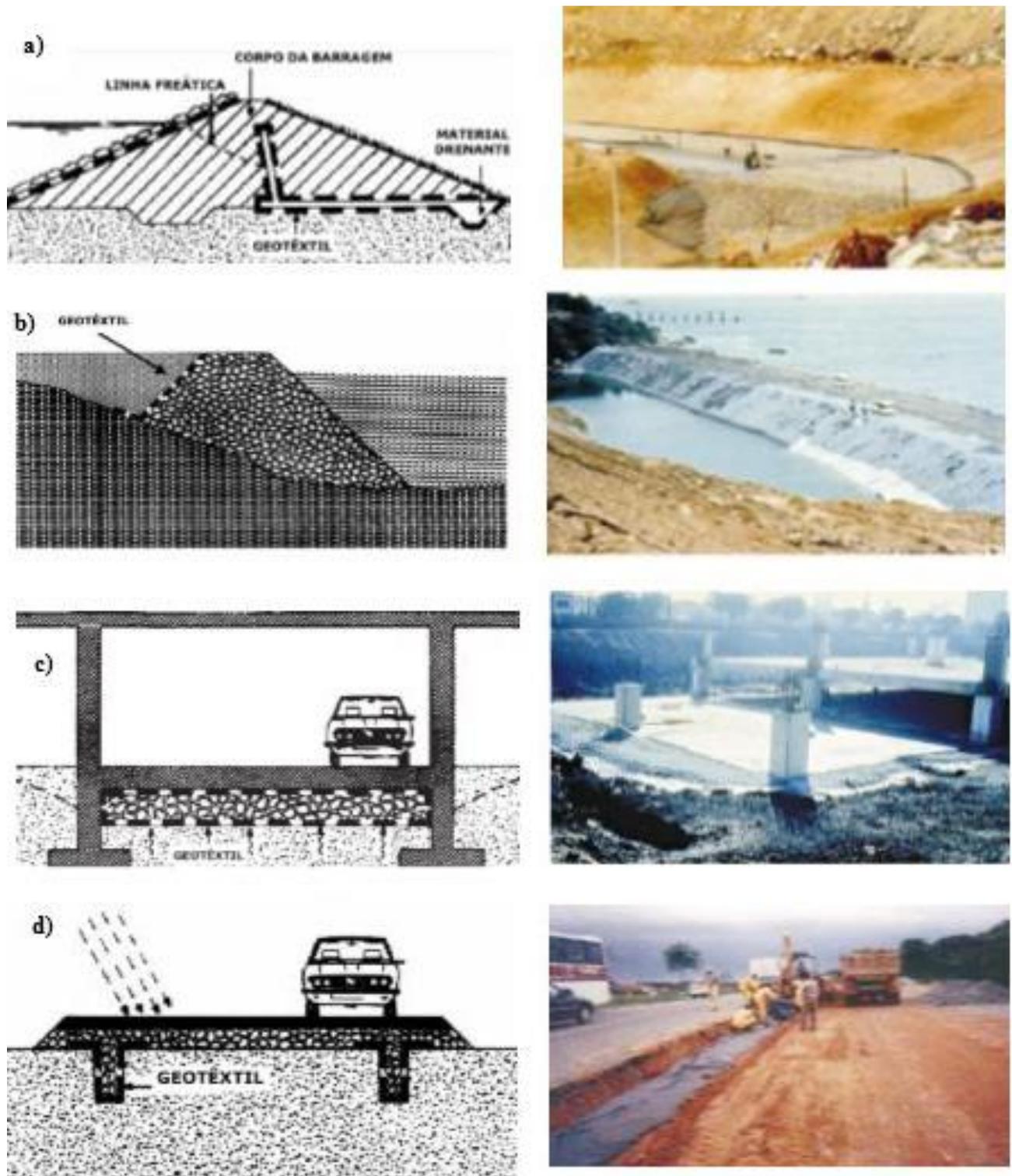


Figura 2.21 Aplicações de geotêxteis em sistemas dreno-filtrantes (a) barragem de terra, (b) enrocamento de contenção, (c) colchão drenante (d) pavimentos e aterros (Vertematti, 2001).

São inúmeros os casos de utilização de geotêxteis em obras de grande porte na engenharia civil. Alguns dos casos de maior relevância foram apresentados por Gardoni (2000). A seguir são apresentados dados de um caso-histórico clássico.

2.4.1. 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 4 m e no filtro situado à jusante, em uma região ao nível d'água do reservatório e, por isso, constantemente sujeita a ondas. Foram retiradas três amostras em diferentes alturas do recobrimento de geotêxtil. Amostras de solo foram coletadas nos mesmos locais das amostras de geotêxtil, bem como blocos de solo e geotêxtil. A Figura 2.22 mostra um desenho esquemático da amostragem feita na barragem.

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

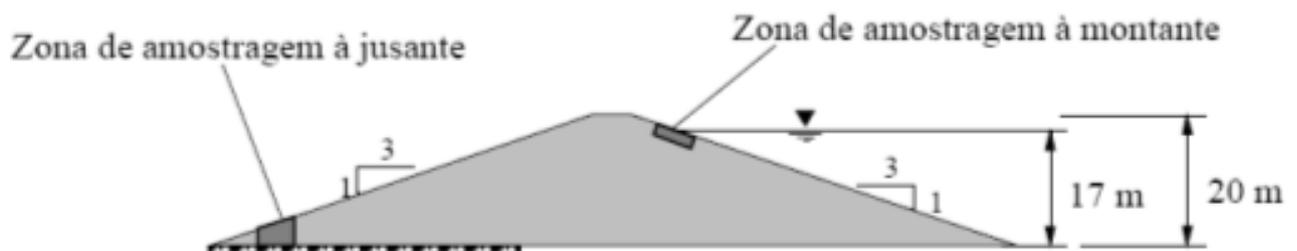


Figura 2.22 Seção transversal da barragem de Valcros (modificado – Faure *et al.*, 1999).

Além da barragem de Valcros, na literatura podem ser encontrados muitos mais casos de usos de geotêxteis em obras de grande magnitude (Degoutte, 1987; Lafleur & Paré, 1990; Gobla, 2009, por exemplo).

2.5. CRITÉRIOS DE FILTRO

Os problemas de mau desempenho dos sistemas filtrantes estão geralmente associados à erosão interna (má retenção do solo), à baixa permeabilidade ou à sua colmatação – entupimento causado pelas partículas finas do solo, que penetram em seu corpo ou bloqueiam a interface solo-filtro. Por isso, o filtro deve permitir a livre passagem da água e ao mesmo tempo reter as partículas de solo de forma apropriada (Christopher & Fischer, 1992; Giroud, 1996; Holtz *et al.*, 1998; Aguiar & Vertematti, 2004). Os geotêxteis, quando usados como filtros, também devem atender á critérios a fim de garantir um comportamento do projeto satisfatório. Existem vários critérios de filtro e a grande maioria compara determinados valores de diâmetros característicos dos grãos de solo (o diâmetro correspondente a 85% passando, por exemplo) com a abertura de filtração do geotêxtil. Os critérios de filtro envolvem a análise da capacidade de *retenção* (antipiping), *permeabilidade*, *colmatação* e *durabilidade* do filtro. Esses critérios foram examinados em detalhes por Christopher & Fisher (1992). A seguir, os critérios a serem atendidos por filtros geotêxteis são apresentados e descritos.

2.5.1. CRITÉRIO DE RETENÇÃO DE GRÃOS

A capacidade de retenção está relacionada com o tipo de geotêxtil (gramatura, espessura, densidade e diâmetro de fibras, porosidade e processo de fabricação), tipo de solo (tamanho das partículas, distribuição granulométrica) e condições hidráulicas e mecânicas da obra. (Rigo *et al.*, 1990).

Este critério está associado a problemas de erosão, podendo ser provocado pela água em movimento, cuja energia desloca partículas de solo em seu caminho. Exemplo típico é o transporte de partículas da superfície do solo nos cursos de água. Essa forma de erosão chama-se “erosão externa”, sendo causada pela ação do vento e da água. Ademais, a erosão interna é causada pela ação da água no interior de um solo, provocando deslocamento de suas partículas, também chamado de “lavagem” (sufusão) ou “*piping*” (erosão interna progressiva). Essa ação

da água pode ser devida ao fluxo do lençol freático ou de infiltrações locais (fluxo unidirecional), ou originado pela ação de ondas (fluxo turbulento ou bidirecional). Esses problemas podem ser evitados por meio da colocação de filtros geossintéticos, os quais, no primeiro caso, dissipam a energia da água antes de seu contato com a superfície erodível e, no segundo caso, evitam a lavagem de finos que causa a instabilidade interna (Aguiar & Vertematti, 2004).

Retenção do solo não significa prevenir totalmente a migração de partículas do material retido, motivo pelo qual, não é estritamente necessário que as maiores aberturas do filtro sejam todas 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). O filtro geotêxtil geralmente é selecionado de modo que as partículas de solo maiores são retidas para formar uma *ponte* de solo, levando ao desenvolvimento de uma estrutura de solo estável que é capaz de prevenir ainda mais a migração (Figura 2.23). Algumas partículas do solo podem realmente ser admitidas passar através do geotêxtil para evitar o seu entupimento (Holtz *et al.*, 1998; Palmeira, 2003).

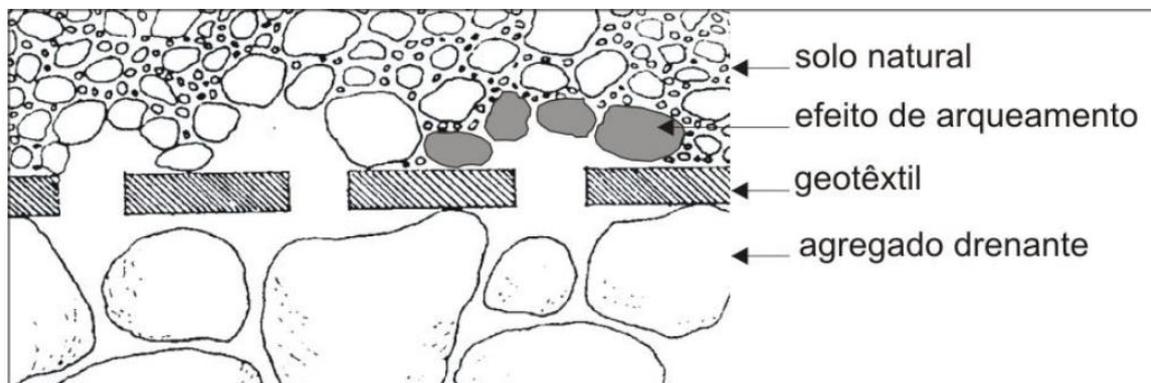


Figura 2.23 Formação de arcos de partículas (modificado-John,1987)

Segundo Giroud (1994), para que um filtro possa reter satisfatoriamente um solo deve-se atender às seguintes condições:

- 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.

Geralmente, o critério de retenção é apresentado como a relação entre o tamanho da medida da abertura de filtração do geotêxtil (refere-se ao diâmetro equivalente de maior partícula que pode atravessar o geotêxtil) e a medida do diâmetro das partículas do solo por meio de:

$$\frac{O_f}{D_i} < N \quad (2.15)$$

Onde O_f é a abertura considerada para o geotêxtil (O_{95} , O_{90} , O_{50} ou O_{15}), D_i é o diâmetro das partículas de solo (D_{95} , D_{90} , D_{50} , D_{30} ou D_{15}), e N é função das características do solo e geotêxtil, cujo valor varia dependendo do autor considerado, podendo ser função da distribuição granulométrica do solo, porosidade, entre outros.

Quando são levados em conta os efeitos do confinamento e a colmatação parcial do geotêxtil, é possível calcular a abertura de filtração genérica por meio da seguinte expressão (Palmeira & Gardoni, 2002):

$$O_f^* = \frac{O_f}{K_\sigma K_{pc}} \quad (2.16)$$

Onde O_f^* é a abertura de filtração do geotêxtil em condições de confinamento e parcialmente colmatado, O_f é a abertura de filtração sem confinamento, K_σ e K_{pc} são fatores de redução que levam em conta os efeitos do nível de tensão e a colmatação parcial nas dimensões das constrições do geotêxtil. Assim, o valor de O_f^* da Equação 2.16 pode ser usado na Equação 2.15 obtendo:

$$\frac{O_f}{D_i} \leq K_\sigma K_{pc} N \quad (2.17)$$

Os fatores de redução K_σ e K_{pc} , devem ser avaliados por meio de ensaios de laboratório sob condições de confinamento e colmatação. Palmeira & Gardoni (2002) encontraram que só o nível de tensão de confinamento pode ser responsável por um incremento significativo da capacidade de retenção do geotêxtil. Para o caso de K_{pc} , sua magnitude deve ser avaliada como uma função do nível de impregnação do geotêxtil.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns dos critérios de retenção encontrados na literatura e listados por Palmeira & Gardoni (2000b).

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

Fonte	Critério	Aplicação
USACE – U. S. Army Corps of Engineers (1977)	$0.149 \text{ mm} \leq O_{95}$ $\leq 0.211 \text{ mm}$ $0.149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq D_{85}$	$D_{50} > 0.074 \text{ mm}$ $D_{50} \leq 0.074 \text{ mm}$ Geotêxteis não devem ser usados se $D_{85} < 0.074 \text{ mm}$
AASHTO Task Force #25 (1986)	$O_{95} < 0.59 \text{ mm}$ $O_{95} < 0.30 \text{ mm}$	Se $50\% \leq 0.074 \text{ mm}$ Se $50\% > 0.074 \text{ mm}$ Não há limitação quanto ao tipo de geotêxtil ou solo
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$ $O_{95} \leq 0.2 \text{ mm}$	Tecidos, solos com $\leq 50\%$ passando na peneira 200 Tecidos, solos coesivos
Zitscher, 1974	$O_{50}/D_{50} \leq 1.7 - 2.7$ $O_{50}/D_{50} \leq 2.5 - 3.7$	Tecidos, solos com $C_u \leq 2$, $D_{50} = 0.1$ 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 $0.02 \leq D_{85} \leq 0.25 \text{ mm}$

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

Fonte	Critério	Aplicação
		Não tecidos, solos com $D_{85} > 0.25$ 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 ($a = 0.7$ para 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

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

Fonte	Critério	Aplicação
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 Society – CGS (1992)	$O_f/D_{85} < 1.5$ $O_f/D_{85} < 3.0$	<p>Solos uniformes</p> <p>Solos amplamente graduados</p>
UK DTP – Murray and McGown (1992), from Corbet (1993)	$O_{90}/D_{90} = 1$ a 3 $O_{90}/D_{90} < 1$ a 3 $O_{90}/D_{50} < 1.8$ a 6	<p>Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos</p> <p>Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2\text{mm}$) – critério alternativo</p> <p>Solos com $5 < C_u < 10$, não tecidos espessos ($t_{GT} > 2\text{mm}$) – critério alternativo</p>
Fannin <i>et al.</i> (1994) - UBC	$O_f/D_{85} < 1.5$ e $O_f/D_{50} < 1.8$ $O_f/D_{85} < 0.2$, $O_f/D_{50} < 2.0$, $O_f/D_{50f} < 2.5$ e $O_f/D_{15} < 4.0$	<p>Não tecidos, $1 < C_u < 2$</p> <p>Não tecidos, $3 < C_u < 7$</p>
Bhatia and Huang (1995)	$O_{95}/D_{85} < 0.65 - 0.05C_c$ $O_{95}/D_{85} < 2.71 - 0.36C_c$ $O_{95} < D_{85}$	<p>$n_{GT} < 60\%$ e $C_c > 7$</p> <p>$n_{GT} < 60\%$ e $C_c < 7$</p> <p>$n_{GT} < 60\%$</p>
Lafleur (1999)	$O_f/D_I < 1$	Solos estáveis ($C_u \leq 6$ e $D_I = D_{85}$ neste caso), solos com $C_u > 6$ mas linearmente graduados ($D_I = D_{50}$, neste caso), mal graduado ($C_u > 6$)

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

Fonte	Critério	Aplicação
	$1 < O_f/D_I < 5$	solos internamente estáveis ($D_I = D_G$) e solos com $Cu > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e internamente estáveis ($D_I = D_{30}$) Solos instáveis: $D_I = D_{30}$ para solo mal graduado internamente instável com curva granulométrica côncava para cima (risco de migração de finos). Critério desenvolvido para solos sem coesão

2.5.2. CRITÉRIO DE PERMEABILIDADE DO FILTRO

A maioria das metodologias são baseadas no argumento que o geotêxtil precisa ser mais permeável que o solo a reter (Tabela 2.3). Este pressuposto é simples e racional como é de esperar que o fluxo não deverá ser impedido na interface solo/geotêxtil se as permeabilidades são, pelo menos iguais. Deve-se considerar, entretanto, um fator de segurança (FS), que varia em função do tipo de solo, e das condições de aplicação do filtro. O valor de FS pode variar de 1 a 200 (Aguiar & Vertematti, 2004), e, seu valor, dependerá das condições do problema e do autor. Alguns deles também levam em conta a permissividade e a espessura do geotêxtil no critério de permeabilidade.

Devido à alta porosidade dos geotêxteis, é muito provável se ter fluxo turbulento através do geotêxtil para gradientes relativamente pequenos, pelo qual é necessário ter especial cuidado na hora de calcular a permeabilidade do geotêxtil, já que a lei de Darcy não foi desenvolvida para os casos nos quais o fluxo não é laminar.

Tabela 2.3 Critérios de permeabilidade (Palmeira, 2003)

Fonte	Critério	Comentários
Calhoun (1972), Schober & Treindl (1979), Wates (1980), Carrol (1983), Christopher & Holtz (1985), e outros.	$k_f > k_s$	Fluxo estacionário em aplicações não críticas e condições de solo não severas
Carrol (1983) e Christopher & Holtz (1985)	$k_f > 10 k_s$	Condições críticas e condições severas de solo e hidráulicas
Giroud (1982)	$k_f > k_s$	Sem fator de segurança
French Committee on Geotextiles and Geomembranes (1986)	Baseado na permissividade com $\psi > 10^{3-5} k_s$	Crítica 10^5 , menos crítica 10^4 , areia limpa 10^3
UK Department of Transportation (Corbet, 1993)	$k_f > 10 k_s$ $k_f > 100 k_s$	Tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} < 2\text{mm}$) Não tecidos espessos ($t_{GT} > 2\text{mm}$)
Lafleur (1999)	$k_f > 20 k_s$	

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

2.5.3. CRITÉRIO CONTRA COLMATAÇÃO DO FILTRO

Por definição, colmatação é o resultado das partículas finas penetrando dentro do geotêxtil, bloqueando os canais de fluxo, ou aglomeração do lado de montante do geotêxtil, reduzindo sua permeabilidade. Como tal, a colmatação está intimamente relacionada com o critério de permeabilidade (Christopher & Fisher 1992). No entanto, foi demonstrado por Carroll (1983) que cumprir os critérios de retenção e de permeabilidade não necessariamente prevê um projeto do filtro completo, pois o sistema poderia ainda falhar por entupimento.

O comentado por Carroll é muito racional considerando a base para os critérios de retenção e de permeabilidade e os mecanismos que podem causar o entupimento. Recorde-se que o tamanho da abertura para reter o solo é baseado apenas em limitar o maior tamanho de abertura no geotêxtil (critério do tamanho de abertura máxima) com nenhuma restrição sobre os

tamanhos de poro menores ou a porcentagem do volume de aberturas (porosidade) que representaria. No que se refere aos critérios de permeabilidade, um geotêxtil com uma pequena porosidade pode ainda conseguir uma permeabilidade maior do que a do solo, especialmente solos de grãos finos que tendam a causar problemas de colmatação (Christopher & Fisher 1992).

Quando as condições de permeabilidade e retenção forem 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. 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: cegamento (*blinding*), bloqueamento (*blocking*) ou colmatação física (*clogging*) (Rollin & Lombard, 1988; Christopher & Fischer, 1992; Giroud, 1994; Lafleur, 1999; Xiao & Reddi, 2000; Messias da Silva, 2014). O critério anti-colmatação exige que a maioria das aberturas seja larga o suficiente para deixar passar as partículas pequenas através do filtro de modo que ele não colmate (Gardoni, 1995).

A Figura 2.24a apresenta o mecanismo de **cegamento**, onde as partículas finas do solo protegido migram, segundo o processo de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo) em direção ao geotêxtil. Caso a porometria do geotêxtil não seja suficiente para permitir a passagem dessas partículas, elas podem se agrupar formando uma camada de baixa permeabilidade sobre a face do geotêxtil, afetando profundamente a capacidade drenante do mesmo. Este é um fenômeno particularmente relevante e comum em solos que apresentam curva granulométrica descontínua (caracterizados por serem solos de graduação aberta ou instáveis).

No **bloqueamento**, esquematizado na Figura 2.24b, as partículas de solo protegido se posicionam sobre as aberturas de geotêxtil obstruindo-as total ou parcialmente; um certo grau de bloqueamento sempre é esperado, o que não deve permitir é que o geotêxtil tenha uma porometria semelhante à do solo, sob pena de ter-se um bloqueamento severo que induziria à uma redução grande da permeabilidade do geotêxtil.

Na **colmatação física**, representada pela Figura 2.24c, as partículas do solo protegido com diâmetros próximos às aberturas do geotêxtil migram junto com o fluido percolante, penetram no geotêxtil, ficando retidas ao longo de sua espessura (Spada, 1991). De um modo geral, a possibilidade de uma colmatação leve já é esperada e não é preocupante, tendo em vista que o critério de permeabilidade para a escolha do geotêxtil é seguro (John, 1987). Também pode-se

apresentar outros tipos de processos de colmatção, como são os químicos ou os biológicos. Nestes casos, podem ser causas de colmatção a precipitação química, a deposição de sal e o crescimento de bactérias (Rollin & Lombard, 1988; Gardoni, 1995; Holtz *et al.*, 1998; Freitas, 2003).

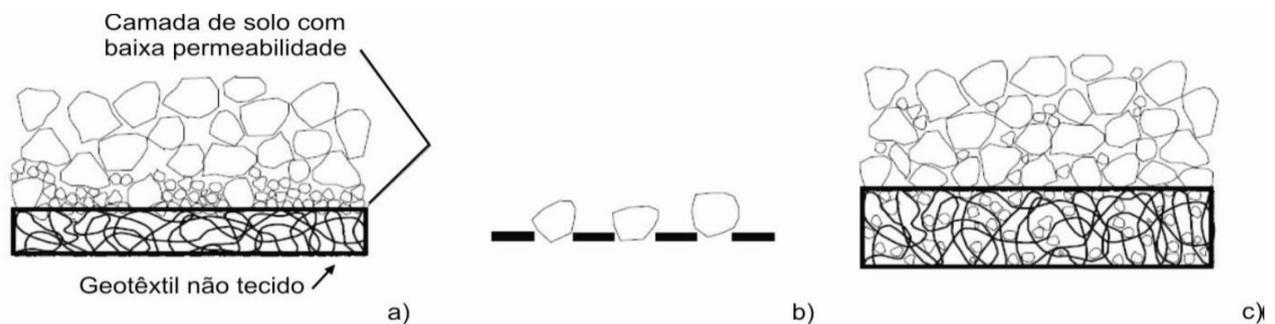


Figura 2.24 Mecanismos de colmatção de filtros geotêxteis (Palmeira, 2003):

(a) Cegamento, (b) Bloqueamento, (c) Colmatção física, química ou biológica.

Além do cumprimento dos requisitos de permeabilidade, o critério anti-colmatção garante que o geotêxtil é suficientemente aberto e que o acúmulo de partículas de solo, químicas ou biológicas precipitadas não vai reduzir a permeabilidade ao ponto no qual o conjunto geotêxtil / filtro torna-se menos permeável do que o solo base. O projetista deve procurar fornecer um geotêxtil permeável e poroso o máximo possível, mantendo critérios de retenção. Isto irá permitir uma redução substancial na permeabilidade do filtro geotêxtil instalado, devido à compressão, à colmatção parcial, e de outros fatores e ainda manter uma instalação global que é mais permeável do que o solo de base (FEMA, 2008).

No que se refere a filtros geotêxteis, as seguintes recomendações são feitas (Luetlich *et al.*, 1992):

- Usar o maior tamanho de abertura que satisfaça os critérios de retenção.
- Para geotêxteis não tecidos, utilizar a maior porosidade disponível, e não inferior a 30%.
- Para geotêxteis tecidos, usar a maior percentagem de área aberta (POA), e não inferior a 4%.

Para o caso de condições de obra menos críticas ou menos severas, o critério contra colmatção é geralmente baseado no coeficiente de uniformidade do solo, na abertura de filtração do geotêxtil e no diâmetro das partículas do material a ser retido (Carroll, 1983). Quando as condições da obra são críticas ou severas a melhor forma de avaliar a possibilidade de colmatção do filtro é por meio da execução de ensaios de filtração utilizando o solo e as

condições hidráulicas esperadas na obra (Holtz *et al.*, 1998; FEMA, 2008; Palmeira, 2003). A guia detalhada para a avaliação da natureza crítica ou severidade em projetos de drenagem e controle de erosões, pode ser vista em Carroll (1983). Na Tabela 2.4 são apresentados os critérios contra colmatção encontrados na literatura.

Tabela 2.4 Critérios contra colmatção (modificado - Christopher & Fischer, 1992)

<p>A. Crítico/ aplicações severas</p> <p>Testes de solo/ ensaios de filtração</p> <p>(Calhoun, 1972; Haliburton <i>et al.</i>, 1982; Haliburton & Wood, 1982; Giroud, 1982; Carrol, 1983; Christopher & Holtz, 1985, 1989; Koerner, 1990)</p> <p>B. Menos críticos/ aplicações pouco severas</p> <p>1. Testes de solo/ ensaios de filtração</p> <p>2. Para solos que contem finos. Alternativas do Mínimo Tamanho de Poros, especialmente em solos que tem matriz não continua.</p> <p>(a) $O_{98} > 3D_{15}$ para $C_u > 3$ (Christopher & Holtz, 1985 e modificado em 1989)</p> <p>(b) $O_{95} > 4D_{15}$ (Comité Francês de Geotêxteis, 1986)</p> <p>(c) $O_{15}/D_{15} > 0,8$ até 1,2; $O_{50}/D_{50} > 0,2$ até 1 (Fischer <i>et al.</i>, 1990)</p> <p>3. Para $C_u < 3$, deve ser especificada a máxima abertura de filtração para o critério de retenção</p> <p>4. Qualificação da área de abertura aparente</p> <p>Geotêxteis tecidos: porcentagem de área aberta: > 4% até 6% (Calhoun, 1972; Koerner, 1990)</p> <p>Geotêxteis não tecidos: porosidade > 30% até 40% (Christopher & Holtz, 1985; Koerner, 1990)</p>
--

Para evitar o entupimento ou bloqueamento do geotêxtil, deve ser garantido um contato íntimo entre o solo e geotêxtil durante a construção. Vazios entre o solo e geotêxtil pode expor o geotêxtil a uma suspensão ou mistura de lodos durante a infiltração. Esta condição promove a erosão do solo atrás do geotêxtil e entupimento do geotêxtil (Holtz, 1998).

Faure *et al.*, (2006) desenvolveram um modelo teórico para prever o nível de colmatção dos geotêxteis quando usados como filtros, baseados na concentração de partículas de solo no fluido percolante, distribuição do tamanho das partículas de solo, a estrutura e a abertura de filtração do geotêxtil.

2.5.4. CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA OU RESISTÊNCIA E DURABILIDADE

Segundo Vertematti e Aguiar (2004), além da verificação da condição de filtro do geotêxtil pelos critérios mencionados, outros aspectos não menos importantes devem ser considerados em uma obra, os quais podem assumir importância significativa ou não. São eles:

- ✓ resistência à perfurações dinâmicas;
- ✓ energia de deformação absorvida pelo geotêxtil;
- ✓ flexibilidade;
- ✓ resistência à passagem da água;
- ✓ sensibilidade aos solos finos em suspensão;
- ✓ resistência à agressividade do meio ambiente.

A explicação detalhada das características de resistência e durabilidade listadas acima, pode ser vista em Vertematti & Aguiar (2004).

2.6. INFLUÊNCIA DAS TENSÕES E NÍVEL DE IMPREGNAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS: PESQUISAS ANTERIORES

Devido ao grande aumento do uso dos geossintéticos em diferentes obras geotécnicas e ambientais no mundo, eles têm sido tema de pesquisa para muitos autores, com o fim de conhecer o seu desempenho e a variação das suas propriedades sob condições parecidas com as de campo (Palmeira & Fannin, 2002; Freitas, 2003; Tatto, 2010). A seguir, são apresentadas algumas das pesquisas feitas para o caso dos geotêxteis submetidos a diferentes níveis de tensão e de impregnação.

2.6.1. VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS COM O NÍVEL DE TENSÃO

Dado que os geotêxteis não tecidos apresentam uma alta compressibilidade e que a espessura é um parâmetro importante na hora de avaliar as propriedades hidráulicas, a influência dos níveis de tensão nas características desses materiais tem sido tema de pesquisa para muitos autores. Palmeira & Gardoni (2000a, b e 2002) analisaram diferentes tipos de ensaios, entre eles ensaios de filtração, transmissividade e permissividade, teste de ponto de bolha e de análise de imagens. Eles apresentam os resultados do comportamento das propriedades físicas e hidráulicas de geotêxteis quando submetidos a tensões normais entre 0 e 2000 kPa. Na Figura 2.25, são apresentados alguns dos resultados obtidos por estes autores, nos quais é possível ver a variação das propriedades com o nível de tensão aplicado.

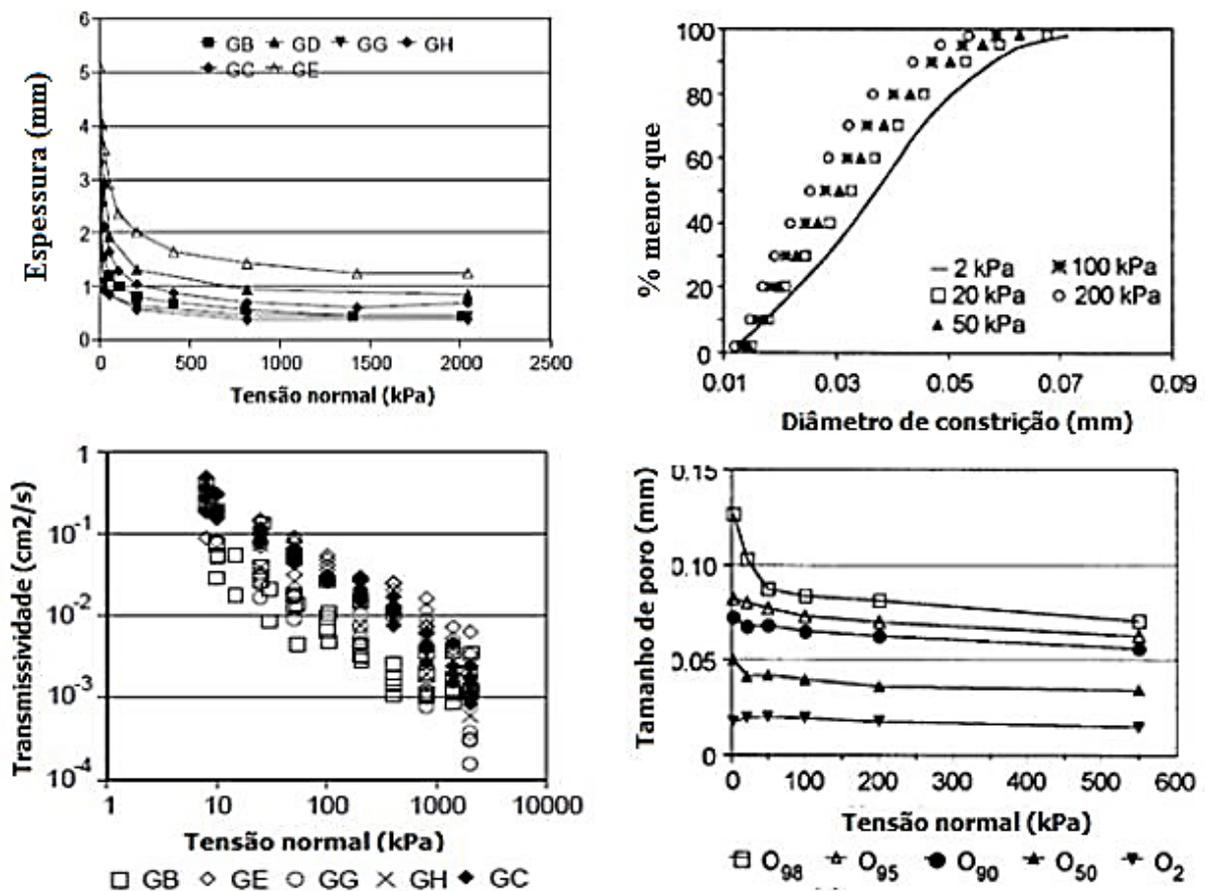


Figura 2.25 Resultados de ensaios em geotêxteis não tecidos (Palmeira & Gardoni 2000 e 2002).

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que o geotêxtil quando comprimido apresenta um aumento significativo na sua capacidade de retenção em relação ao previsto pelos critérios disponíveis. Se o geotêxtil é parcialmente colmatado pelas partículas de solo durante o processo de espalhamento ou compactação do material, essa capacidade de retenção pode aumentar ainda

mais. Simultaneamente, as dimensões das partículas de solo necessárias para colmatar o geotêxtil internamente serão menores do que o tamanho assumido inicialmente pelo projetista em condições não confinadas. Esta situação leva a concluir que, para o caso de retenção, os filtros geotêxteis estão projetados para condições não necessariamente próximas às que vão prevalecer na obra.

Gardoni (2000) e Gardoni & Palmeira (2002) apresentaram também resultados de *Bubble Point Test* e análises de imagens de amostras de geotêxteis virgens confinados sob tensão normal de até 1000 kPa, onde foi possível visualizar que a curva de distribuição de diâmetros das constrições pode ser consideravelmente reduzido a partir de tensões da ordem de 20 kPa (Figura 2.25), que segundo esses autores, são facilmente atingidas em drenos superficiais e mesmo em ensaios de filtração sob grandes gradientes.

Messias da Silva (2014) fez ensaios no equipamento de ponto de bolha (método de intrusão de poros) utilizando espécimes de geotêxtil comprimidos por meio de telas metálicas envolvendo o geotêxtil e costuradas na amostra com a finalidade de reduzir a espessura, e assim, levar em conta a influência da tensão normal na abertura de filtração. Na Figura 2.26 estão apresentados alguns dos resultados obtidos.

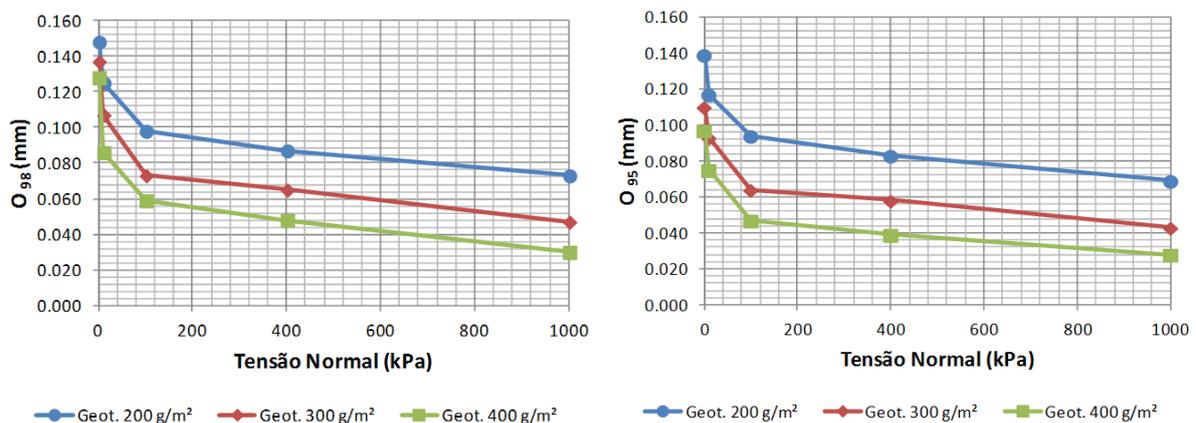


Figura 2.26 Variação da abertura de filtração (O_{98} e O_{95}) com a tensão normal de confinamento (Messias da Silva, 2014).

2.6.2. VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS COM A IMPREGNAÇÃO

Palmeira & Fannin (2002) também analisaram o comportamento de algumas propriedades de geotêxteis não tecidos quando confinados e impregnados com microesferas de vidro ou grãos de areia, por meio de ensaios de filtração sob confinamento (razão de gradientes). Na Figura 2.27 é apresentada a variação da espessura e da permeabilidade do geotêxtil para diferentes níveis de tensão e impregnação. Esses autores descobriram que os efeitos individuais do confinamento e a colmatagem parcial do geotêxtil são conflitantes na redução das aberturas dos poros no geotêxtil, devido ao fato de que a impregnação do geotêxtil reduz a compressibilidade do material.

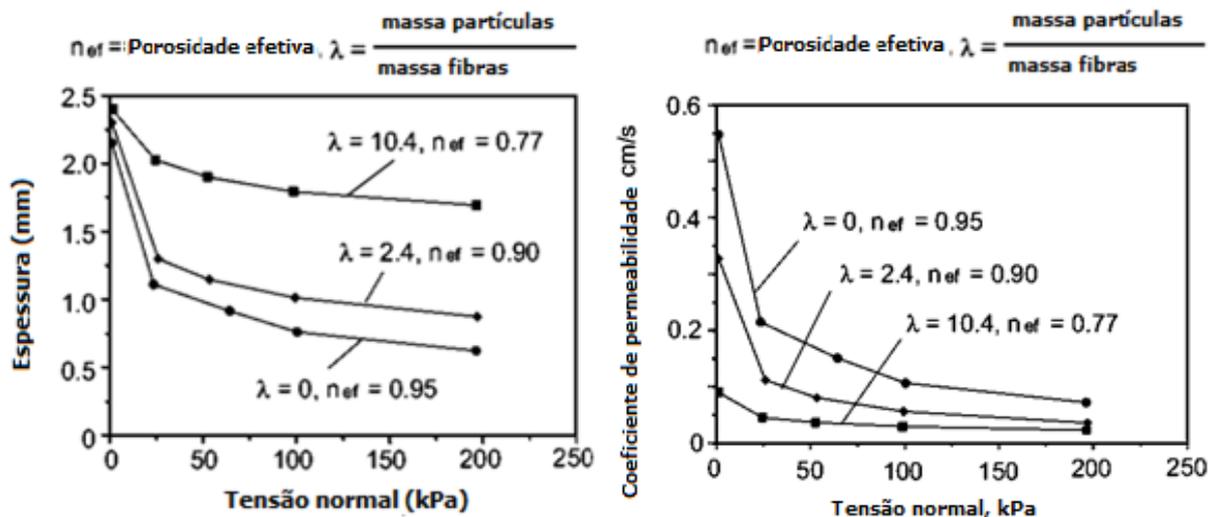


Figura 2.27 Efeitos da impregnação do geotêxtil nas suas propriedades físicas e hidráulicas (Palmeira & Fannin, 2002).

Em que pese a relevância dos trabalhos de pesquisa realizados até o momento descritos acima, ao conhecimento da autora desta dissertação não se avaliou ainda a influência de confinamento e impregnação do geotêxtil no valor da sua abertura de filtração, o que é o objeto da presente pesquisa.

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nesse capítulo são abordados os materiais geotêxteis utilizados nos ensaios, suas especificações e propriedades. Também descrevem-se os equipamentos que foram utilizados para cada uma das etapas e tipos de ensaios realizados durante a execução deste trabalho.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1. GEOTÊXTEIS

Para a execução dos ensaios de compressibilidade e *bubble point test* foram utilizados cinco tipos de geotêxteis não tecidos, agulhados, de filamentos contínuos, com gramaturas de 200, 300 e 600 g/m². Além disso, foram avaliadas configurações de duas e três camadas de geotêxtil de 600 g/m² para se conseguirem gramaturas de 1200 e 1800 g/m². Com o intuito de comparar o comportamento dos geotêxteis segundo o material que o compõe, foram ensaiados geotêxteis de poliéster (PET) e polipropileno (PP) de 200 g/m² e 300 g/m². A Figura 3.1 apresenta os espécimes de geotêxteis, enquanto a Tabela 3.1 apresenta suas principais características.



Figura 3.1. Espécimes de geotêxteis utilizados

Tabela 3.1. Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados

Nome	Geotêxtil	Material	M_A (g/m^2)	t_{gt} (mm)	O_{95} (mm)	K_n (cm/s)	Ψ (s^{-1})
G1	GF10/200	PP	200	1,2	0,130	0,39	2,8
G2	GF16/300	PP	300	1,4	0,110	0,39	1,9
G3	OP-20	PET	200	1,9	0,100	0,3	2,0
G4	OP-30	PET	300	2,3	0,090	0,26	1,5
G5	OP-60	PET	600	4,0	0,080	0,20	0,9
G6	2* OP-60	PET	1200	7,3	-	-	-
G7	3* OP-60	PET	1800	11	-	-	-

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

Foi evidente a diferença dos tamanhos dos furos do processo de agulhagem entre os geotêxteis de materiais distintos, além da diferença entre as espessuras para geotêxteis da mesma gramatura, diâmetro e arranjo das fibras. Tais fatores podem influenciar diretamente a abertura de filtração do geotêxtil. A Figura 3.2 e a Figura 3.3 apresentam a comparação entre os tamanhos e distribuição dos furos do processo de agulhagem dos geotêxteis de poliéster e polipropileno ensaiados. Cabe lembrar que quando comprimidas os diâmetros de tais aberturas podem diminuir significativamente.

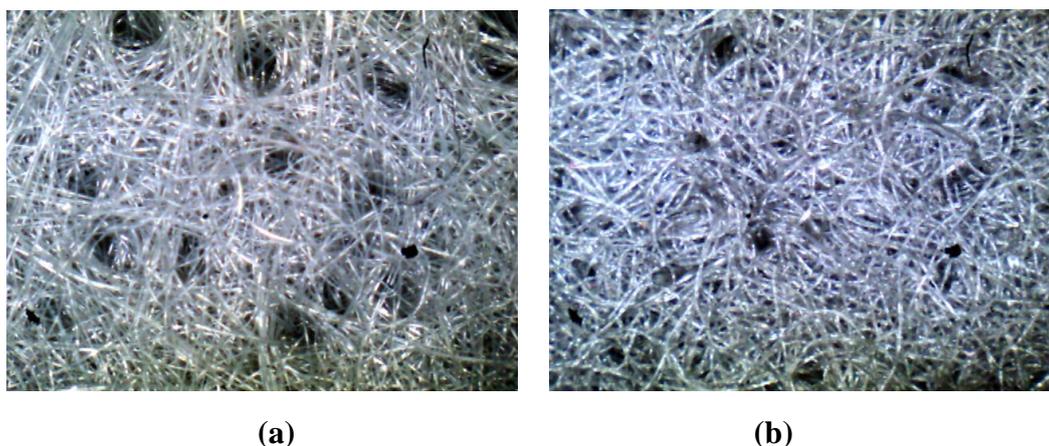


Figura 3.2. Detalhe dos furos do processo de agulhagem nos geotêxteis de $200g/m^2$ obtidos com microscópio de alta resolução, ampliado em 50 vezes: (a) Poliéster, (b) Polipropileno

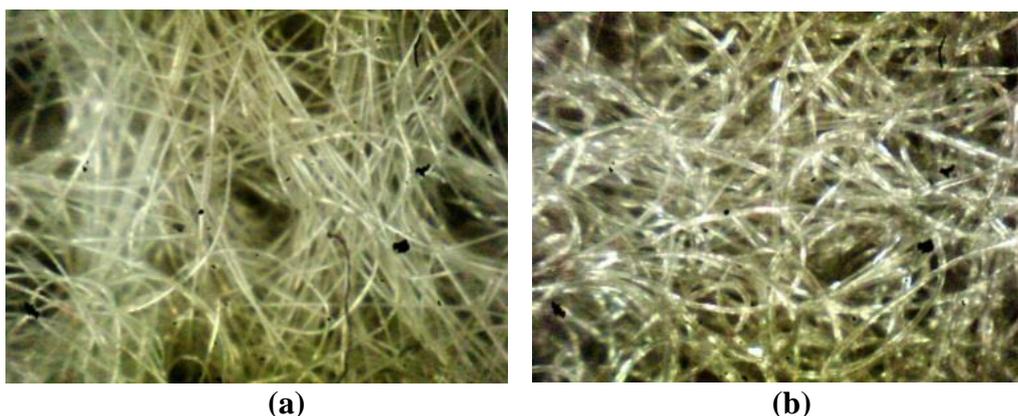


Figura 3.3. Detalhe dos furos do processo de agulhagem nos geotêxteis de 200g/m^2 obtidos com microscópio de alta resolução, ampliado em 100 vezes: (a) Poliéster, (b) Polipropileno

3.1.2. MICROESFERAS DE VIDRO

No programa de ensaios foram utilizadas microesferas de vidro com diâmetros variando entre $75\ \mu\text{m}$ e $150\ \mu\text{m}$, similares a de um solo de gradação uniforme (Figura 3.4). As microesferas de vidro já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e foram utilizados em estudos anteriores de Tatto (2010). As microesferas são provenientes da empresa Potters Industrial Ltda, e a Figura 3.5 e a Tabela 3.2 apresentam as suas principais características granulométricas.

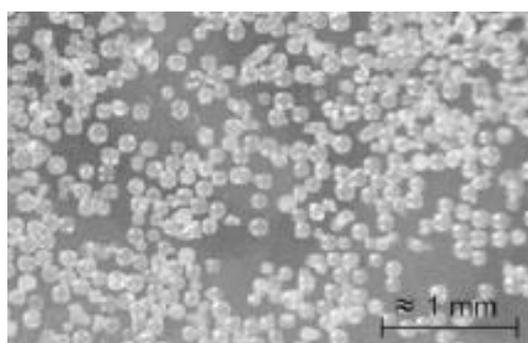


Figura 3.4. Detalhe das microesferas de vidro (Tatto, 2010).

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

$D_{10}(\text{mm})$	$D_{30}(\text{mm})$	$D_{50}(\text{mm})$	$D_{60}(\text{mm})$	$D_{95}(\text{mm})$	Cu	Cc
0,075	0,090	0,096	0,100	0,137	1,33	1,08

Notas: Cu = coeficiente de uniformidade e Cc = coeficiente de curvatura.

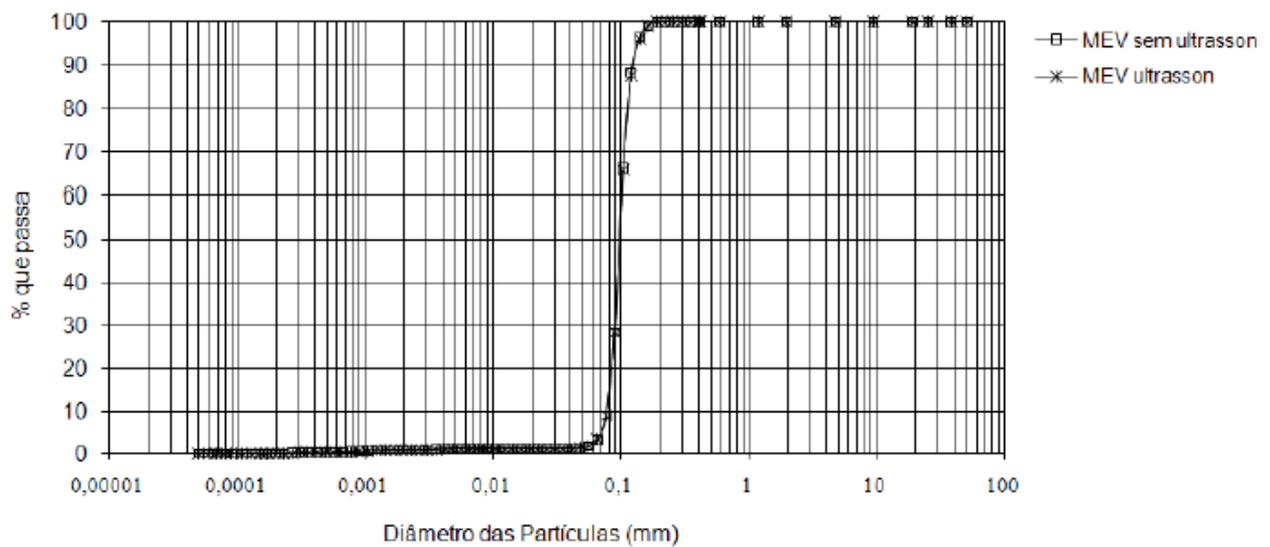


Figura 3.5. Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrassom (Tatto, 2010).

Tatto (2010) obteve a curva granulométrica por meio do equipamento granulômetro a laser, com e sem utilização de ultrassom para provocar a desagregação de possíveis grumos de partículas.

3.2. EQUIPAMENTOS

Neste item são descritos os principais equipamentos que foram usados para a execução dos ensaios desta pesquisa. Foram eles: o equipamento de aplicação de tensão normal (equipamento de compressão uniaxial) e o equipamento de ponto de bolha (*Bubble point test*).

3.2.1. EQUIPAMENTO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Para conhecer a variação da espessura dos geotêxteis analisados quando submetidos a diferentes níveis de tensão vertical foi usada uma prensa de adensamento tipo BISHOP. A prensa permite a aplicação e manutenção de cargas verticais especificadas ao longo do período necessário de tempo, a tensão aplicada e as deformações são controladas e facilmente medidas. Um esquema

geral do equipamento utilizado na pesquisa presente no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília é apresentado na Figura 3.6.

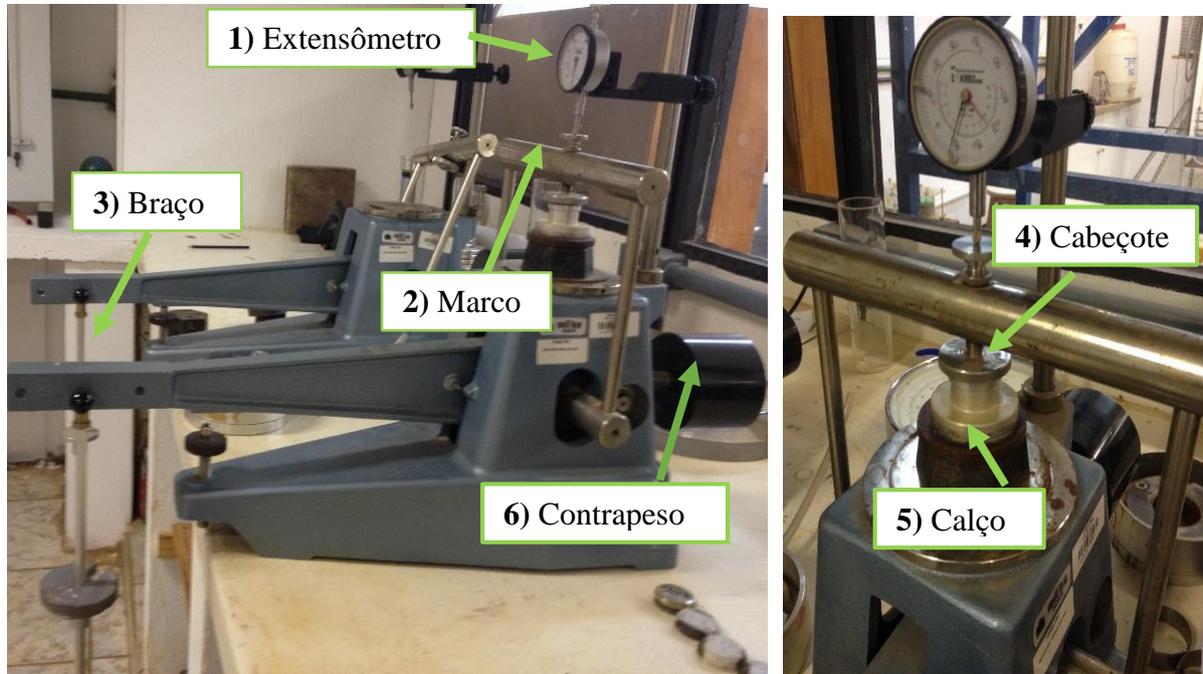


Figura 3.6. Equipamento de adensamento usado para ensaios de compressão uniaxial.

Em geral, o equipamento tal como foi usado para a presente pesquisa é composto por:

- 1) Extensômetro: produto da marca Controls Ltda. com resolução de 0,002mm e com capacidade de medir 25 mm, posicionado sobre o marco de carregamento para medir a compressão do geotêxtil quando submetido a tensão;
- 2) Marco de carregamento: é o elemento que transmite a carga para o cabeçote e posteriormente para o geotêxtil; ele deve estar devidamente posicionado para garantir o carregamento uniforme da amostra e posteriormente a correta leitura dos deslocamentos no extensômetro;
- 3) Braço rígido: funciona como alavanca e permite a colocação dos pesos para o carregamento vertical do espécime com relações de 1:9, 1:10 ou 1:11;
- 4) Cabeçote rígido de carregamento: com diâmetro de 50mm, é o elemento que permite a aplicação uniforme e homogênea do carregamento sobre a amostra ensaiada;
- 5) Calço rígido e indeformável: auxilia na compensação da altura para posicionar o geotêxtil;
- 6) Contrapeso, é um peso que garante a estabilidade do equipamento evitando o giro quando são colocados os pesos no pendural.

3.2.2. EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*)

Com o conhecimento adquirido por Lima (2014) durante o seu período de estágio de doutorado sanduíche na Universidade do Texas em Austin, foi desenvolvido um equipamento para determinação da distribuição de poros de geossintéticos baseado tanto na norma D6767 (ASTM, 2014), quanto no trabalho de Eun & Tinjum (2011). Com o objetivo de obter resultados mais acurados e aumentar a sensibilidade, Messias da Silva (2014) fez algumas melhorias no equipamento desenvolvido por Lima (2014) no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A partir das mudanças que foram realizadas por Messias da Silva, foi possível obter um equipamento aprimorado do *Bubble Point Test*, ilustrado na Figura 3.7.

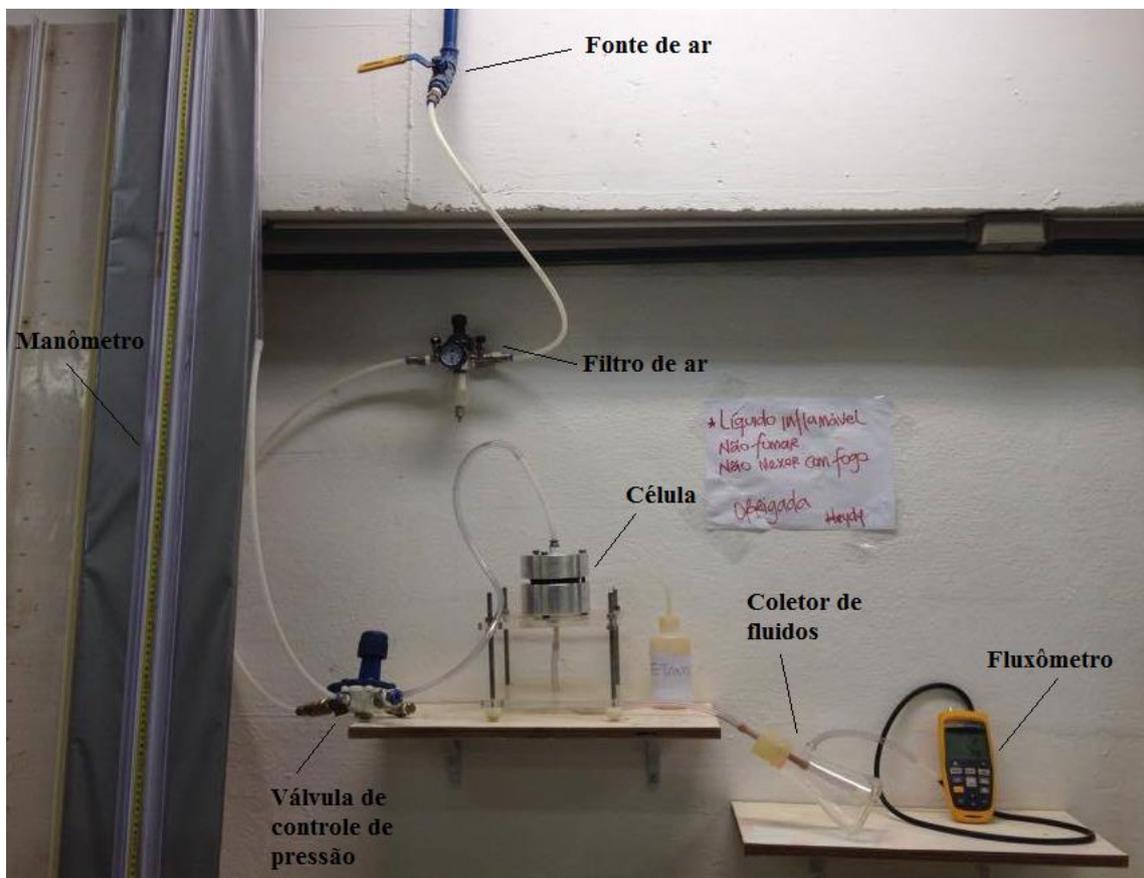


Figura 3.7. Equipamento utilizado para determinação da curva de distribuição de poros em geotêxteis.

Sendo assim, na sua versão atual e cumprindo com as características especificadas pela norma D6767 (ASTM, 2014), o equipamento é composto por:

- 1) Fonte limpa de gás pressurizado, filtrado e com regulação (Figura 3.8): tem a finalidade de evitar a formação de água por condensação; são incluídos um filtro de ar com purgador entre a fonte de ar comprimido e a célula onde a amostra de geotêxtil é instalada.



Figura 3.8. Fonte de ar limpo e pressurizado

- 2) Válvula de controle de pressão de ar (Figura 3.9): permite aplicar gradativamente baixos valores de pressão de ar comprimido, o que aumenta a sensibilidade do equipamento e a possibilidade de medir os poros de maiores tamanhos.



Figura 3.9 Válvula para controle de pressão no *Bubble Point Test*.

- 3) Manômetro de ramo aberto em formato de “U”: instrumento para medição de pressão que cobre a faixa de pressão necessária para verificação do tamanho dos poros em estudo (Figura 3.10); O manômetro apresenta capacidade de medir 2 m.c.a. (19,6 kPa), valor

suficiente para que as curvas úmida e seca dos ensaios com geotêxteis não tecidos possam coincidir nos valores mais elevados de fluxo de ar (Messias da Silva, 2014).

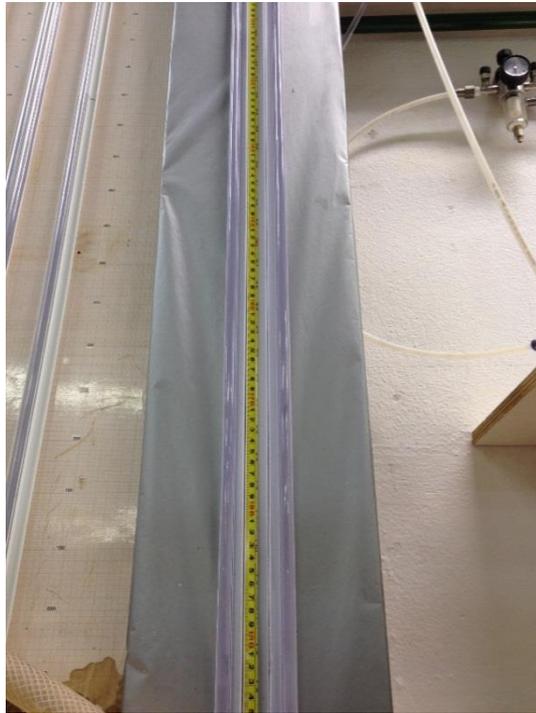


Figura 3.10. Manômetro de ramo aberto

O manômetro é composto por um tubo de polietileno em formato de “U”, com 6 mm de diâmetro interno e 10 mm de diâmetro externo, interligado ao regulador de ar por tubos de nylon com diâmetro interno de 4 mm e diâmetro externo de 6 mm. O manômetro é suportado por duas canaletas conectadas a um painel de madeira de 2 m de altura (Figura 3.10). Antes do ensaio, os 2 meniscos permanecem na marca de 1 m e 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 altura de coluna d’água.

- 4) Célula: componente que abriga a amostra de geotêxtil e é vedada para que não haja vazamentos (Figura 3.11). 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 (Figura 3.12).

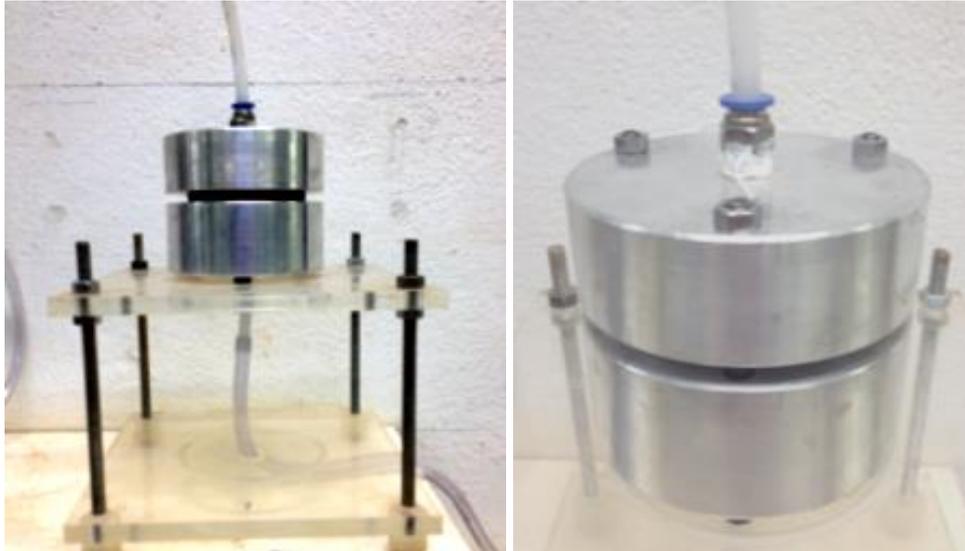


Figura 3.11 Célula onde é ensaiada a amostra de geotêxtil.

- 5) Placa perfurada (Figura 3.12): serve como base para o geotêxtil durante a aplicação de pressão, tendo função tanto de suporte quanto drenante. 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 (Messias da Silva, 2014). A amostra de geotêxtil é ensaiada com um diâmetro de 60 mm, já a placa perfurada tem diâmetro de 50 mm, a área de placa perfurada é considerada a área ensaiada da amostra.



Figura 3.12. Placa perfurada com diâmetros variados.

- 6) “O-rings”: servem para evitar vazamentos de ar (Figura 3.13).

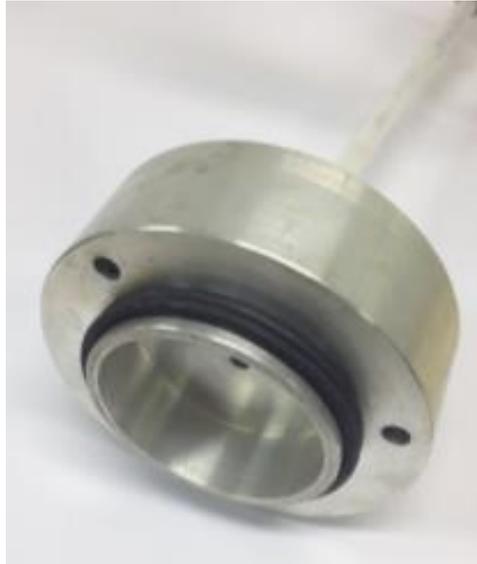


Figura 3.13 Dois o’rings posicionados externamente à célula.

- 7) Medidor digital de fluxo de ar: equipamento da marca Fluke 922, com precisão de até 0,01 l/min (Figura 3.14), e com a acurácia suficiente para se obterem resultados mais confiáveis para poros com maiores diâmetros, como os correspondentes a O₉₈ e O₉₅, por exemplo. Além de ser um medidor digital do fluxo de ar, o Fluke 922 também pode obter dados de pressão, velocidade do ar e temperatura.



Figura 3.14. Medidor digital Fluke 922

- 8) Coletor do fluido de saturação: serve para evitar que o fluido de saturação possa infiltrar no fluxômetro, o qual acarretaria em erros na medição do fluxo de ar e também poderia comprometer o funcionamento do medidor digital (Figura 3.15);

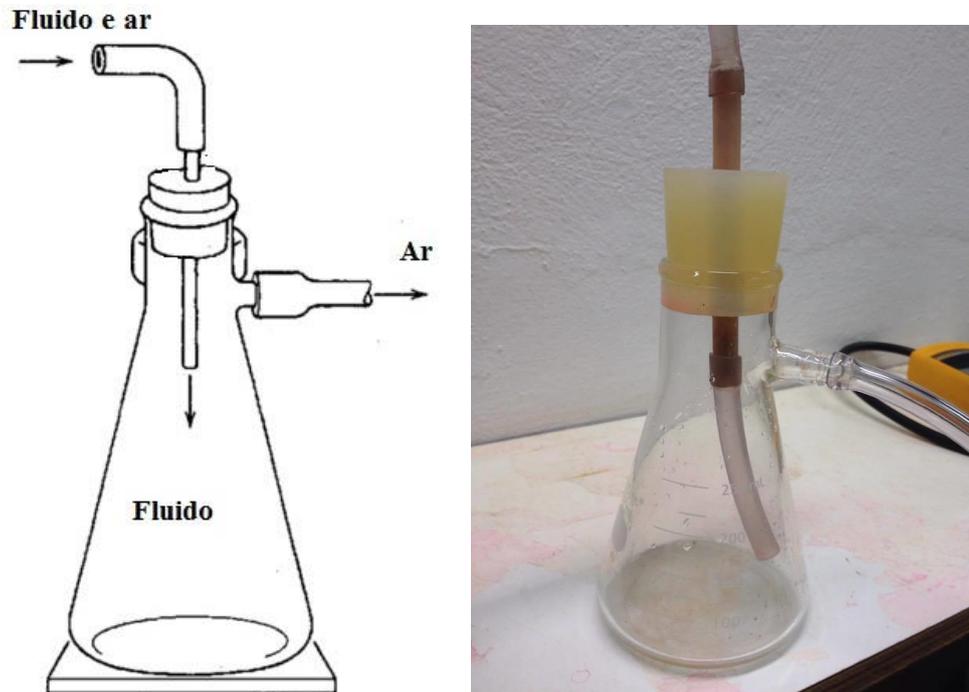


Figura 3.15 Coletor de fluido de saturação.

- 9) Outros componentes: encaixes adequados, tubos e conexões.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a metodologia desta pesquisa. É apresentado também o procedimento de aplicação de tensão normal, obtenção de grau de impregnação da amostra de geotêxtil e da redução média na sua espessura. Além disso, é detalhado o procedimento utilizado para a obtenção da abertura de filtração dos geotêxteis não tecidos.

4.1. PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO

Os procedimentos básicos de ensaio referem-se aos procedimentos conduzidos na preparação das amostras de geotêxtil e a impregnação com as microesferas de vidro. Esses procedimentos são comuns aos dois tipos de ensaios realizados nessa pesquisa. Estes processos são explanados adiante.

4.1.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTEL

Como mencionado no capítulo 2, *Revisão Bibliográfica*, devido ao processo de fabricação das mantas de geotêxtil não tecido e à aleatoriedade das fibras, a determinação das suas propriedades é complexa. Portanto, a preparação e a escolha dos corpos de prova a serem ensaiados devem ser feitas visando diminuir a variabilidade e heterogeneidade presente no material. Os geossintéticos são tipicamente fornecidos pelas empresas em bobinas, sendo que, ao longo do mesmo geotêxtil as suas propriedades podem variar, dependendo tanto do processo de fabricação do geossintético quanto da sua qualidade (Messias da Silva, 2014).

A amostragem para os ensaios foi feita segundo a norma NBR ISSO 9862 (ABNT, 2013). O procedimento de preparação das amostras foi o mesmo adotado por Messias da Silva (2014), sendo descrito a seguir:

- 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, sob 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.
- 5) Os corpos de prova, para cada tipo de ensaio, devem ser extraídos de posições uniformemente distribuídas por toda a largura e comprimento do espécime, 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, como mostra a Figura 4.1(a). Nesta área foram marcados 196 quadrados de 15 cm de lado ao longo do seu comprimento e numerados, como mostra a Figura 4.1;
- 7) Para 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 80 números para cada gramatura de geotêxtil para, posteriormente, recortá-los da manta e identificá-los (Figura 4.2);
- 8) Os espécimes quadrados de 15 cm de lado foram pesados para simples conferência de suas gramaturas e recortadas em círculos de 50 mm de diâmetro para os ensaios de aplicação de tensão normal (compressibilidade) e de 60 mm de diâmetro para os ensaios de ponto de bolha. É importante esclarecer que com a gramatura obtida nos quadrados, foi possível escolher a localização mais adequada do espécime, visando à compensação das áreas de menor e maior gramatura de modo a obter um valor mais perto do nominal (Figura 4.2);
- 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.

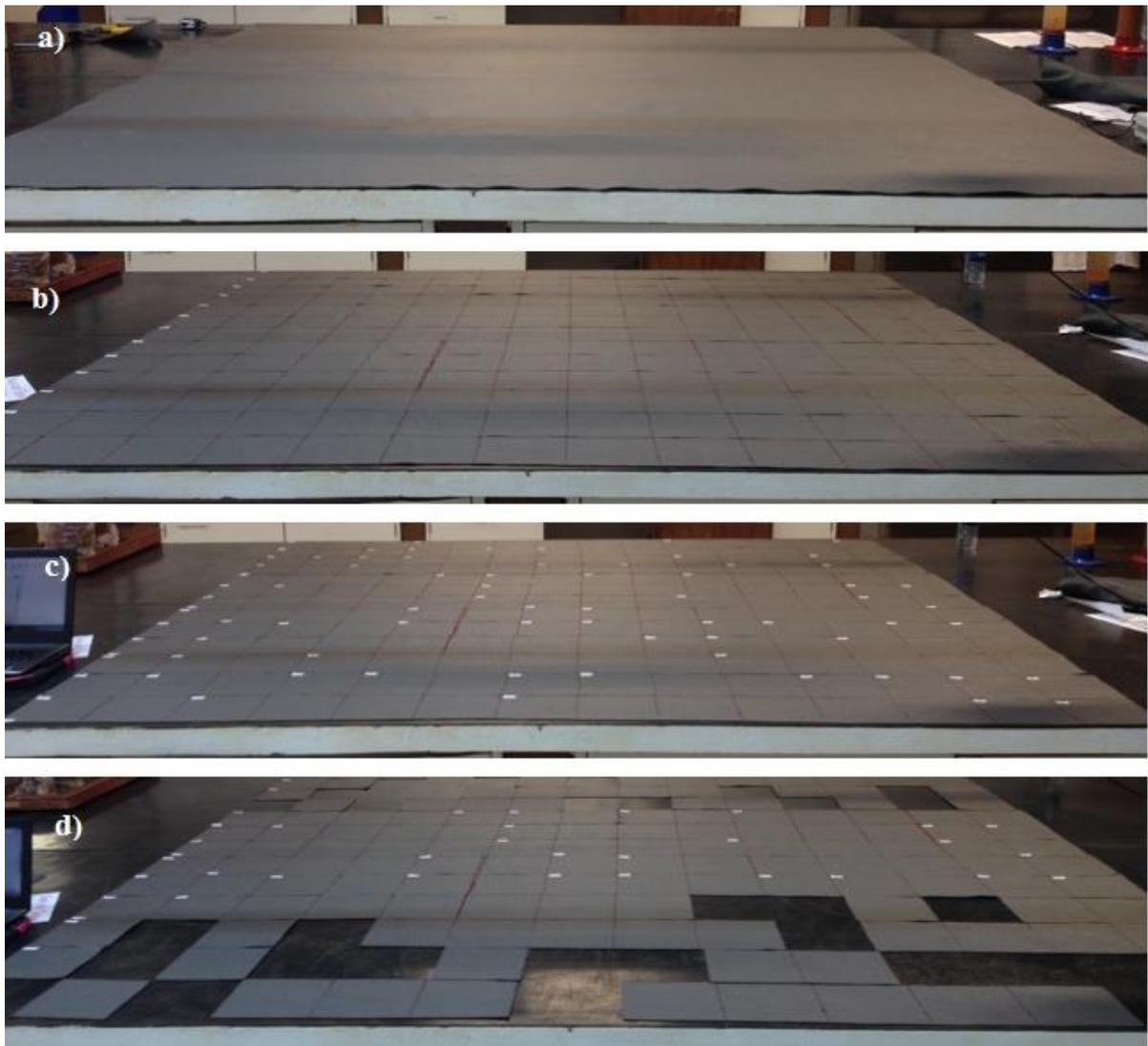


Figura 4.1 Amostragem de geotêxtil (a) Amostra sem irregularidades, sendo acomodada em uma superfície plana e limpa, permanecendo neste local por 24 horas, (b) Marcação de 196 quadrados de 15 cm x 15 cm, (c) Identificação dos quadrados com números, (d) Recorte dos espécimes com números obtidos aleatoriamente.



Figura 4.2. Espécimes de geotêxtil identificados com detalhe: identificação das áreas de menor gramatura.

Para o ensaio de espécimes secos de geotêxtil é necessário pesar os espécimes, submergi-los 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 seja alcançado (ASTM, 2014).

Para o ensaio de espécimes úmidos de geotêxtil: O espécime de geotêxtil foi colocado em um recipiente com etanol por 1 hora para assegurar a sua completa saturação (Figura 4.3). Após a sua saturação, o espécime era colocado na base da célula e logo após ensaiado.

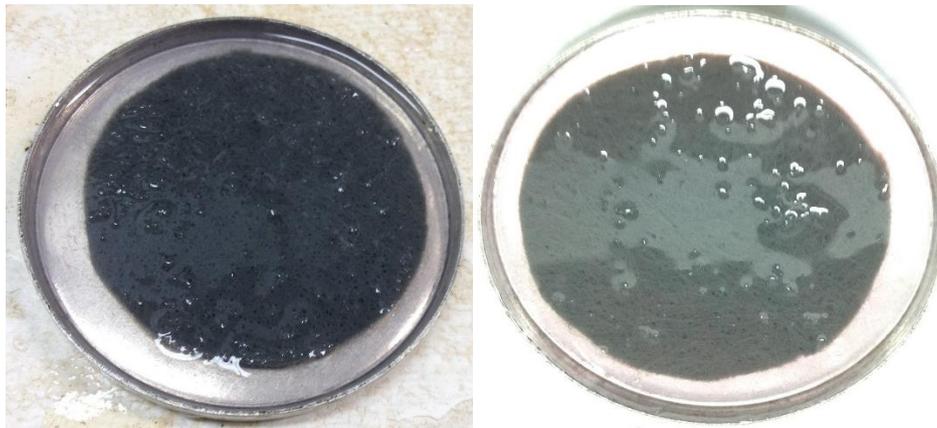


Figura 4.3 Saturação do espécime de geotêxtil em etanol.

4.1.2. IMPREGNAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO (MEV)

As amostras utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial e ponto de bolha foram impregnadas com microesferas de vidro simulando um solo de graduação uniforme ($C_u < 3$), como foi apresentado na Tabela 3.2 e na Figura 3.5. Os tamanhos das microesferas de vidro foram escolhidos em concordância com os tamanhos de poros esperados, levando em conta o encontrado na literatura estudada (Bhatia *et al.*, 1996; Palmeira *et al.* 1996; Gardoni, 2000; Palmeira & Gardoni, 2000; Gardoni & Palmeira, 2002; Messias da Silva, 2014), de tal forma que a maior parte das microesferas de vidro ficassem retidas no geotêxtil, simulando uma condição crítica de impregnação.

O procedimento seguido para a impregnação dos espécimes foi:

- 1) Pesar o espécime de geotêxtil;

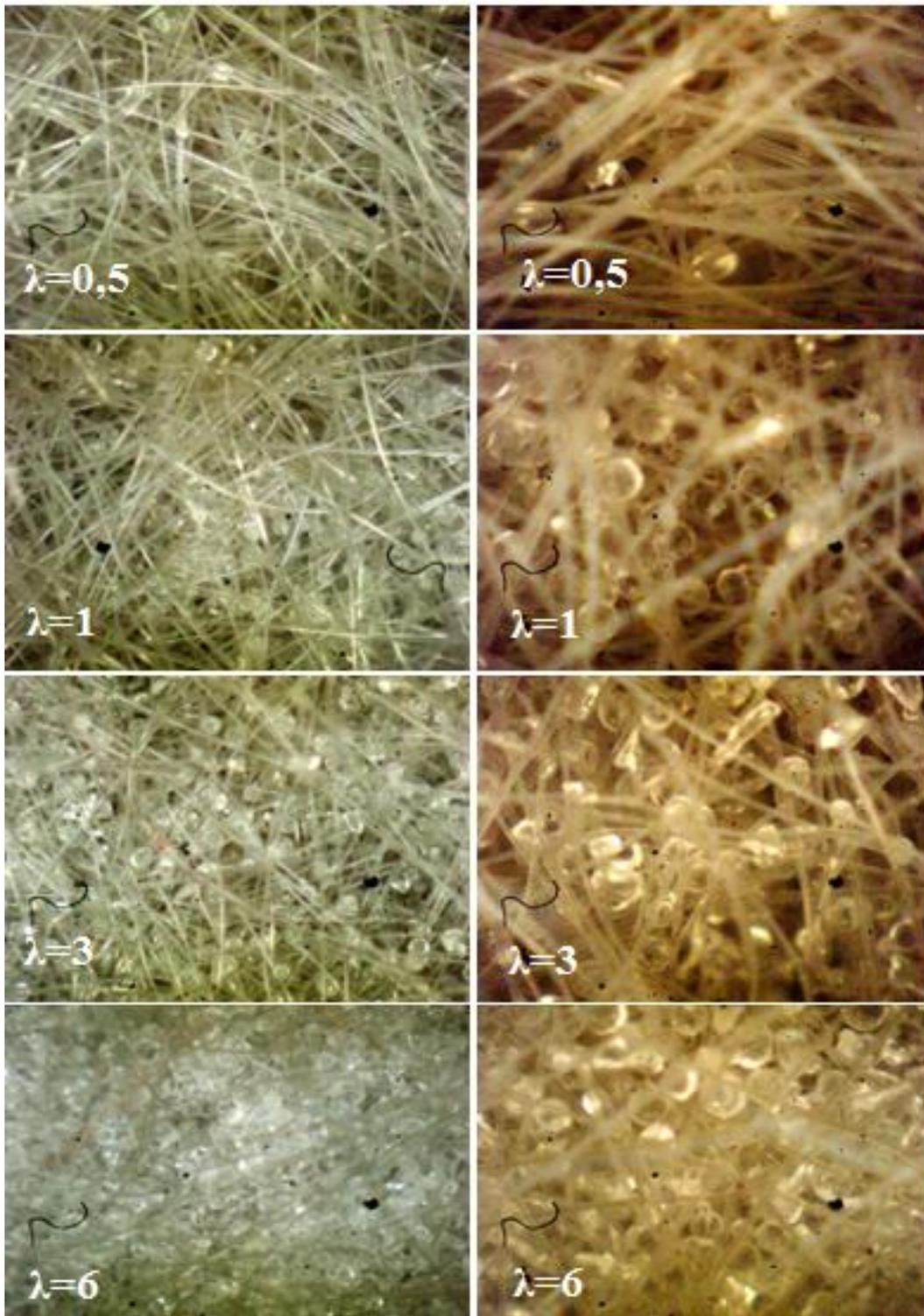
- 2) Estabelecer a quantidade de microesferas de vidro necessária para atingir o nível de impregnação desejado (Tabela 4.1), dada pela relação entre a massa das fibras e a massa das microesferas de vidro (Equação 2.5);
- 3) Colocar as microesferas de vidro sobre o espécime de forma homogênea e vibrar manualmente o conjunto, evitando em todo momento a perda do material;
- 4) Pesar de novo o conjunto para conferir o teor de impregnação; se houve perda de material (microesferas), ele é colocado de novo sobre o geotêxtil.

Tabela 4.1. Teores de impregnação para os geotêxteis analisados

Geotêxtil	Impregnação				
	0	0,5	1	3	6
PP 200	X	X	X	X	
PP 300	X	X	X	X	
PET 200	X	X	X	X	X
PET 300	X	X	X	X	
PET 600	X	X	X		
PET 1200	X	X			
PET 1800	X	X			

É importante destacar que para os geotêxteis com maior gramatura se dificulta a impregnação e, por essa razão, alguns geotêxteis não foram impregnados para todos os teores estabelecidos. Os valores apresentados na Tabela 4.1 também foram utilizados para os geotêxteis comprimidos simulando tensões de 10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa, como será explicado adiante.

Na Figura 4.4 é possível observar como as partículas de microesferas de vidro ficaram aprisionadas nos poros do geotêxtil, reduzindo os diâmetros dos canais de fluxo e, portanto, o espaço para o fluido passar.



(a)

(b)

Figura 4.4. Geotexteis impregnados com microesferas de vidro (a) ampliada 100 vezes, (b) ampliada 200 vezes.

4.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL: AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DO GEOTÊXTIL COM A TENSÃO NORMAL

Os ensaios de compressibilidade foram realizados por meio da aplicação de tensão normal e foram executados no equipamento de adensamento unidimensional. A finalidade do ensaio foi de conhecer a variação da espessura do geotêxtil (limpo e impregnado) quando comprimido com tensões pré-estabelecidas para, posteriormente, simular a mesma condição no ensaio de BBP.

O procedimento completo para a aplicação de tensão normal sobre os espécimes de geotêxteis (limpos e impregnados) consistiu em:

- 1) Pesar os espécimes de geotêxtil, submergi-los em água destilada durante 1 h, e depois deixá-los secar. O espécime deve estar completamente seco antes do ensaio. Pesar o espécime depois de secagem ao ar, até que um peso igual ao seu peso inicial seja alcançado. Para o caso do geotêxtil impregnado, seguir o procedimento descrito no item 4.1.2;
- 2) Fazer o equilíbrio da prensa, verificando por nível de bolha colocado sobre o braço da prensa;
- 3) Colocar o espécime de geotêxtil sobre um calço posicionado na base da prensa e colocar o cabeçote rígido de carregamento sobre o geotêxtil para garantir a aplicação uniforme do carregamento;
- 4) Posicionar o marco da prensa sobre o cabeçote e posicionar o extensômetro sobre o marco colocando o valor de deslocamentos em zero para iniciar a leitura de variação de espessura nominal do geotêxtil;
- 5) Colocar pesos no braço em estágios para atingir tensão normal de: 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1000 kPa, 1400 kPa e 1700 kPa, aumentando-se lentamente e deixando estabilizar as deformações até se atingir a tensão máxima de ensaio. Para esta pesquisa foi usada uma razão de 1:10 para o carregamento, ou seja, que a amostra recebia 10 vezes o peso colocado;
- 6) Para cada um dos estágios de pressão, fazer as leituras no extensômetro e anotar valores de tensão normal e a variação de espessura nominal (t_{GT}) do espécime até sua estabilização;
- 7) Reduzir a tensão de acordo com os procedimentos de aplicação da tensão normal;
- 8) Remover o espécime de geotêxtil da base.

4.3. ENSAIO DE *BUBBLE POINT* COM VARIAÇÃO DE ESPESSURA DO GEOTÊXTIL E IMPREGNAÇÃO COM MICROESFERAS DE VIDRO

4.3.1. LÍQUIDO DE SATURAÇÃO

De acordo com o que foi citado no capítulo 2, e como encontrado por Messias da Silva (2014), é importante usar um fluido de baixa viscosidade na execução de ensaios para obter resultados mais acurados. É importante garantir que o ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil seja realmente próximo de zero, já que um erro na estimação desse parâmetro pode levar a valores de abertura de filtração distantes dos reais (Figura 2.16). Por essa razão, foi usado etanol como líquido de saturação, cuja tensão superficial foi calculada segundo o trabalho de Perez *et al.* (2010). Baseados na literatura e ensaios de laboratório estes autores desenvolveram um modelo ajustado para o cálculo da tensão superficial do etanol em função da temperatura (entre 0 e 60 °C), resultando na seguinte equação:

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

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

4.3.2. SIMULAÇÃO DE TENSÃO - REDUÇÃO DE ESPESSURA

Em concordância com a metodologia usada por Messias da Silva (2014), após obter os valores da variação de espessura dos geotêxteis com relação à tensão normal, foram simuladas as condições de compressão do material para realizar o ensaio de ponto de bolha, reduzindo-se a espessura do espécime por meio de duas telas metálicas costuradas na amostra; desta forma, o geotêxtil era comprimido obtendo-se um novo valor de espessura nominal (t_{GT}) correspondente ao que este teria se estivesse submetido a determinada tensão normal. Esta redução de espessura foi feita para simular 4 condições de tensão (10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa). A Figura 4.5 apresenta o espécime de geotêxtil comprimido.



Figura 4.5. Geotêxtil comprimido para controle da espessura das amostras durante a realização do ensaio de *Bubble Point* para simular compressão sob tensão.

É importante frisar que a presença das telas metálicas e das costuras no geotêxtil, para fins práticos, não interferiram no resultado de obtenção da abertura de filtração do material, como foi demonstrado por Messias da Silva (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Verificação da não influência da tela metálica e da costura na obtenção de dados de abertura de filtração (Messias da Silva, 2014).

	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

4.3.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio de BBP foi o mesmo adotado por Messias da Silva (2014), baseado na norma D 6767 (ASTM, 2014), com a variação da espessura e a impregnação do geotêxtil:

- 1) Colocar o espécime seco de geotêxtil impregnado com microesferas de vidro e comprimido pela tela superior e inferior na base da célula; no caso dos geotêxteis virgens, eles são colocados diretamente sobre a placa perfurada 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 a evitar vazamentos de ar;
- 4) Verificar se o manômetro está com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m na fita métrica;
- 5) Aplicar valores conhecidos de pressão aumentando-se 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 (etanol) por um período de 30 min;
- 9) Colocar o geotêxtil saturado na célula;
- 10) Colocar a célula dentro de um reservatório plástico totalmente preenchido com etanol, garantindo-se a saturação.
- 11) Retirar o reservatório plástico e logo após aplicar valores conhecidos de pressão aumentando-a lentamente até se atingir 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

Conforme descrito nos capítulos anteriores, foram realizados diferentes tipos de ensaios para a determinação da curva da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos de diferentes gramaturas e materiais, sob condições de impregnação e confinamento, com o objetivo de avaliar o comportamento deste parâmetro conjuntamente com a sua compressibilidade.

Para obter resultados acurados na execução dos ensaios de ponto de bolha, foi realizada a calibração do procedimento utilizando um material de abertura conhecida. Nesse caso foi usada a tela da peneira #170, (abertura: 0,090mm segundo a norma E 11, ASTM 2013). Além disso, para várias amostras virgens, foram refeitos ensaios com o intuito de avaliar a repetibilidade do ensaio.

5.1. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL: AVALIAÇÃO DE ESPESSURA SOB VARIAÇÃO DE TENSÃO NORMAL

Com o fim de avaliar a compressibilidade do material, tanto virgem como sob diferentes níveis de impregnação, foram executados ensaios de compressão uniaxial e foi verificada a variação da espessura do geotêxtil para tensões de 5, 10, 15, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1400 e 1700 kPa. Foram feitos 6 ensaios em espécimes diferentes para cada um dos geotêxteis.

A seguir são apresentados os resultados de compressibilidade para a amostra G1 (PP 200 g/m²), para o geotêxtil virgem, $\lambda = 0$ (Figura 5.1), $\lambda = 0.5$ (Figura 5.2), $\lambda = 1$ (Figura 5.3) e $\lambda = 3$ (Figura 5.4). A partir destes resultados foi obtida a média da espessura versus tensão normal para cada nível de impregnação da amostra G1. Todos os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.5

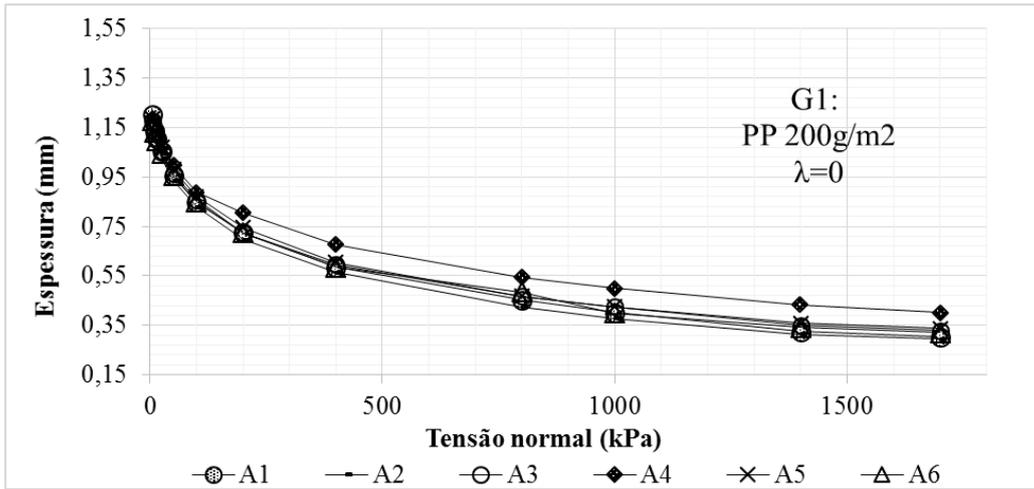


Figura 5.1 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m² (virgem).

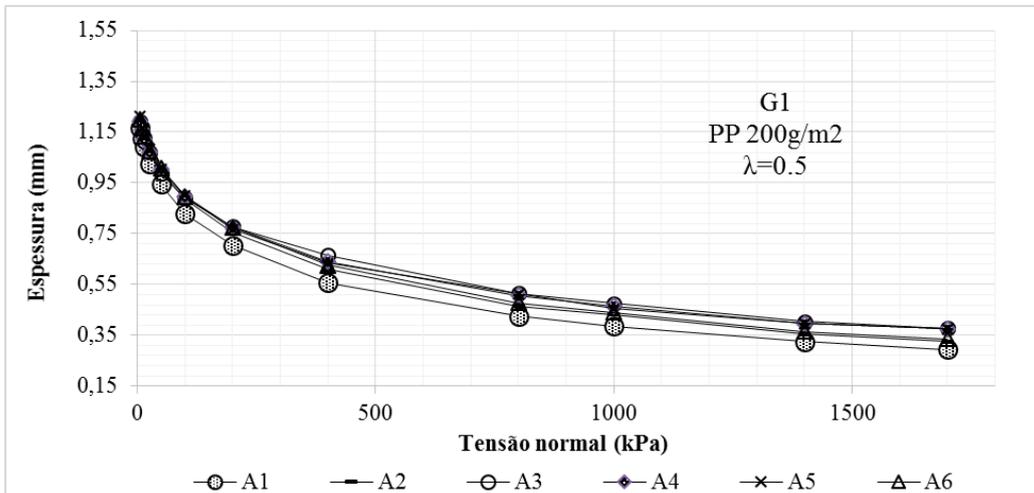


Figura 5.2 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m² (λ=0,5).

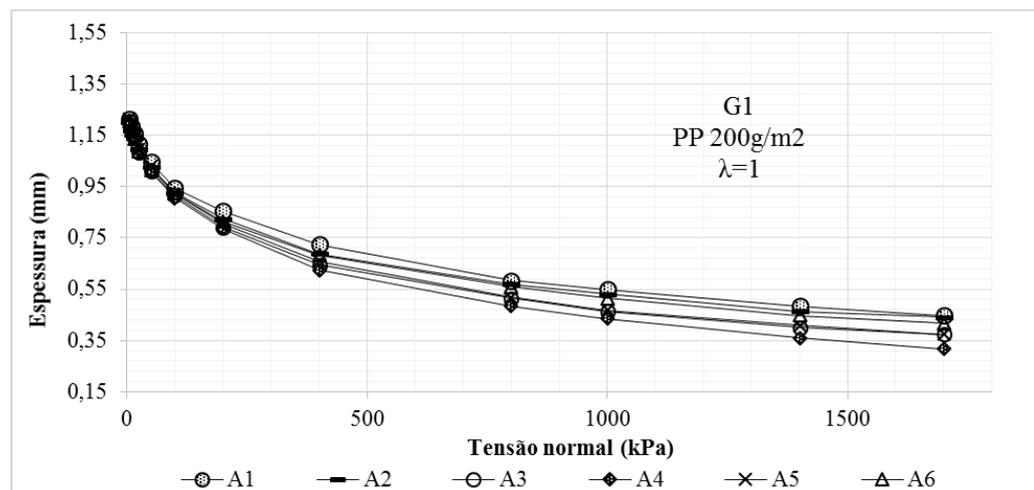


Figura 5.3 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m² (λ=1).

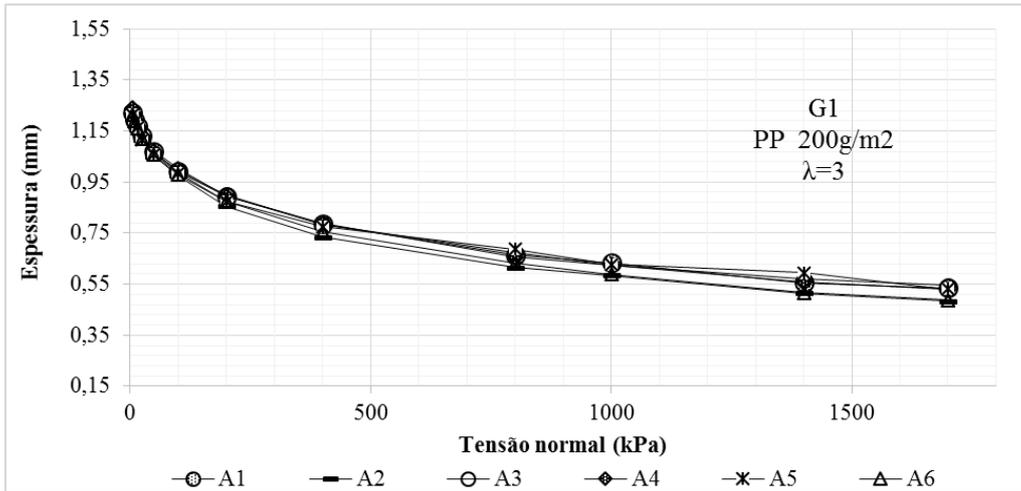


Figura 5.4 Variação da espessura com a tensão normal para o geotêxtil G1 – PP200g/m² ($\lambda=3$).

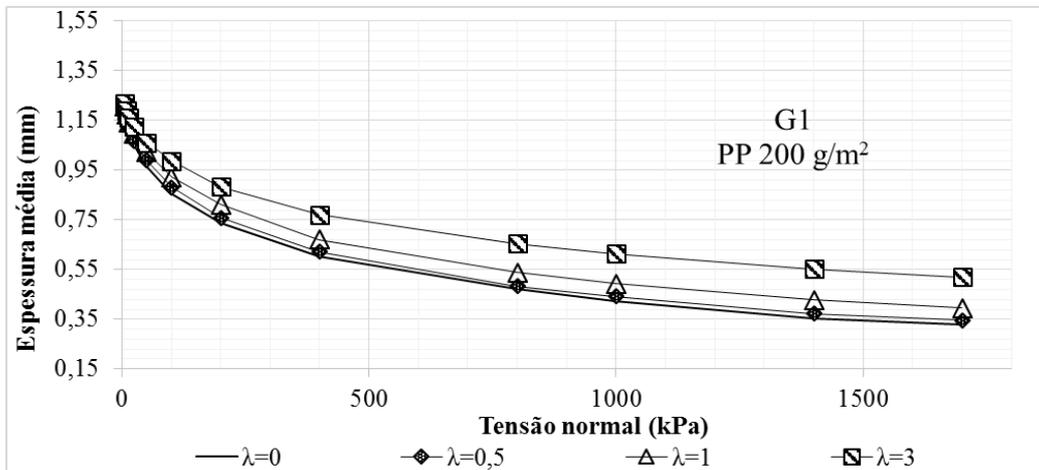


Figura 5.5 Variação da espessura média com a tensão normal para G1– PP 200g/m²

Do mesmo modo empregado para o geotêxtil G1, foram realizados ensaios para os demais geotêxteis. A Figura 5.7 apresenta os resultados médios obtidos para a amostra G2. Os gráficos individuais para diferentes valores de λ podem ser encontrados no APÊNDICE A.

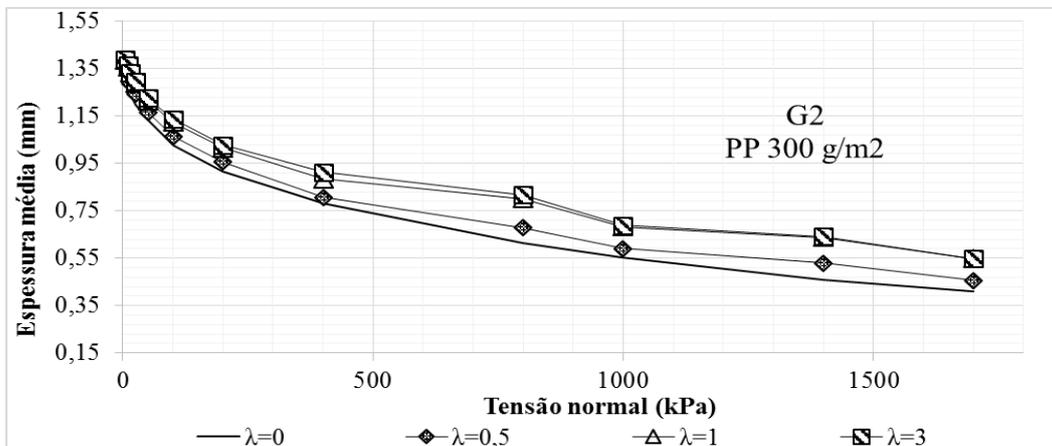


Figura 5.6 Variação da espessura média com a tensão normal para G2– PP 300g/m²

Nas Figuras 5.7 a 5.11 se observam os resultados médios obtidos para as amostras G3, G4, G5, G6 e G7, respectivamente.

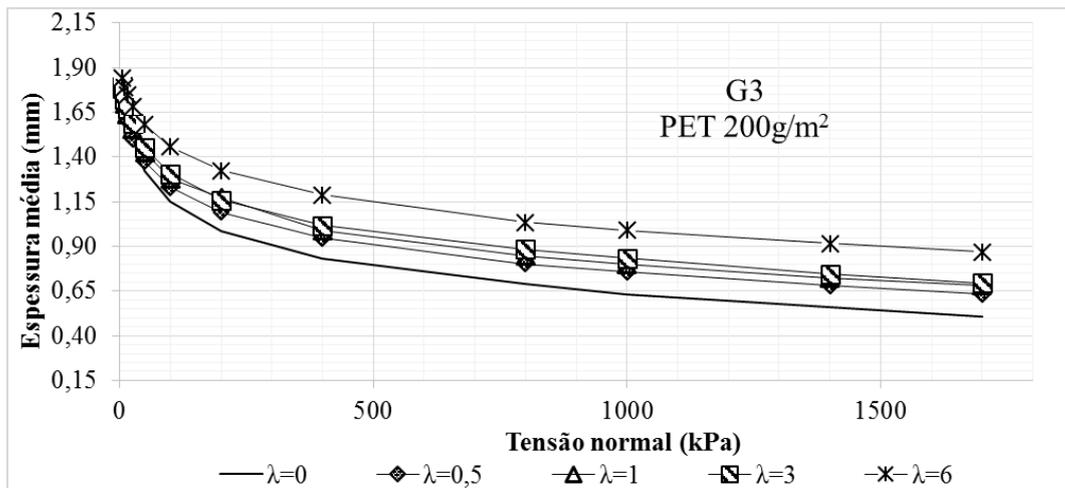


Figura 5.7 Variação da espessura média com a tensão normal para G3– PET 200g/m²

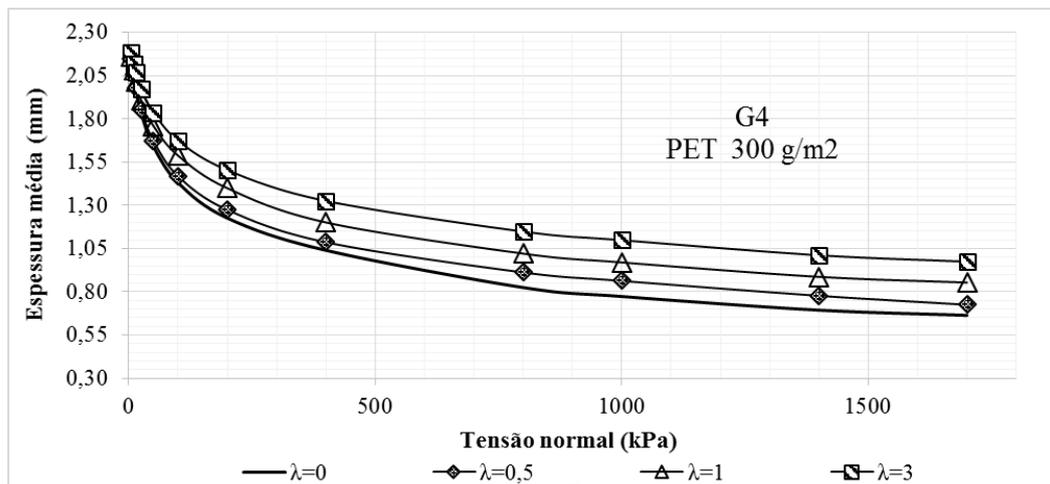


Figura 5.8 Variação da espessura média com a tensão normal para G4– PET 300g/m²

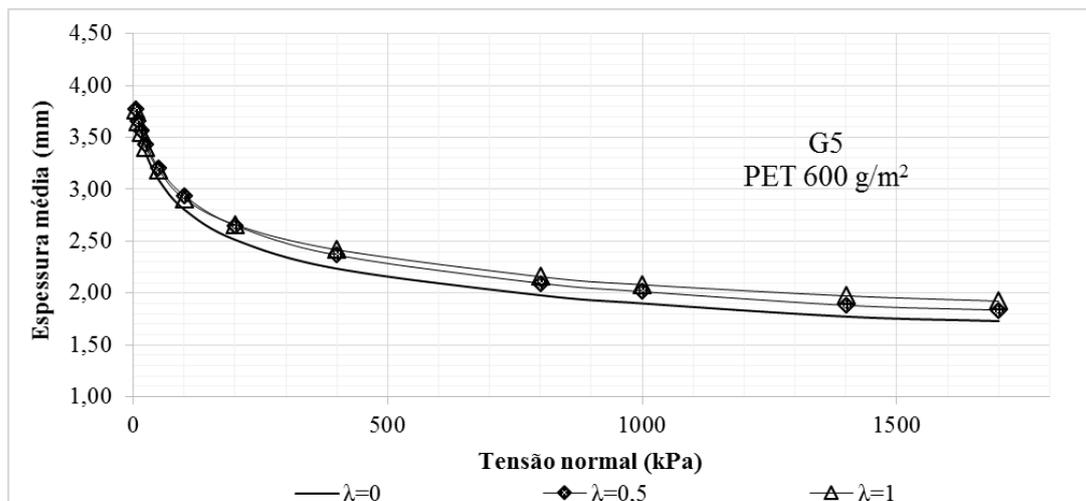


Figura 5.9 Variação da espessura média com a tensão normal para G5– PET 600g/m²

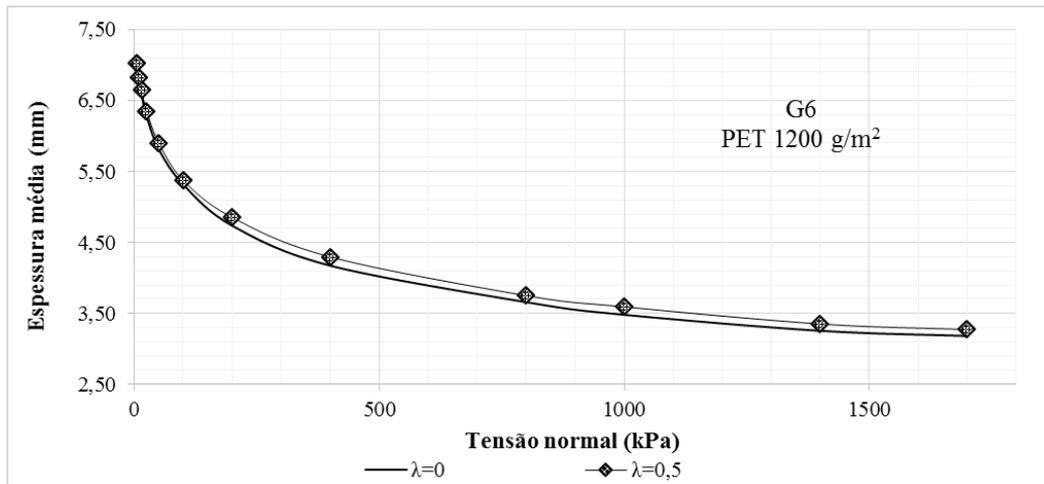


Figura 5.10 Variação da espessura média com a tensão normal para G6– PET 1200g/m²

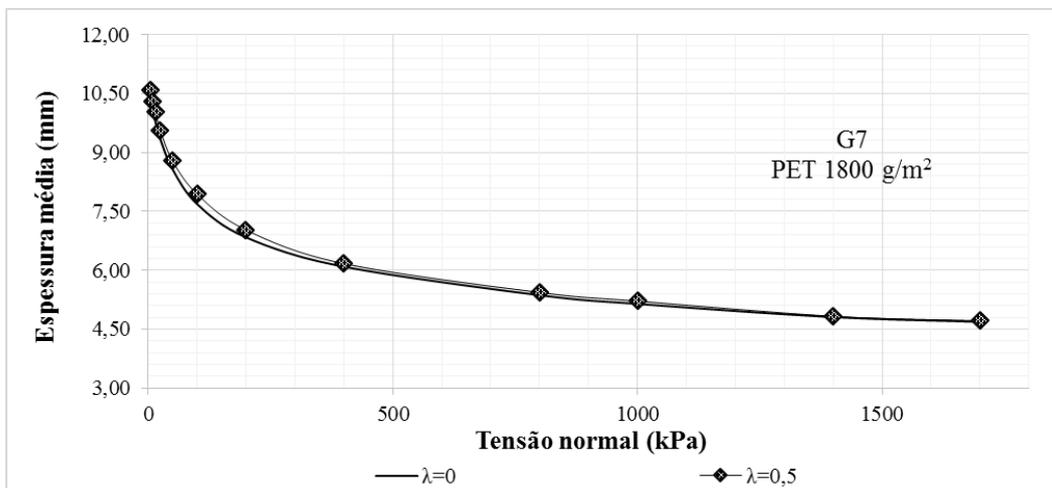


Figura 5.11 Variação da espessura média com a tensão normal para G7– PET 1800g/m²

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores, em porcentagem, da redução da espessura ao final do teste de compressibilidade. Pode-se observar que mesmo sendo de materiais diferentes, os dois geotêxteis de 300g/m² apresentam compressibilidades muito parecidas, exceto para o teor de impregnação $\lambda=3$. No caso dos geotêxteis de poliéster, eles mostram redução na compressibilidade com o aumento da gramatura (G3, G4 e G5). Por outro lado, as combinações de duas e três camadas de geotêxtil de 600g/m² (G6 e G7) mostraram reduções percentuais de espessuras semelhantes às de uma só camada de 600g/m². Adicionalmente, a compressibilidade dos geotêxteis diminuiu com o aumento do nível de impregnação. Isso aconteceu devido à presença das microesferas de vidro nos vazios do geotêxtil, o que restringe a movimentação das fibras, tornando o geotêxtil menos compressível.

Tabela 5.1. Porcentagem de redução da espessura à máxima tensão aplicada

Geotêxtil		% redução de espessura a 1700kPa				
		$\lambda=0$	$\lambda=0,5$	$\lambda=1$	$\lambda=3$	$\lambda=6$
G1	PP 200	72	71	67	57	
G2	PP 300	69	67	60	61	
G3	PET 200	72	64	62	61	53
G4	PET300	69	66	61	55	
G5	PET600	54	51	49		
G6	PET1200	55	53			
G7	PET1800	55	55			

5.2. ENSAIOS DE *BUBBLE POINT*: CALIBRAÇÃO E REPETIBILIDADE

Com a finalidade de avaliar a acurácia do ensaio, houve a necessidade de execução de um ensaio em branco para a calibração do equipamento. Para isso, utilizou-se a peneira #170 como amostra de referência para execução desta etapa. A Figura 5.12 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com a peneira, e a Figura 5.13 apresenta a distribuição dos tamanhos das aberturas da tela considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha.

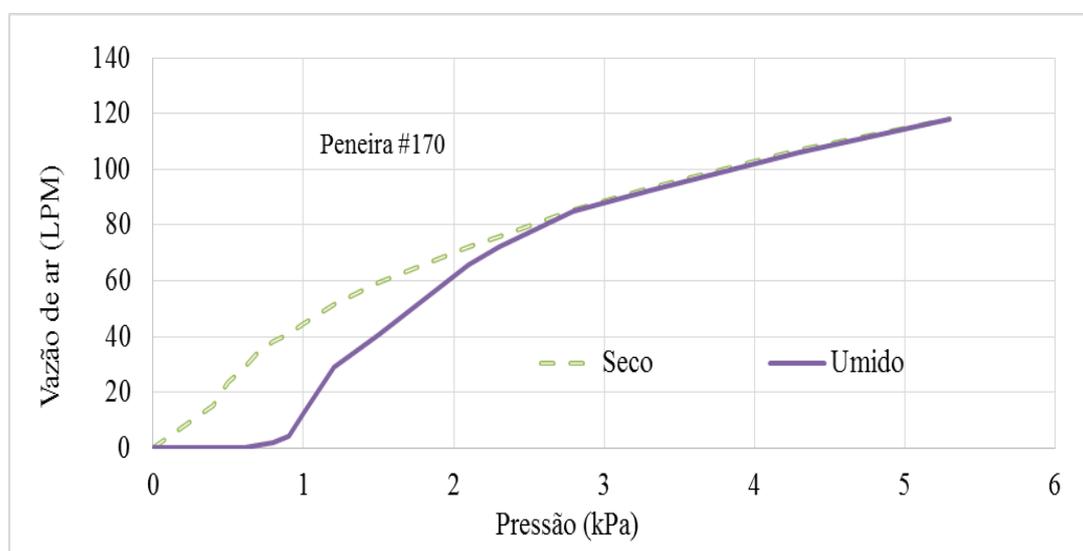


Figura 5.12 Vazão de ar versus pressão – Peneira #170.

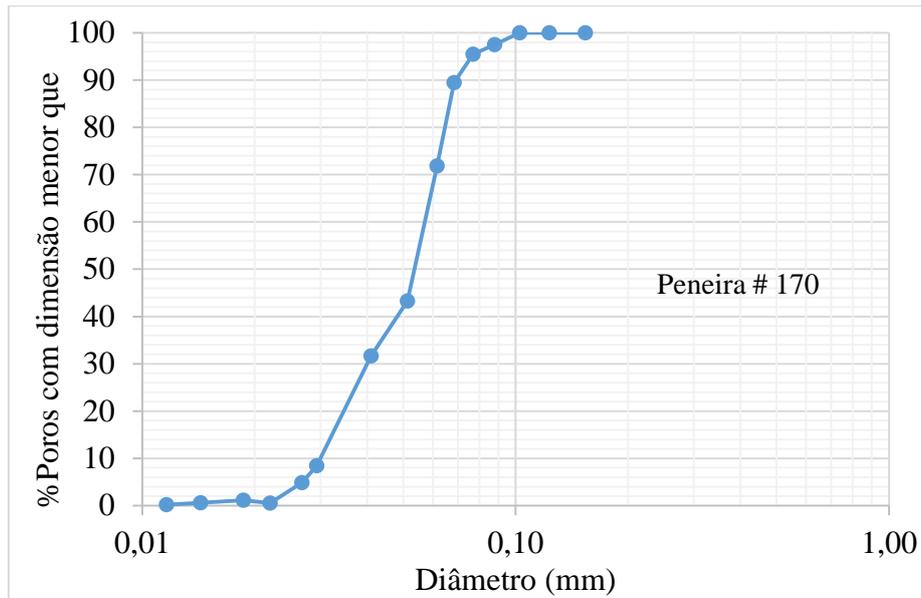


Figura 5.13 Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170.

Pela Figura 5.13, pode-se considerar $O_{98} = 0,0908$ mm para a peneira #170, que de acordo com a norma E11 (ASTM, 2013) se deve encontrar entre $0,090\text{mm} \pm 0,032\text{mm}$. Este ensaio foi fundamental para conferir a acurácia dos resultados dos ensaios e estabelecer o procedimento adequado.

Foram feitos cinco ensaios no geotêxtil PP 200 g/m^2 virgem, com o fim de conferir a repetibilidade do ensaio de ponto de bolha. Os resultados de vazão de ar versus pressão destes ensaios são apresentados na Figura 5.14, e a distribuição dos tamanhos de abertura são mostradas na Figura 5.15.

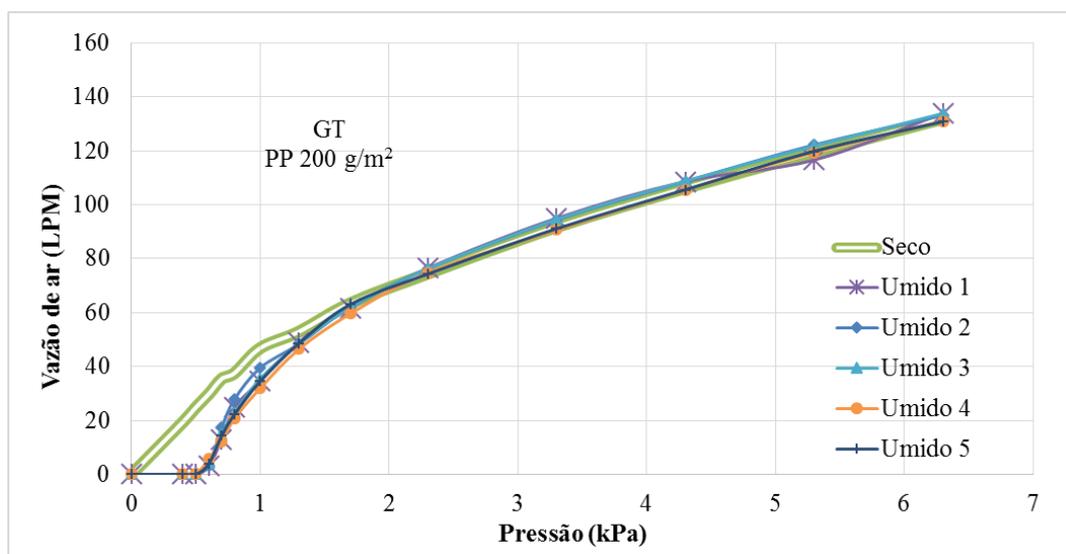


Figura 5.14 Vazão de ar versus pressão – GT PP 200 g/m^2

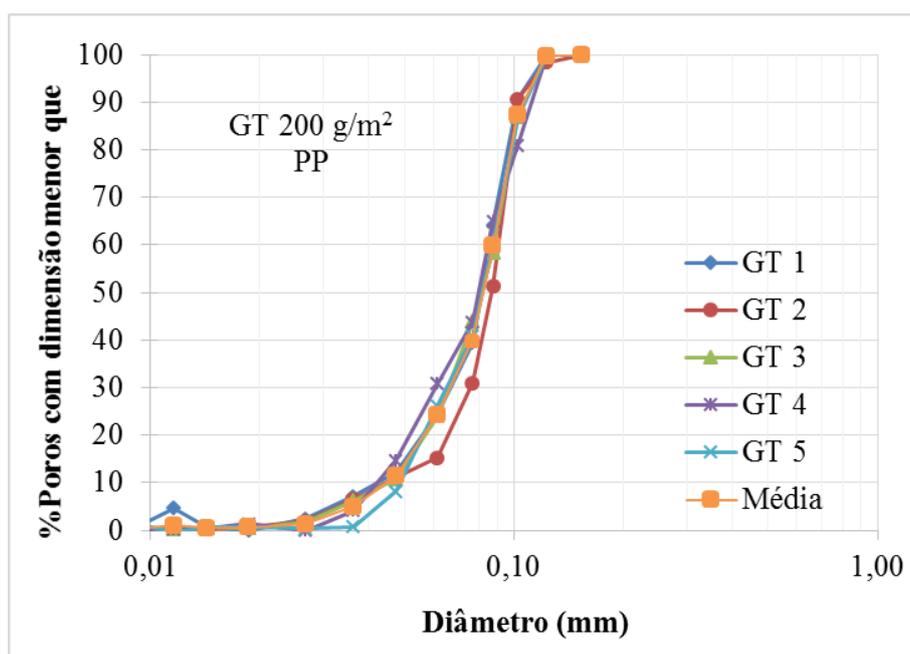


Figura 5.15 Repetibilidade do ensaio: curva de distribuição das aberturas de GT PP 200 g/m².

Os valores das aberturas de filtração obtidas da Figura 5.15 são apresentadas na Tabela 5.2, na qual é possível observar que os ensaios apresentam excelente repetibilidade.

Tabela 5.2. Aberturas de filtração geotêxtil PP 200g /m².

Amostra	O ₉₈ (mm)	O ₉₅ (mm)
GT1	0,1186	0,1119
GT2	0,1220	0,1139
GT3	0,1199	0,1152
GT4	0,1208	0,1176
GT5	0,1198	0,1151
Média	0,1202	0,1147

Com estes dois experimentos foi conferida a acurácia e repetibilidade do ensaio de ponto de bolha. A partir destes ensaios foi possível fazer os ensaios para situações distintas, tanto de impregnação como confinamento dos geotêxteis.

5.3. ENSAIOS DE *BUBBLE POINT*: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL

Para a avaliação da influência da impregnação do geotêxtil, foram utilizadas microesferas de vidro, como apresentado no Capítulo 3; os espécimes foram impregnados por meio de vibração manual, procurando a uniformidade de sua distribuição no geotêxtil. O espécime impregnado foi então ensaiado no equipamento de ponto de bolha, cuidando-se sempre para evitar a perda de material.

Inicialmente foram realizados ensaios de ponto de bolha para espécimes virgens de todas as amostras, com a finalidade de ter um valor de comparação e poder avaliar a influência da impregnação na abertura de filtração dos geotêxteis.

A Figura 5.16 representa a variação do fluxo de ar de acordo com cada nível de impregnação sobre o geotêxtil G1 e a Figura 5.17 mostra as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os ensaios saturados para este geotêxtil.

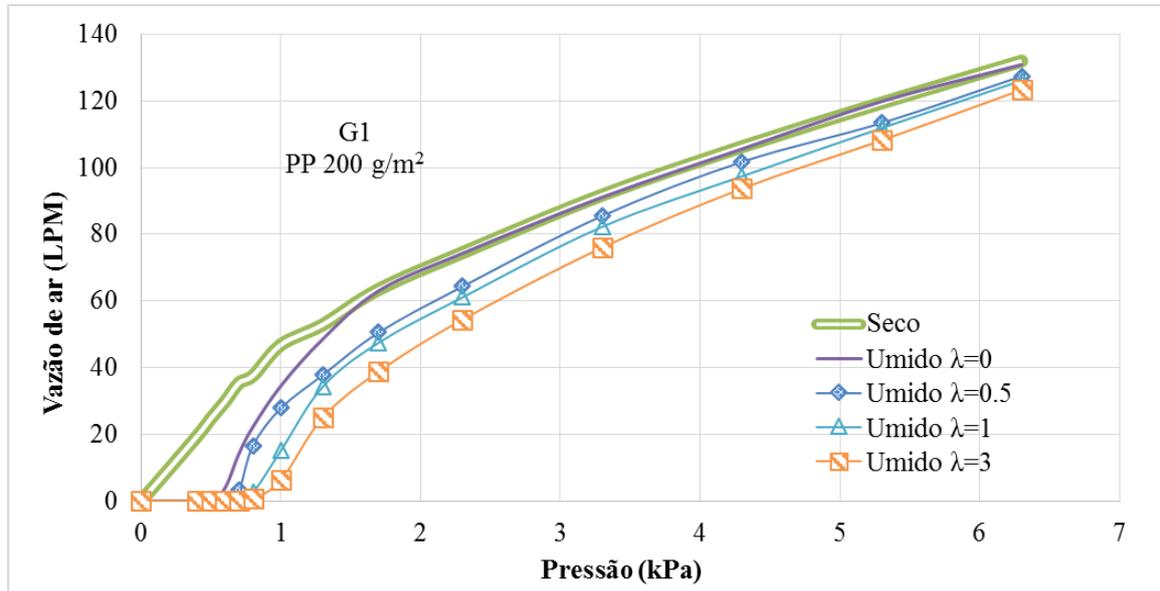


Figura 5.16 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 200 g/m² impregnado.

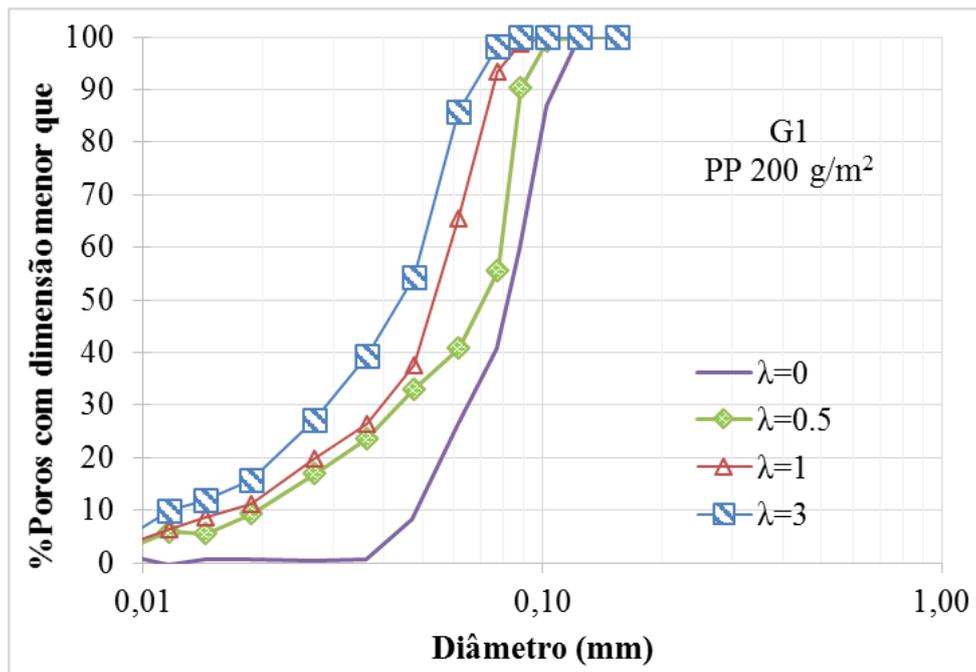


Figura 5.17 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 200 g/m² impregnado.

A Figura 5.18 apresenta a variação do fluxo de ar de acordo com cada nível de impregnação sobre o geotêxtil G2. Já a Figura 5.19 apresenta as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os ensaios saturados para a amostra G2. De forma análoga aos geotêxteis anteriores, as Figuras 5.20 a 5.29 apresentam resultados de variação de fluxo de ar e distribuição de poros para os demais geotêxteis.

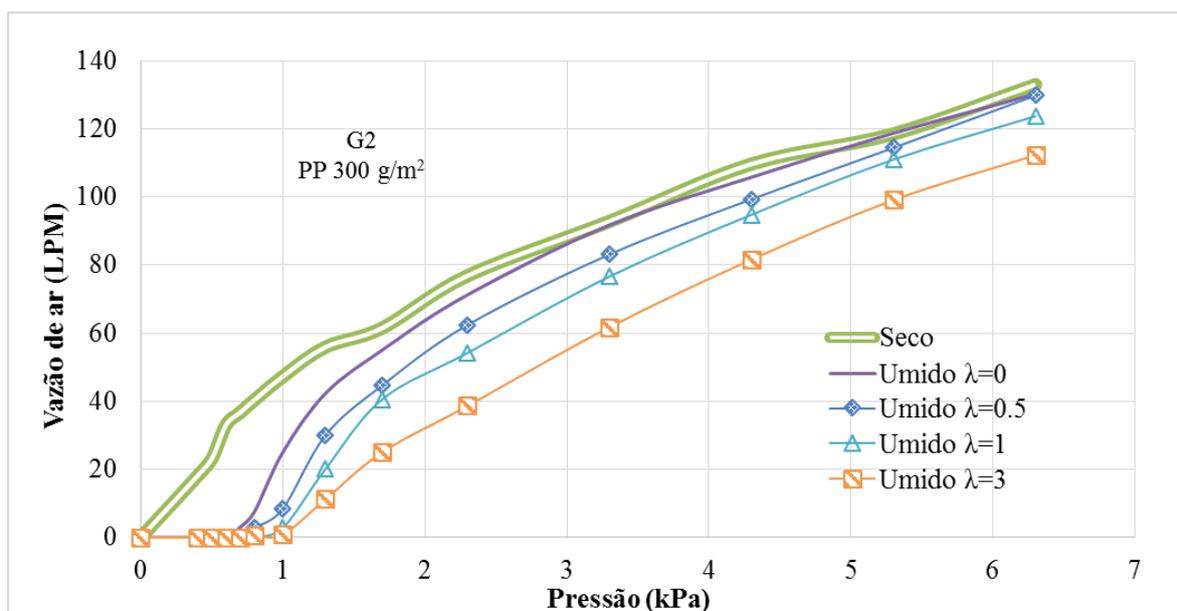


Figura 5.18 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 300 g/m² impregnado.

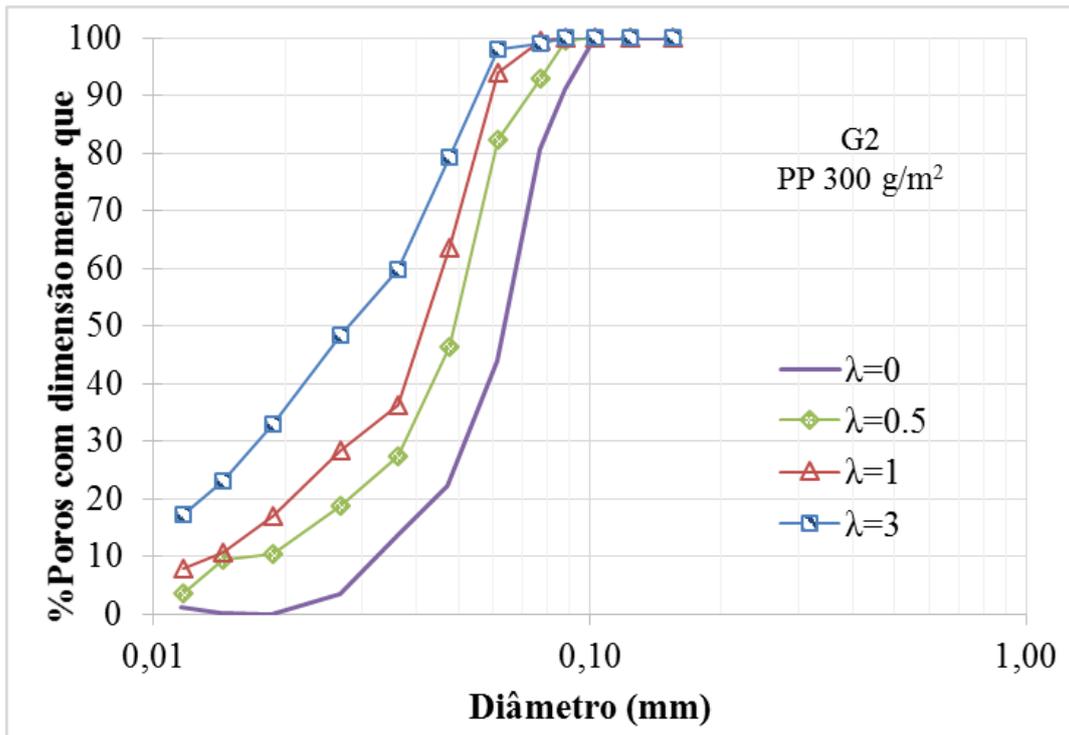


Figura 5.19 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 300 g/m² impregnado.

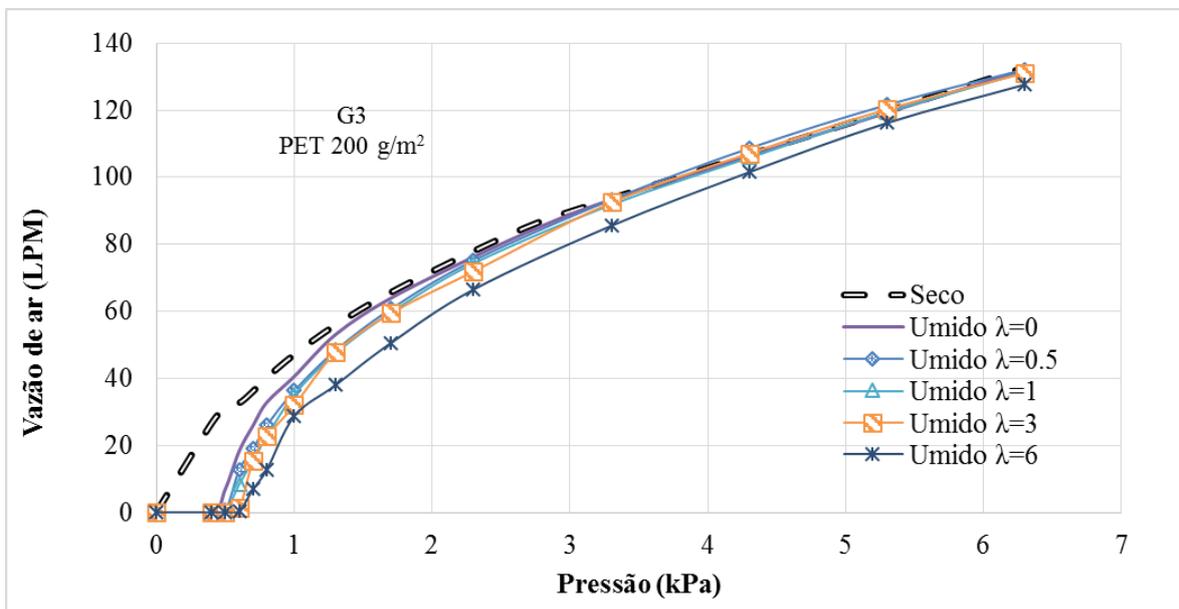


Figura 5.20 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 200 g/m² impregnado.

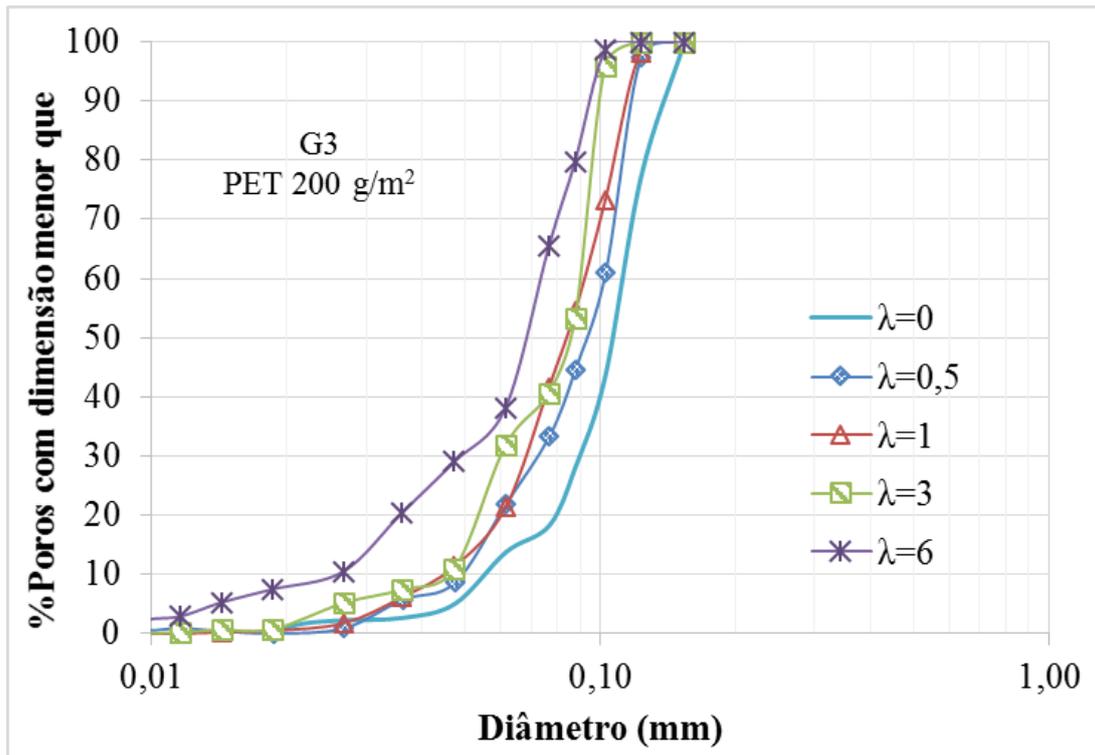


Figura 5.21 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 200 g/m² impregnado.

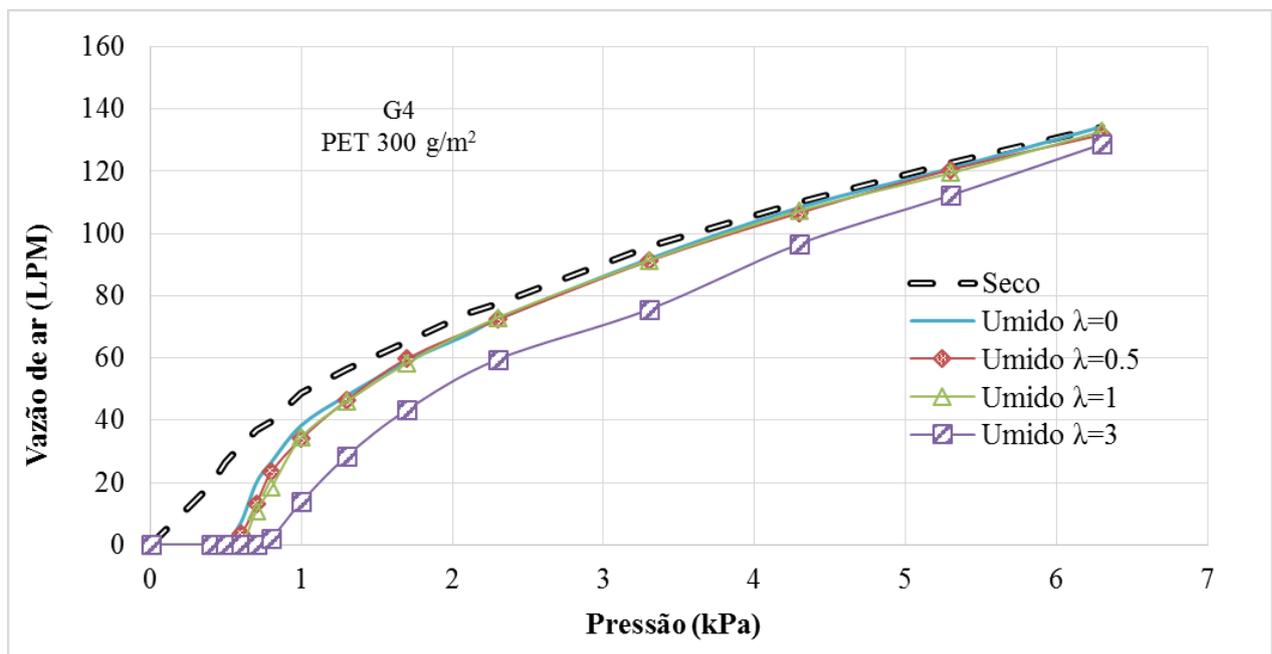


Figura 5.22 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 300 g/m² impregnado.

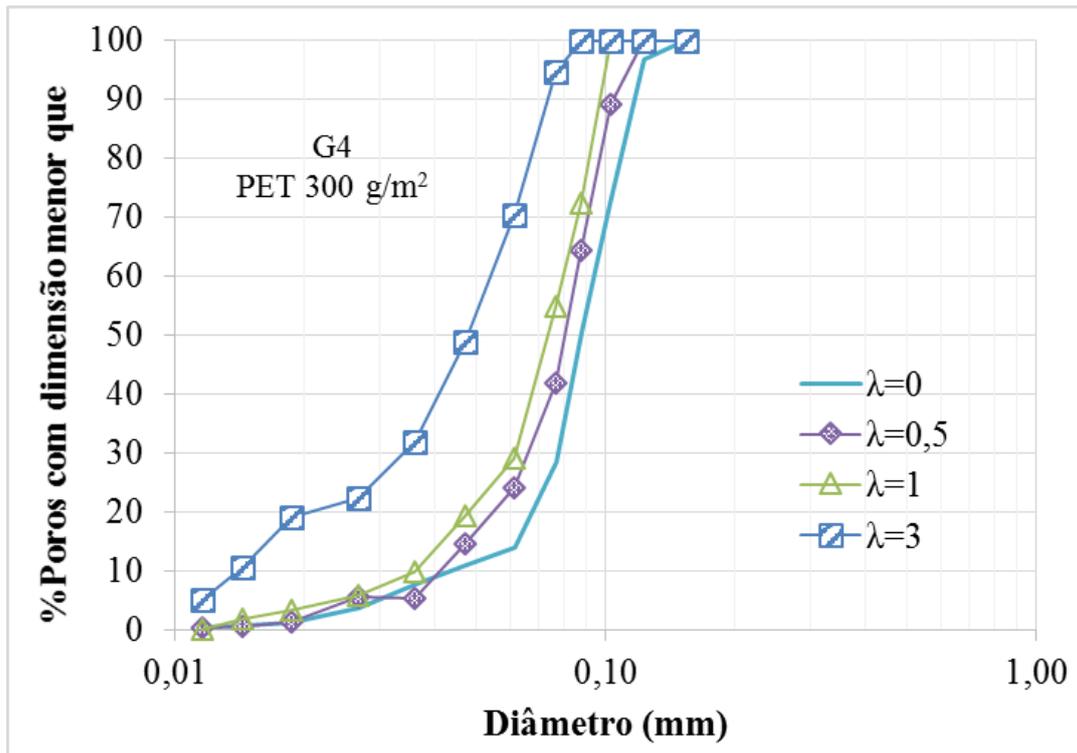


Figura 5.23 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 300 g/m² impregnado.

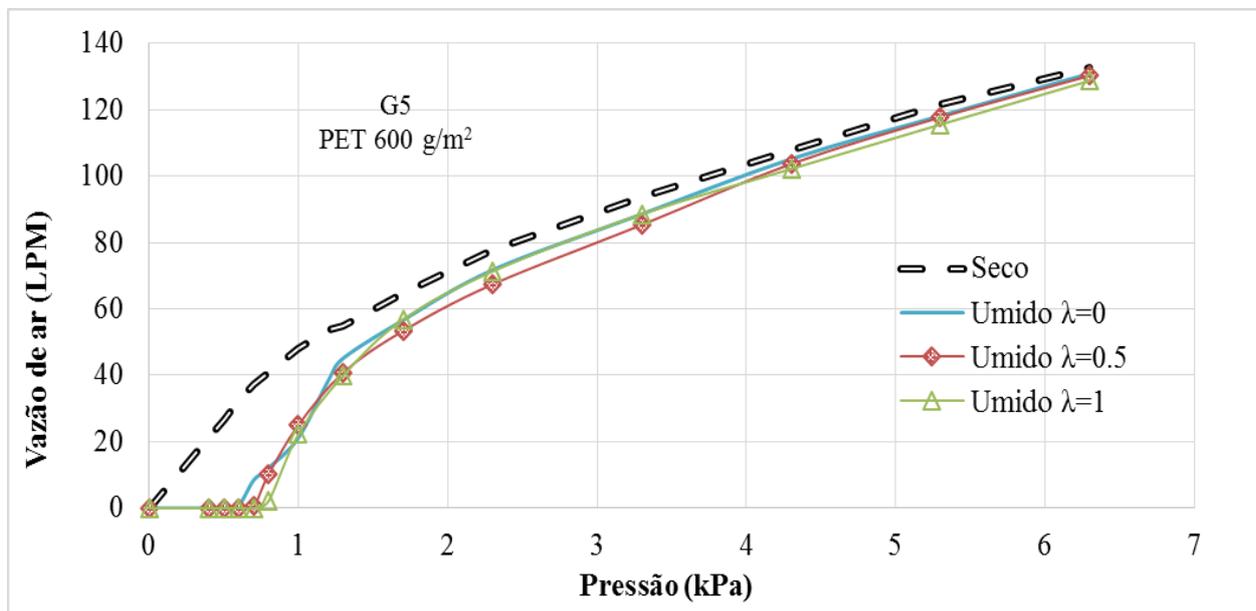


Figura 5.24 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 600 g/m² impregnado.

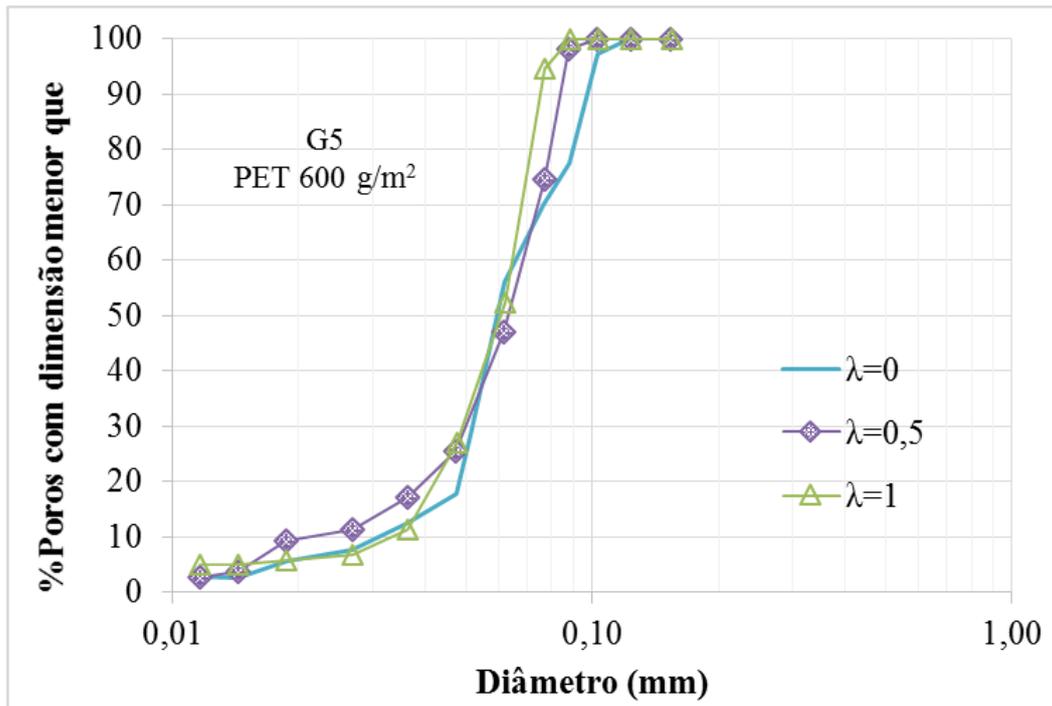


Figura 5.25 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 600 g/m² impregnado.

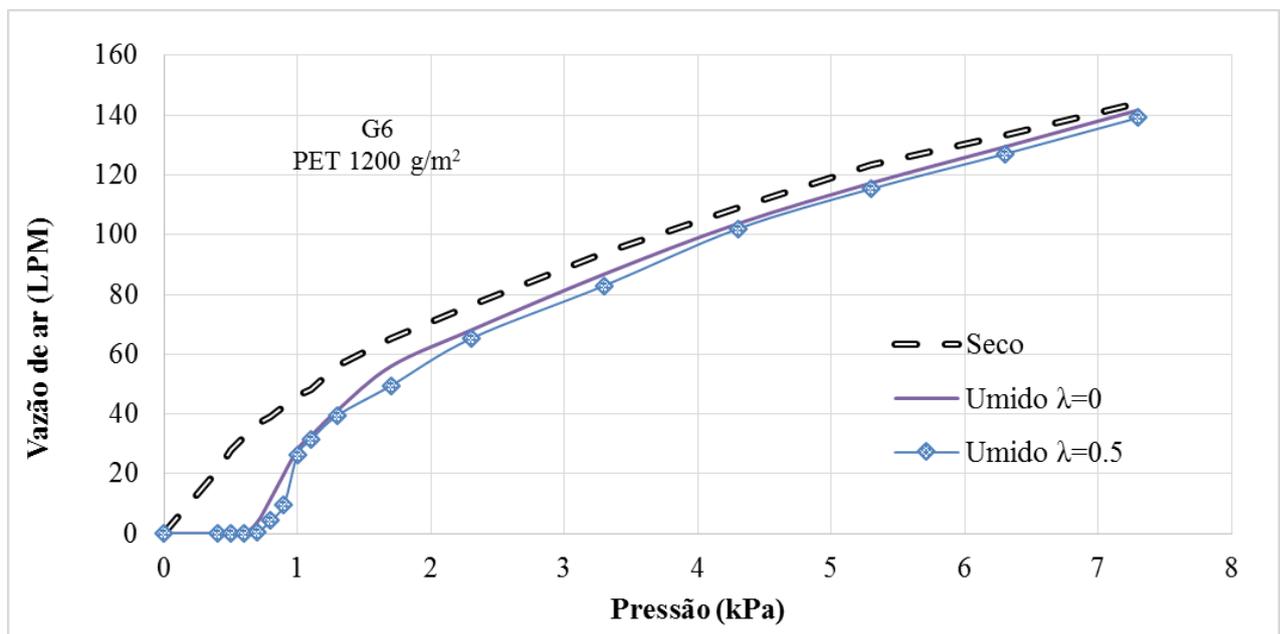


Figura 5.26 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1200 g/m² impregnado.

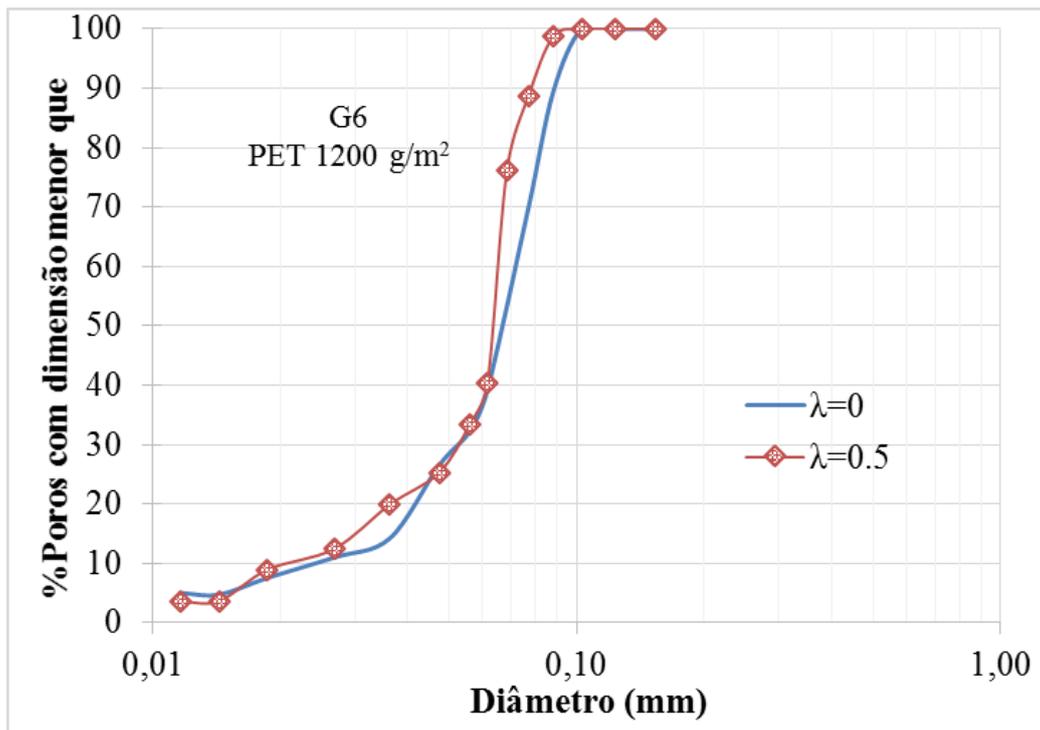


Figura 5.27 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1200 g/m² impregnado.

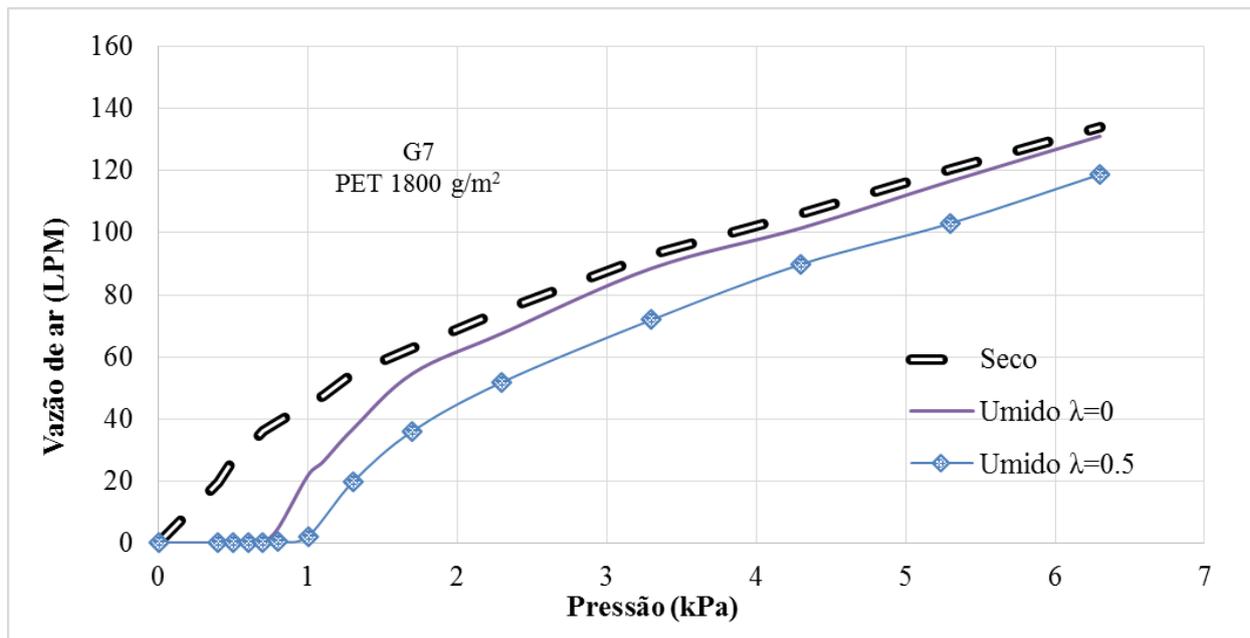


Figura 5.28 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1800 g/m² impregnado.

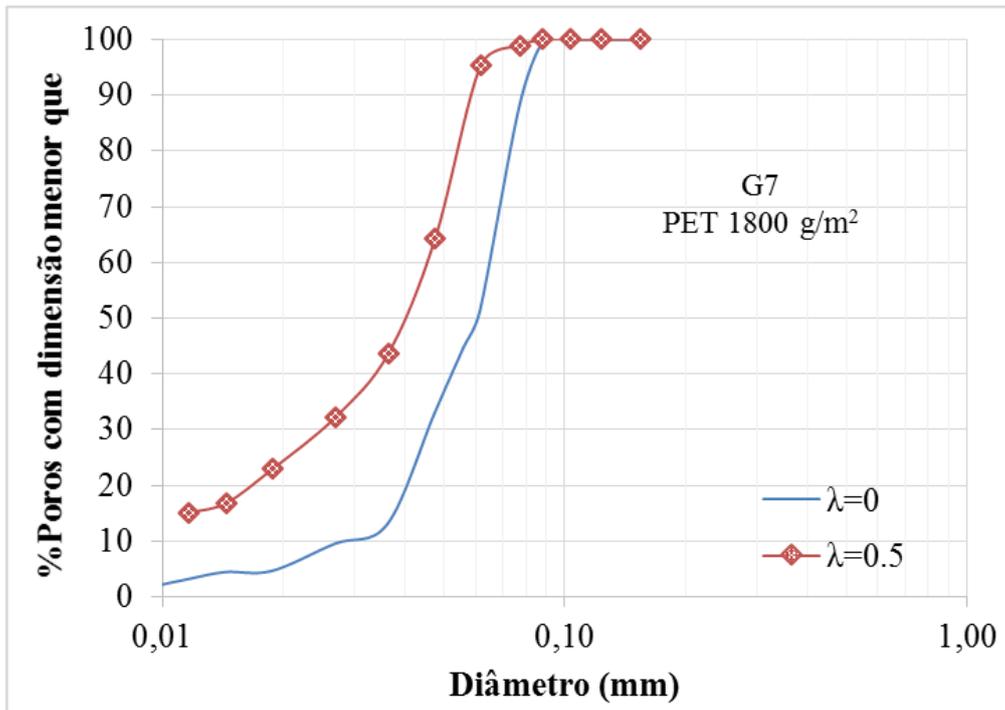


Figura 5.29 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1800 g/m² impregnado.

As Tabelas 5.3 e 5.4 resumem os valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os espécimes virgens e impregnados, que mostram a redução de O_{95} e O_{98} com o aumento do nível de impregnação do geotêxtil.

Tabela 5.3 Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis impregnados.

λ	O_{98} (mm)						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
0	0,120	0,099	0,151	0,135	0,110	0,100	0,087
0,5	0,100	0,086	0,130	0,119	0,088	0,087	0,073
1	0,087	0,073	0,122	0,101	0,084		
3	0,077	0,062	0,113	0,084			
6			0,102				

Tabela 5.4 Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis impregnados.

λ	O_{95} (mm)						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
0	0,115	0,094	0,147	0,130	0,101	0,096	0,084
0,5	0,096	0,081	0,122	0,113	0,086	0,084	0,062
1	0,080	0,065	0,120	0,100	0,078		
3	0,073	0,059	0,102	0,078			
6			0,100				

A partir dos resultados anteriores foi possível obter a variação da abertura de filtração com o nível de impregnação. Os resultados são apresentados na Figura 5.30 (O_{98}) e na Figura 5.31 (O_{95}). Os resultados mostram significativas reduções na abertura de filtração dos geotêxteis com o aumento do nível de impregnação.

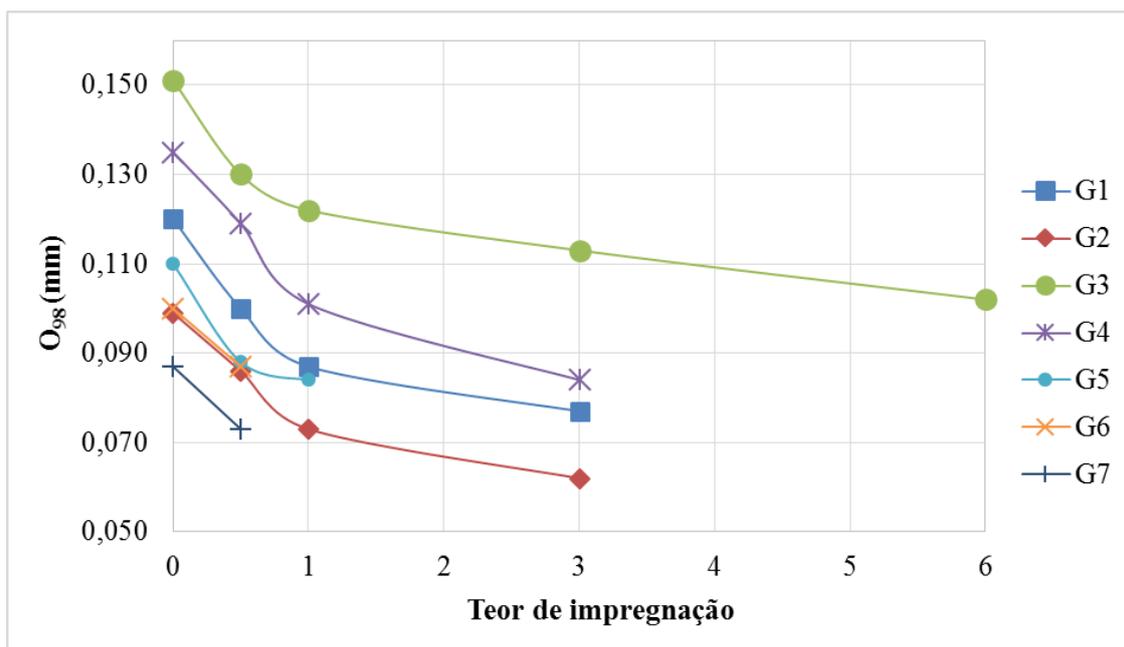


Figura 5.30 Variação do O_{98} com o nível de impregnação.

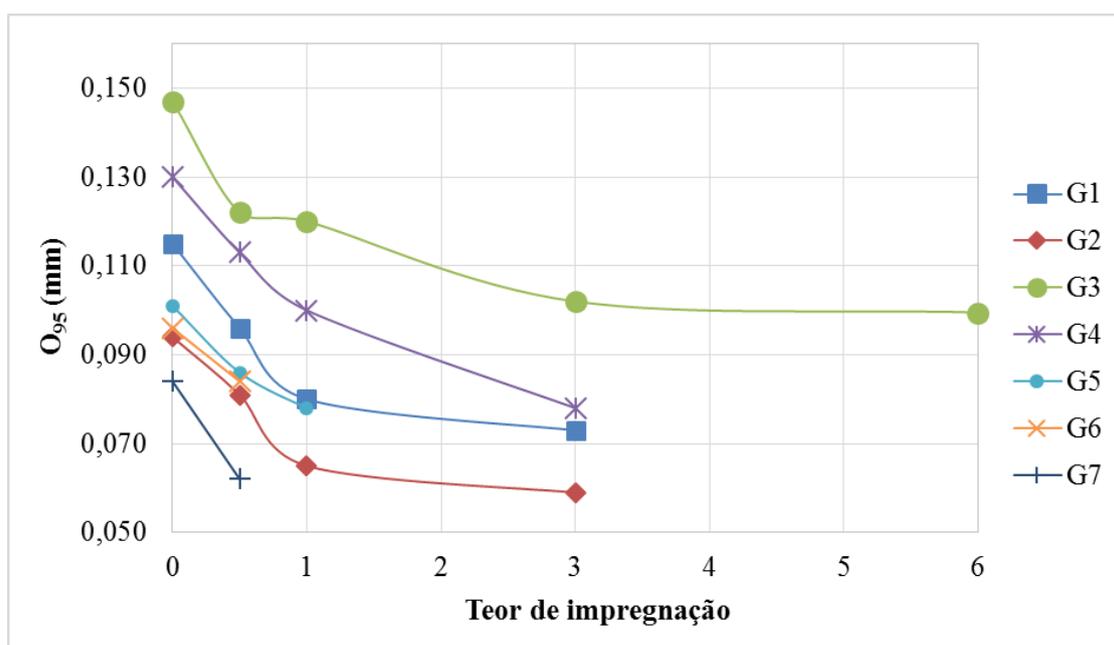


Figura 5.31 Variação do O_{95} com o nível de impregnação.

5.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO GEOTÊXTIL

Para a avaliação da influência do confinamento, foram utilizados espécimes de geotêxteis comprimidos por meio de duas telas metálicas costuradas, como explicado no capítulo 4, e levando em conta os resultados obtidos nos ensaios de compressibilidade apresentados anteriormente. O geotêxtil foi comprimido obtendo-se um valor de espessura (t_{GT}) correspondente ao que este teria se estivesse submetido a determinada tensão normal. Esta redução de espessura foi feita para simular 4 condições de tensão (10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa). O espécime limpo costurado foi colocado na célula do equipamento de ponto de bolha e, a seguir, ensaiado.

A Figura 5.32 apresenta a variação do fluxo de ar de acordo com cada tensão aplicada sobre o geotêxtil G1 limpo e a Figura 5.33 mostra as curvas de distribuição de poros resultantes da variação entre o teste seco e os ensaios saturados. As Figuras 5.34 a 5.45 apresentam os mesmos tipos de resultados obtidos para os demais geotêxteis ensaiados (G2 a G7). De forma geral, quanto maior a compressão sofrida pelo geotêxtil (ou maior a tensão normal equivalente), menor as dimensões dos seus poros.

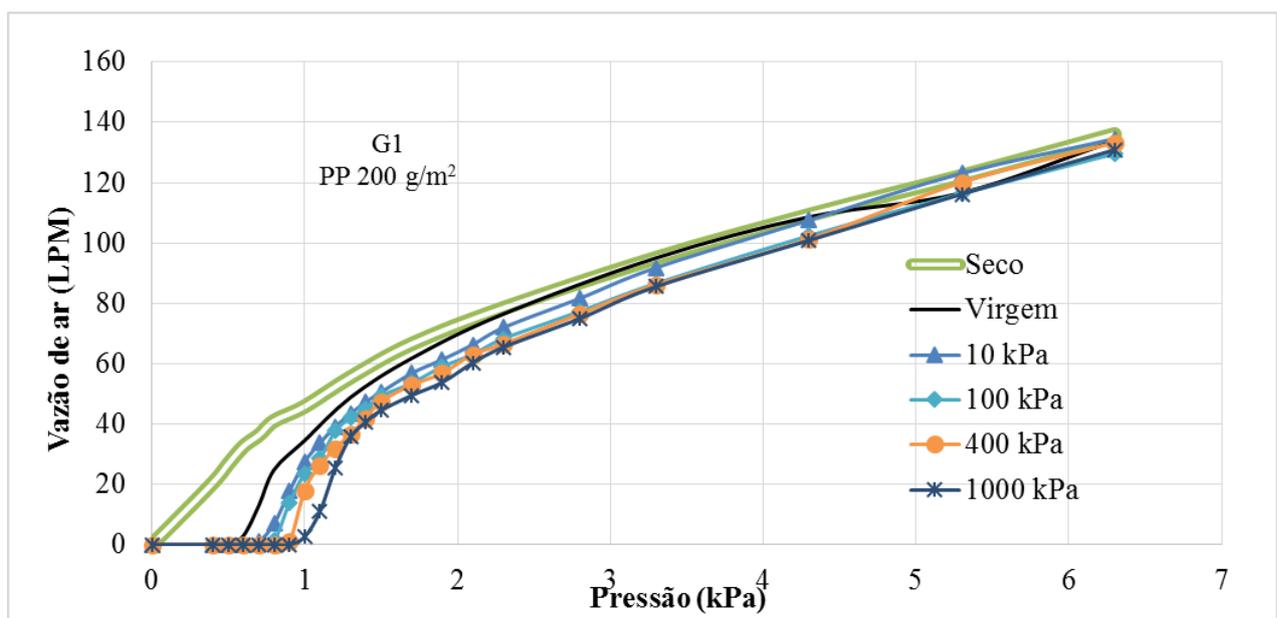


Figura 5.32 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 200 g/m² confinado.

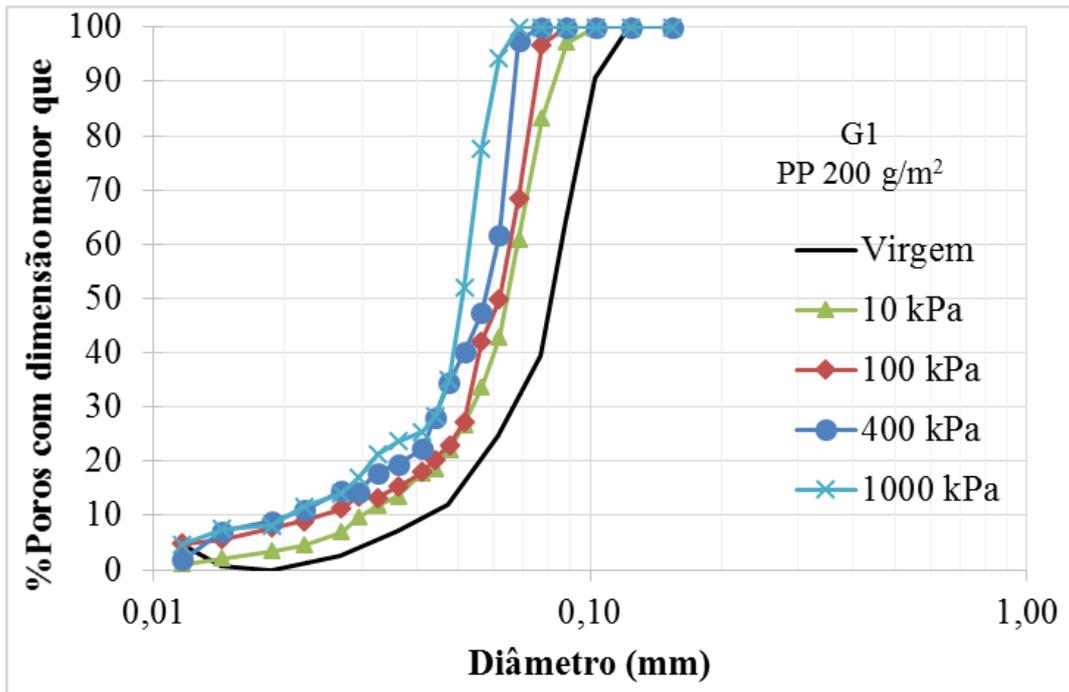


Figura 5.33 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 200 g/m² confinado.

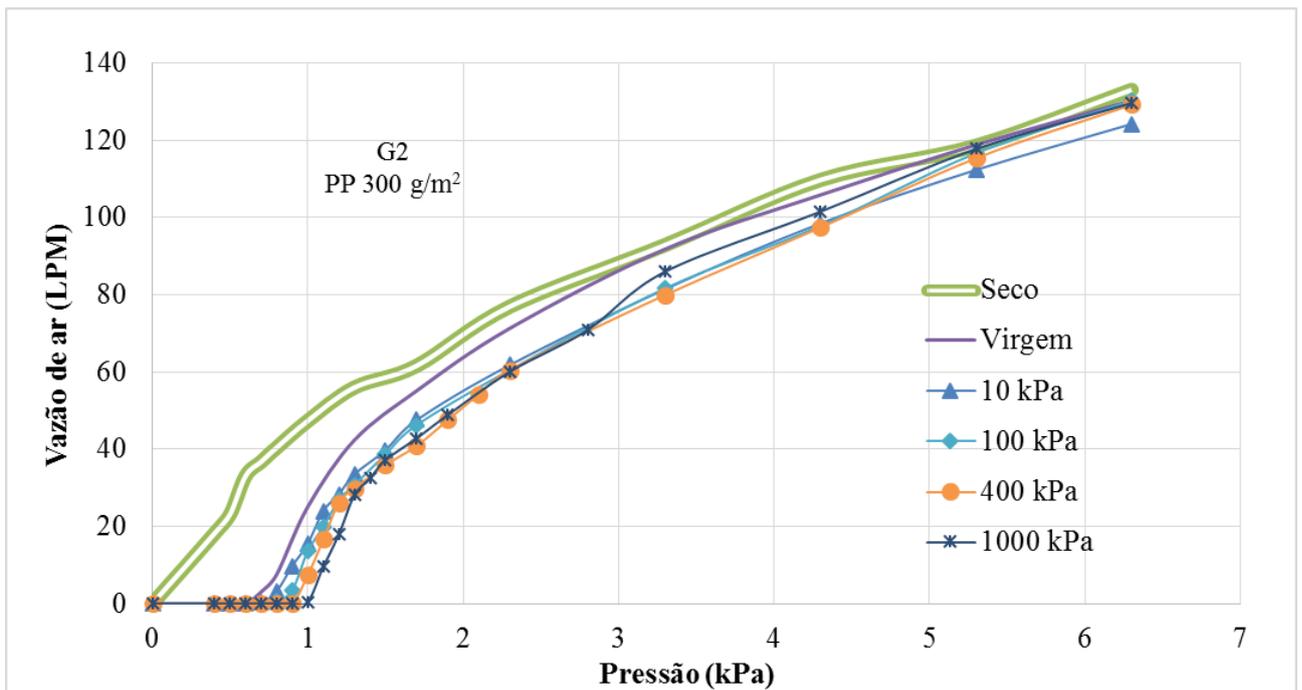


Figura 5.34 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PP 300 g/m² confinado.

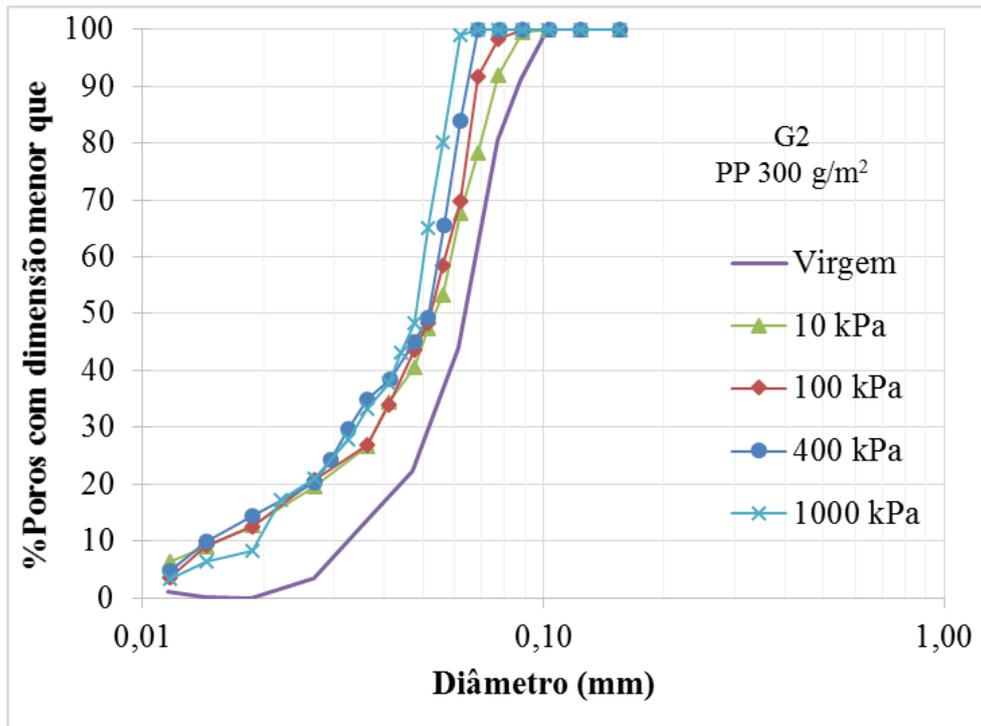


Figura 5.35 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PP 300 g/m² confinado.

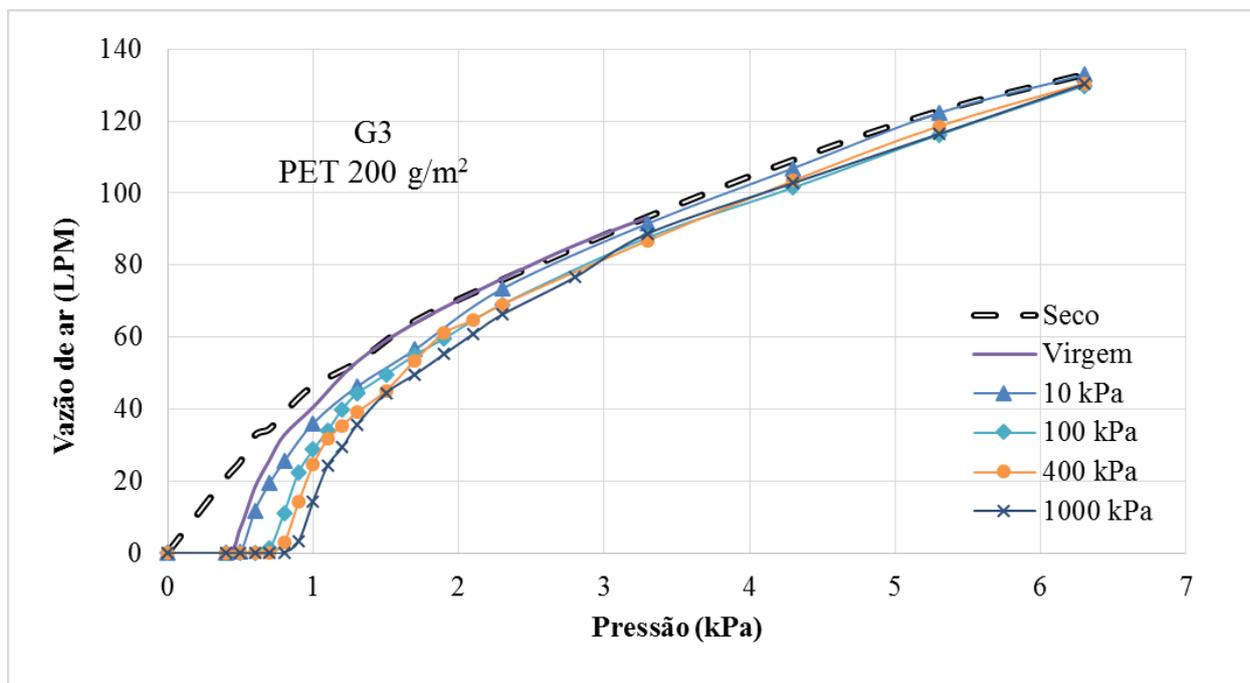


Figura 5.36 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 200 g/m² confinado.

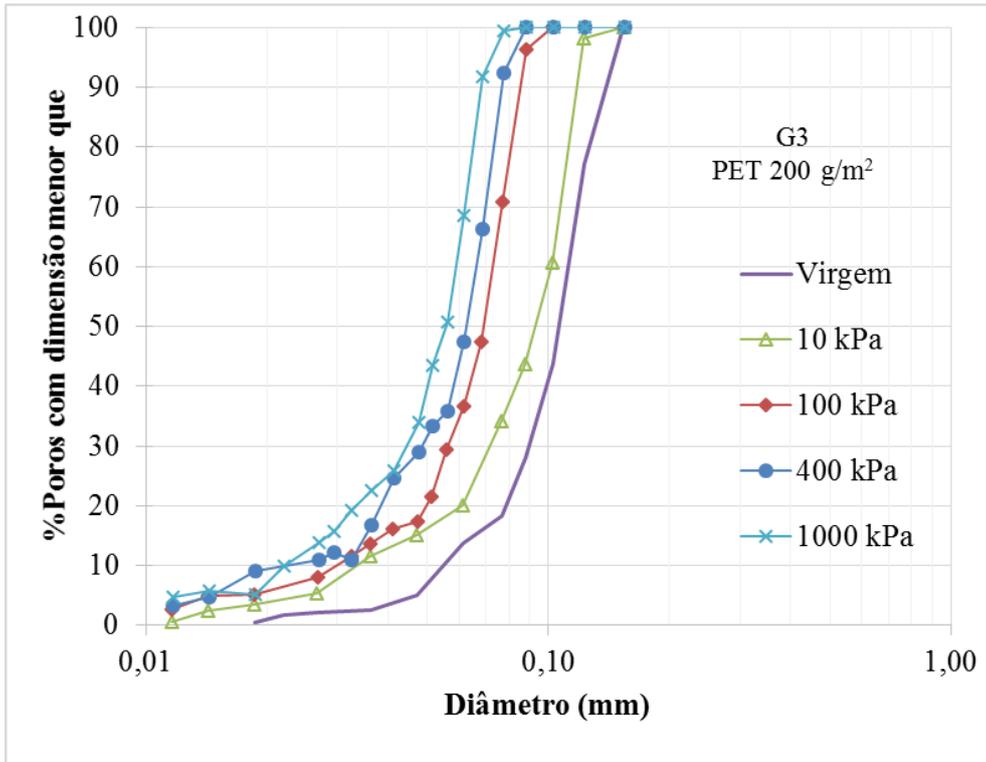


Figura 5.37 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 200 g/m² confinado.

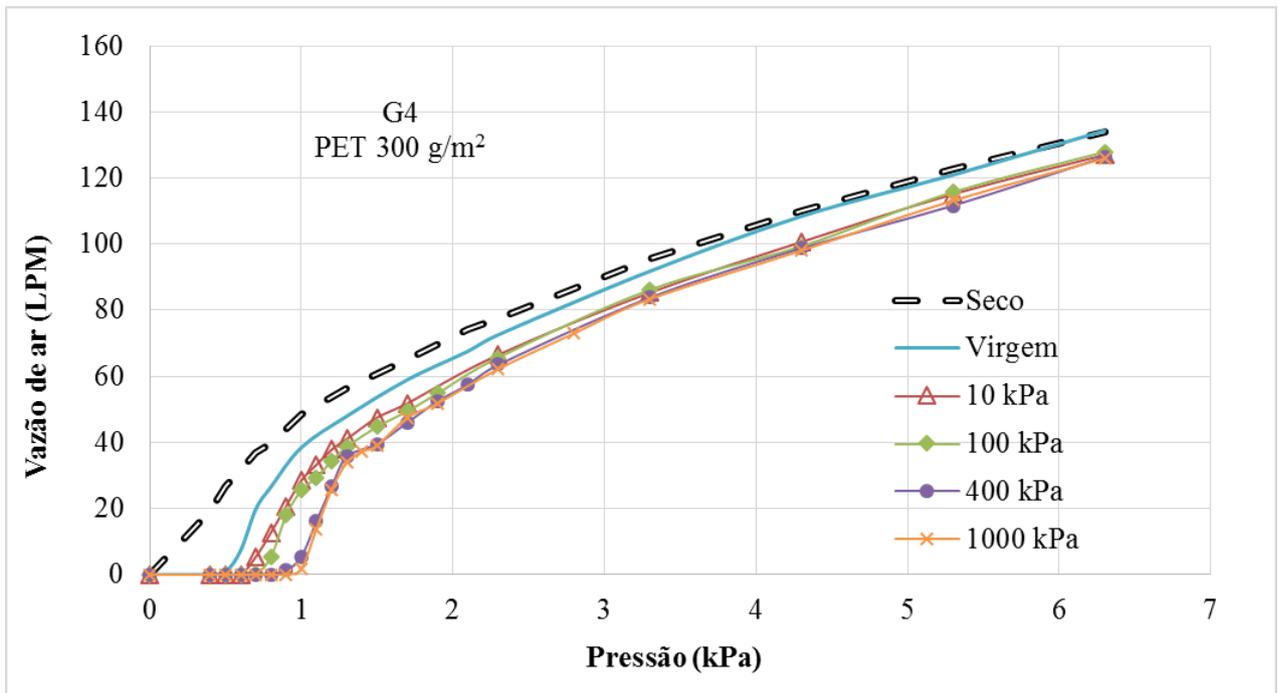


Figura 5.38 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 300 g/m² confinado.

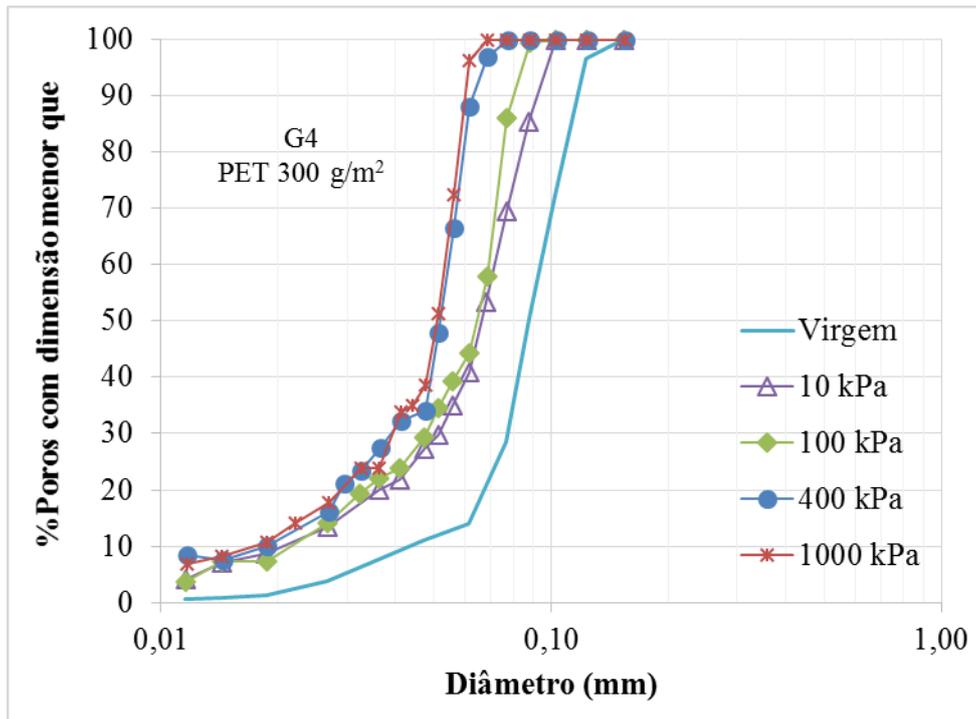


Figura 5.39 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 300 g/m² confinado.

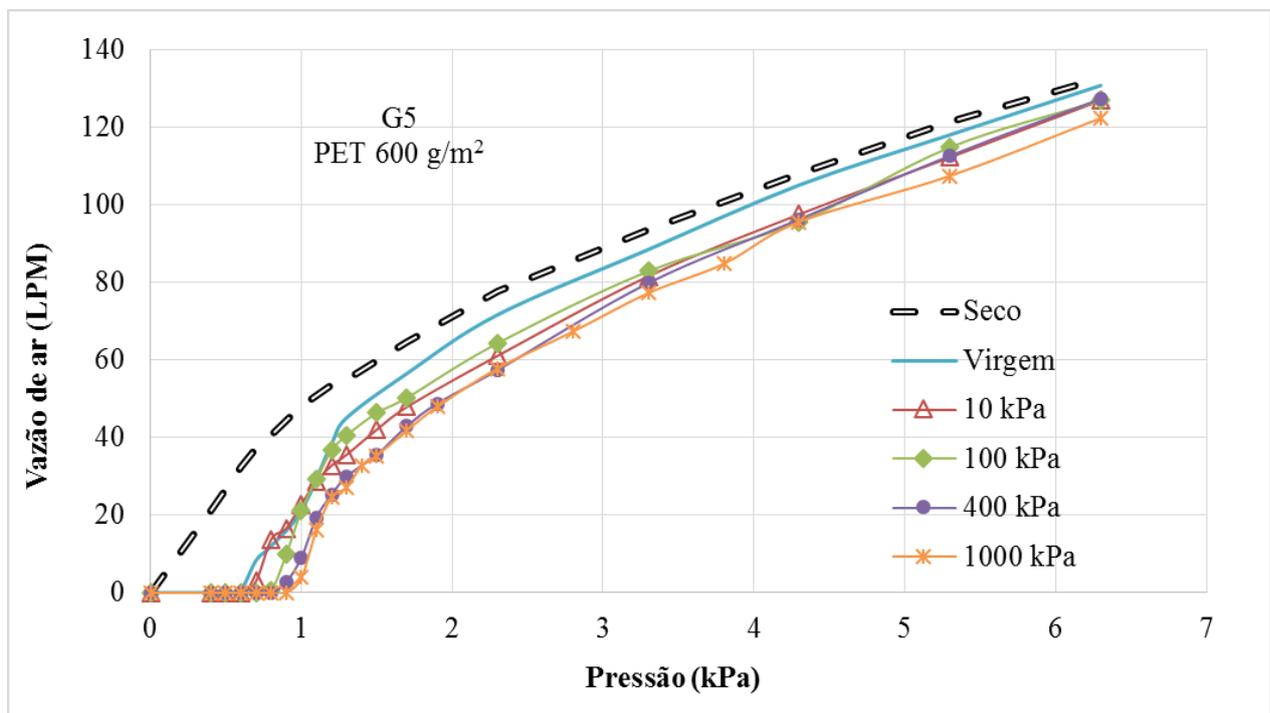


Figura 5.40 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 600 g/m² confinado.

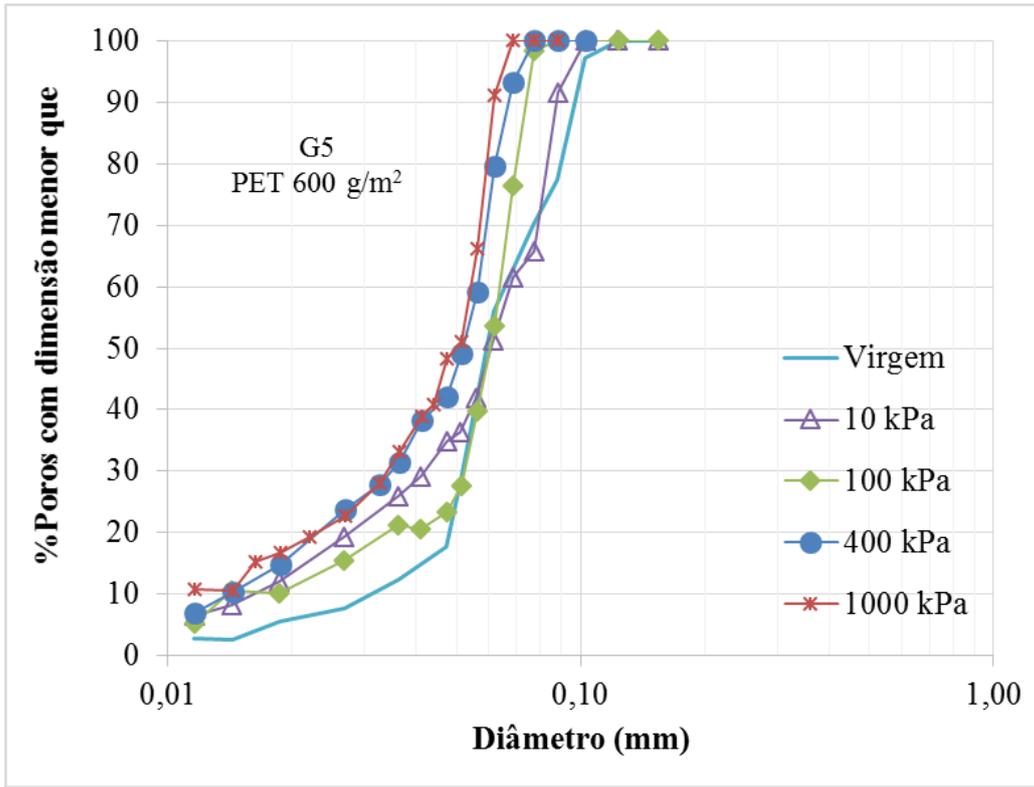


Figura 5.41 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 600 g/m² confinado.

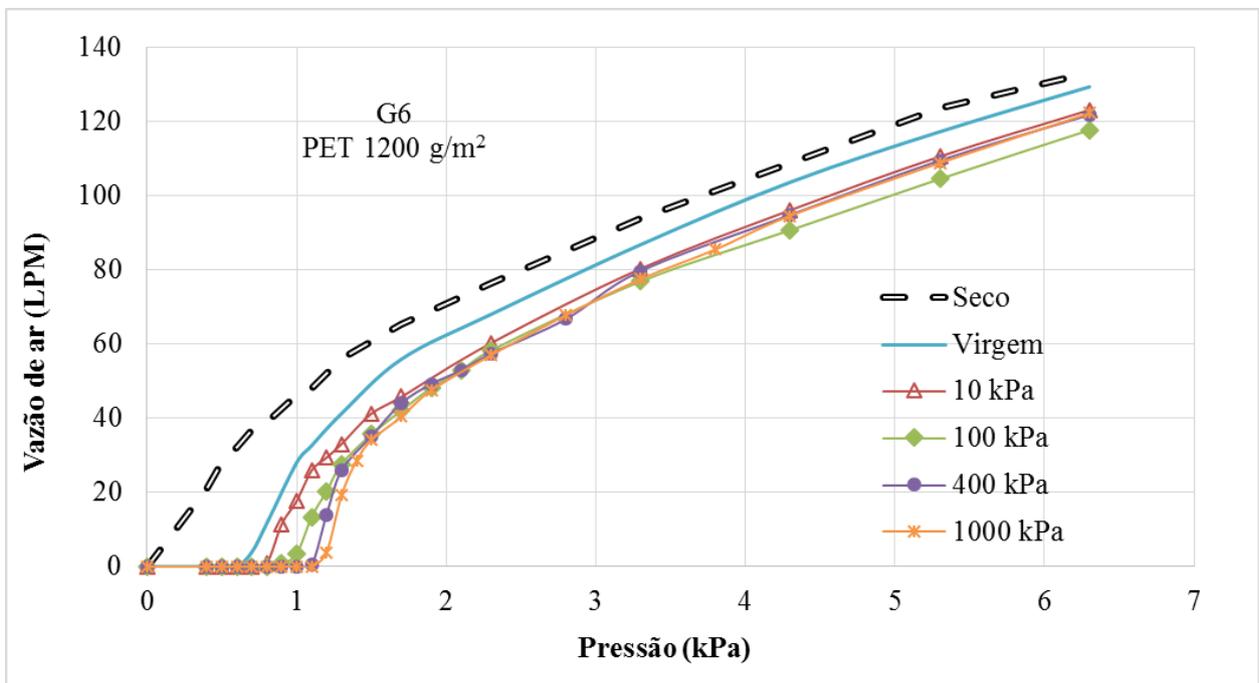


Figura 5.42 Vazão de ar versus pressão – PET 1200 g/m² confinado.

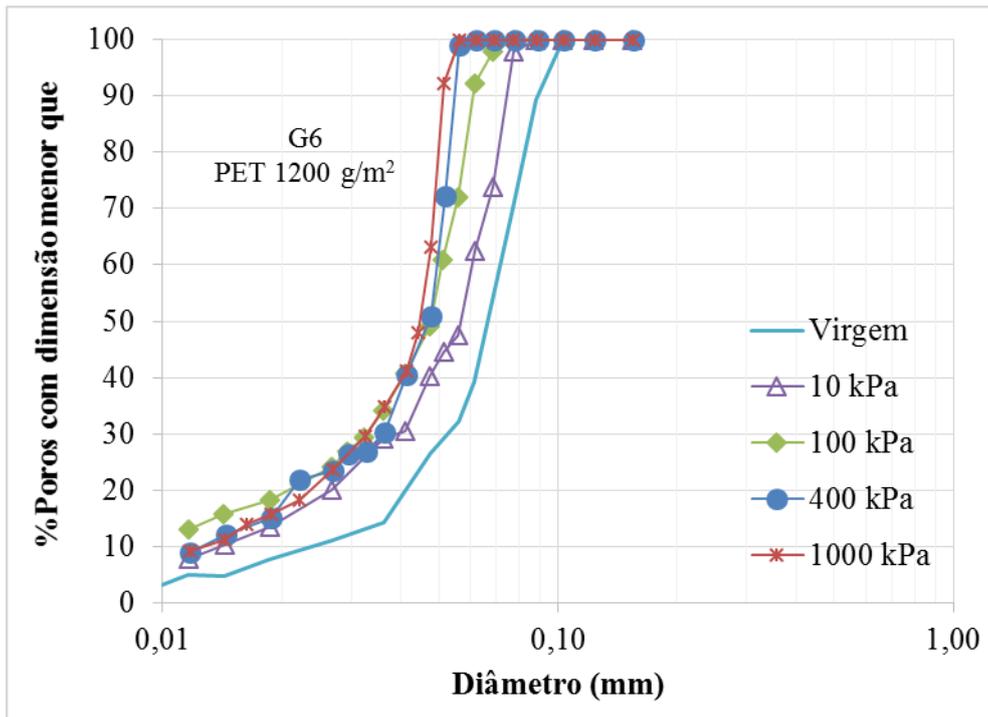


Figura 5.43 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1200 g/m² confinado.

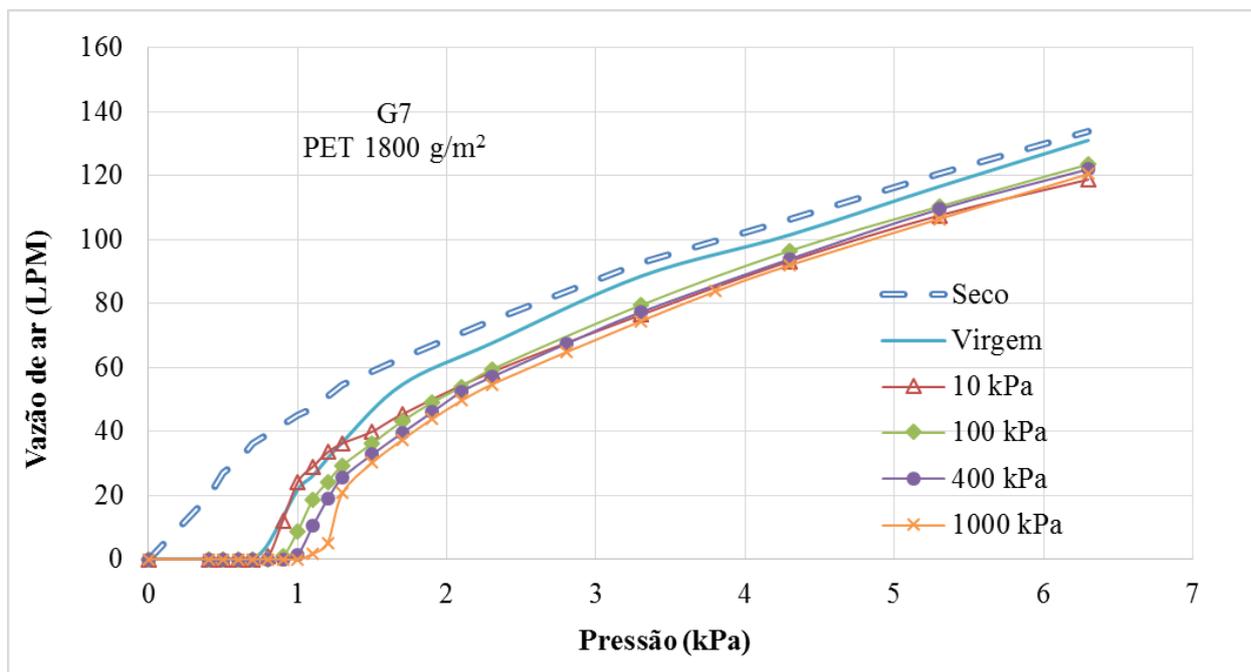


Figura 5.44 Vazão de ar versus pressão - Geotêxtil PET 1800 g/m² confinado.

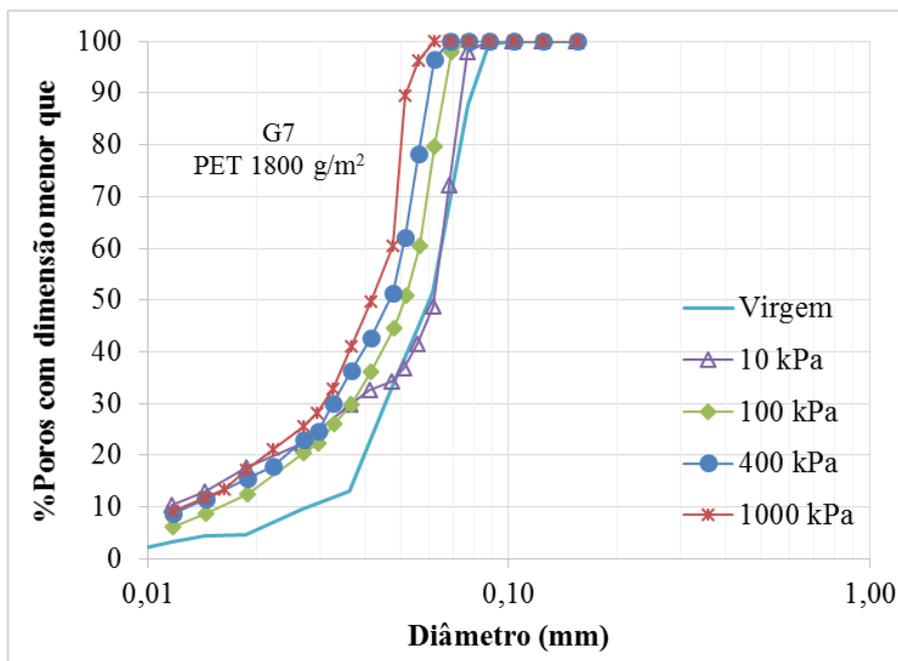


Figura 5.45 Curva de distribuição de poros do geotêxtil de PET 1800 g/m² confinado.

As Tabela 5.5 e 5.6 apresentam os valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os espécimes virgens comprimidos. A partir destes resultados foi possível obter a variação da abertura de filtração com o nível de tensão. Os resultados são apresentados na Figura 5.46 (O_{98}) e na Figura 5.47 (O_{95}). Reduções de até 50% nos valores de O_{95} e O_{98} podem ser notadas devido ao confinamento.

Tabela 5.5 Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis comprimidos.

Tensão (kPa)	O_{98} (mm)						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
0	0,120	0,099	0,151	0,135	0,108	0,100	0,087
10	0,093	0,086	0,122	0,100	0,099	0,077	0,077
100	0,082	0,077	0,094	0,087	0,077	0,068	0,069
400	0,071	0,068	0,085	0,072	0,075	0,056	0,065
1000	0,066	0,062	0,076	0,065	0,067	0,055	0,059

Tabela 5.6 Valores de O_{95} obtidos para os geotêxteis comprimidos.

Tensão (kPa)	O_{95} (mm)						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
0	0,115	0,094	0,147	0,131	0,100	0,096	0,084
10	0,090	0,082	0,121	0,098	0,094	0,076	0,076
100	0,077	0,073	0,087	0,084	0,076	0,065	0,068
400	0,068	0,067	0,081	0,067	0,071	0,056	0,062
1000	0,062	0,061	0,072	0,061	0,065	0,053	0,055

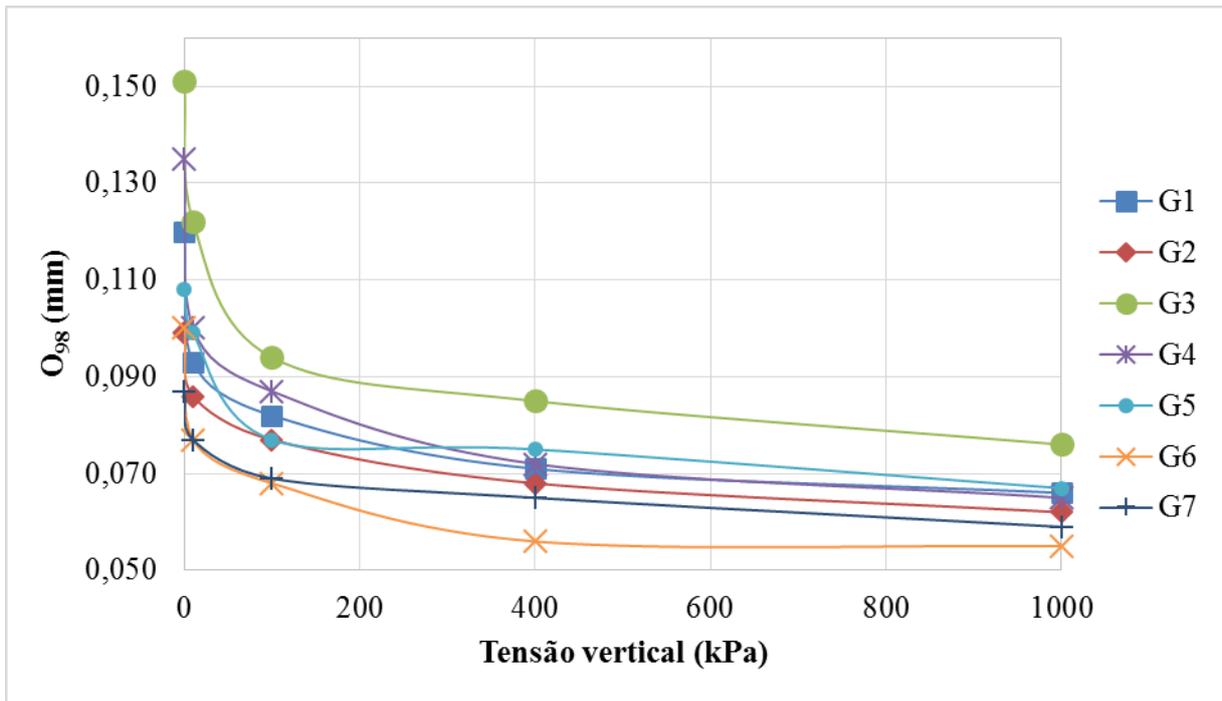


Figura 5.46 Variação do O_{98} com o nível de tensão.

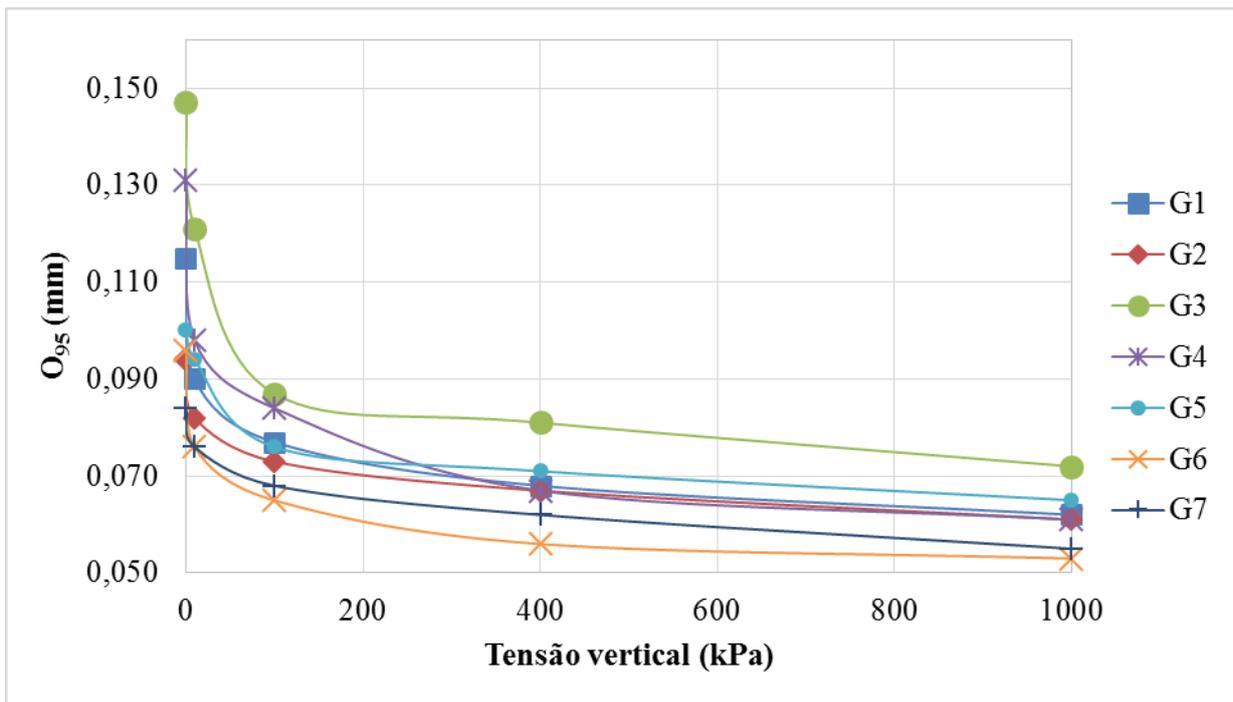


Figura 5.47 Variação do O_{95} com o nível de tensão.

5.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO E DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL

Foram ensaiados espécimes de geotêxteis impregnados comprimidos com a finalidade de avaliar a influência desses dois efeitos conjuntamente. Foram combinados níveis de impregnação com as 4 condições de tensão propostas, o que levou a um total de 120 ensaios de ponto de bolha.

A partir dos resultados obtidos foi possível caracterizar a variação da abertura de filtração com o nível de confinamento e impregnação. A Figura 5.48 apresenta a variação do valor de O_{98} do geotêxtil G1 com a tensão normal, para diferentes valores de nível de impregnação (λ), e a Figura 5.49 mostra a variação do O_{95} com a tensão normal para o mesmo geotêxtil. As Figuras 5.50 a 5.61 apresentam os resultados obtidos para os demais geotêxteis. Os resultados dos ensaios de ponto de bolha em termos de curva de distribuição de tamanhos para os geotêxteis ensaiados são apresentados no APÊNDICE B. Pode-se notar nas Figuras 5.48 a 5.61 que a impregnação dos poros do geotêxtil por partículas pode reduzir significativamente os valores de O_{95} e de O_{98} . Além disso, estes valores se tornam menos sensíveis à tensão normal para tensões superiores a 100 kPa e valores maiores de λ , devido à menor compressibilidade causada pela maior presença de grãos nos vazios do geotêxtil. Estes resultados mostram que o confinamento e a impregnação de um filtro geotêxtil não tecido pode aumentar de forma bastante importante a sua capacidade de retenção. Além disso, as condições para eventual colmatação do geotêxtil são alteradas, pelas reduções das dimensões dos poros, tanto pela ação do confinamento como pela presença de grãos. Tais aspectos não são levados em conta nos atuais critérios para dimensionamento de filtros geotêxteis.

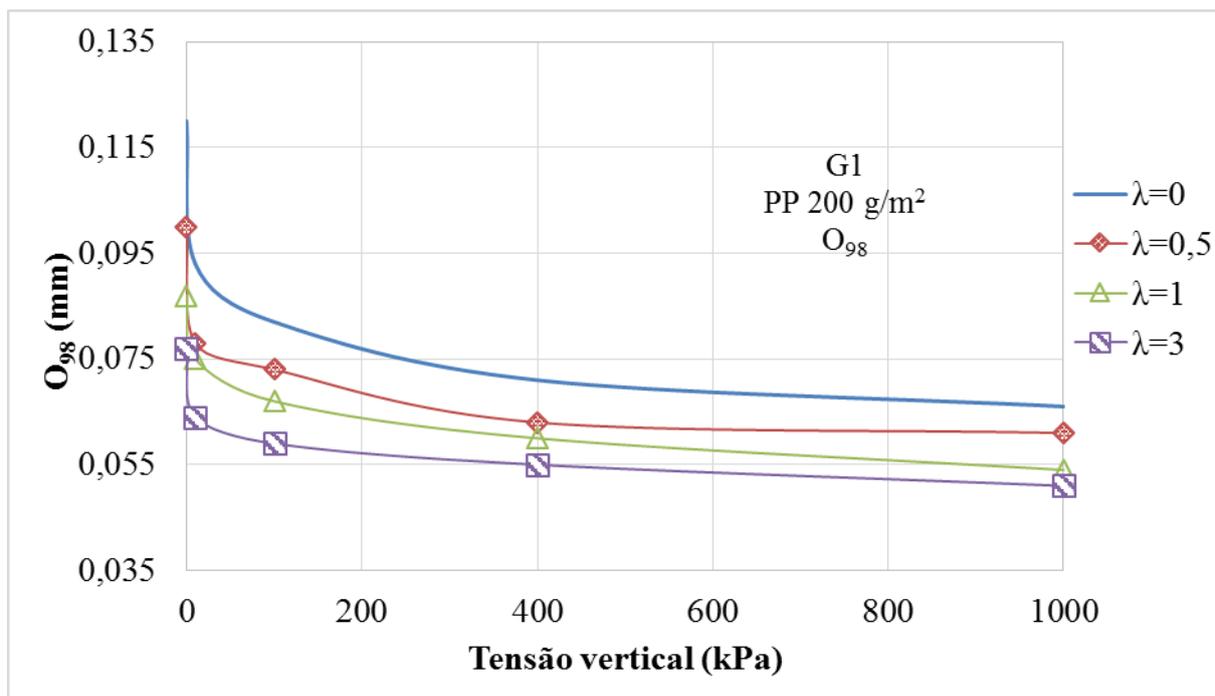


Figura 5.48 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G1.

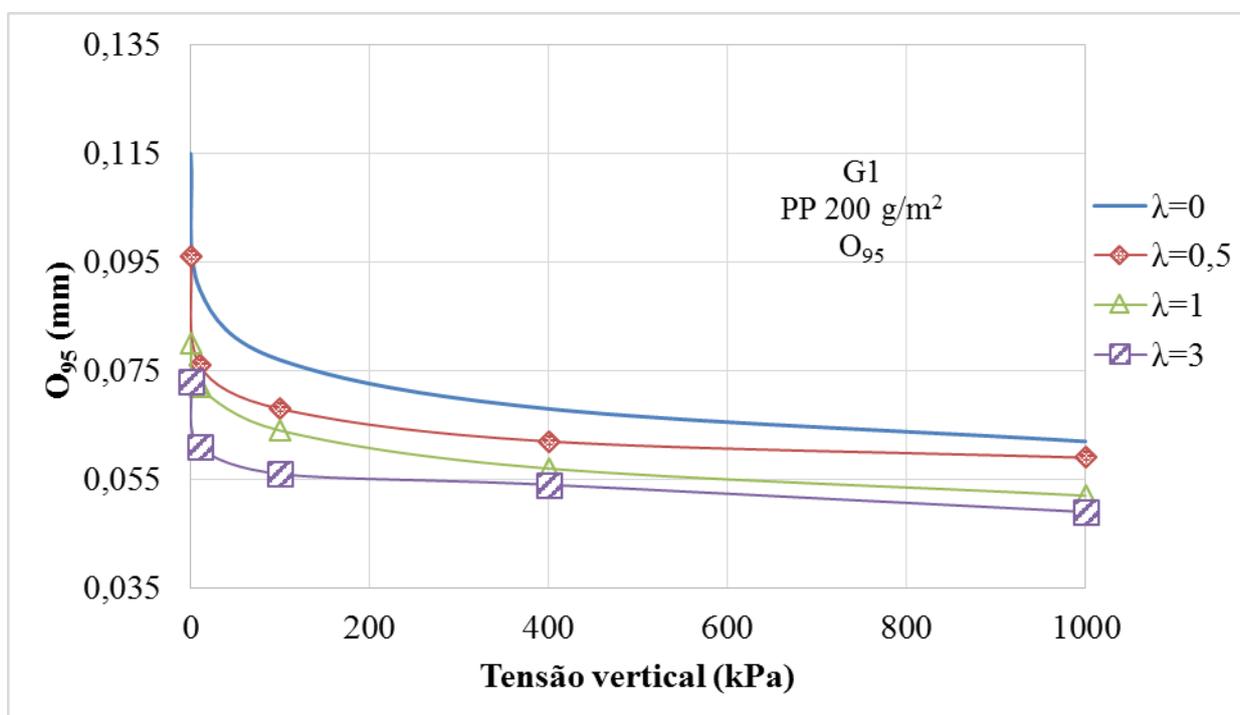


Figura 5.49 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G1.

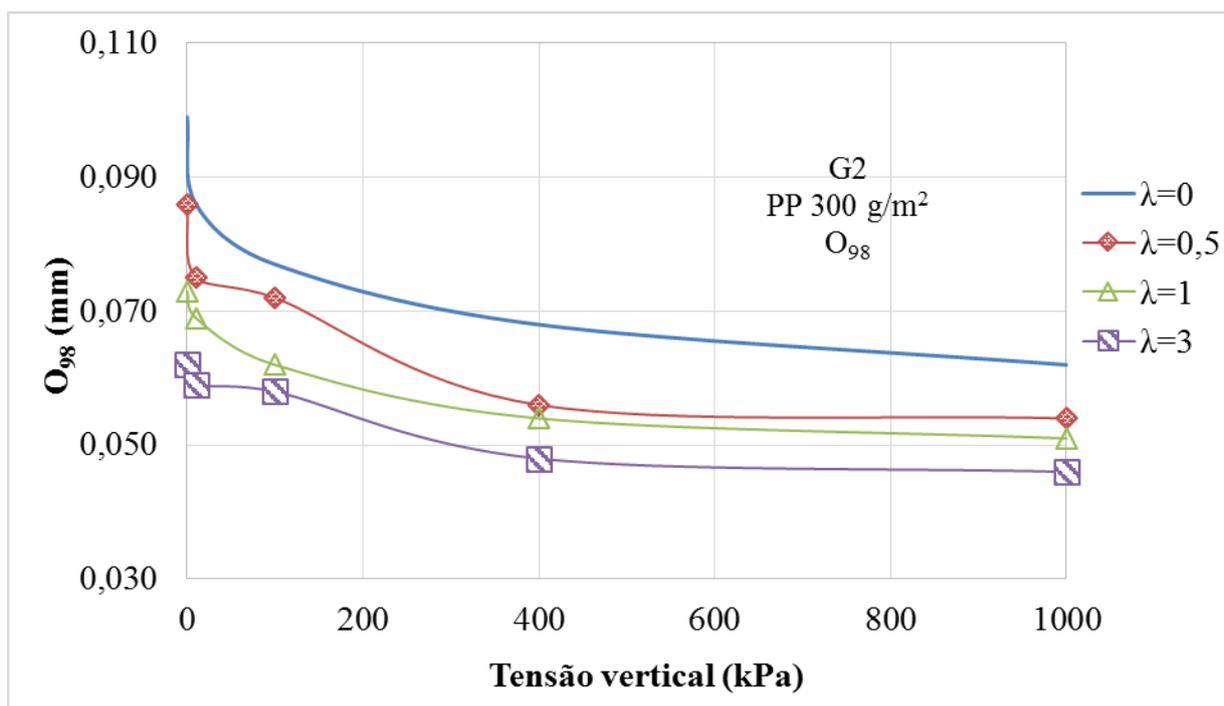


Figura 5.50 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G2.

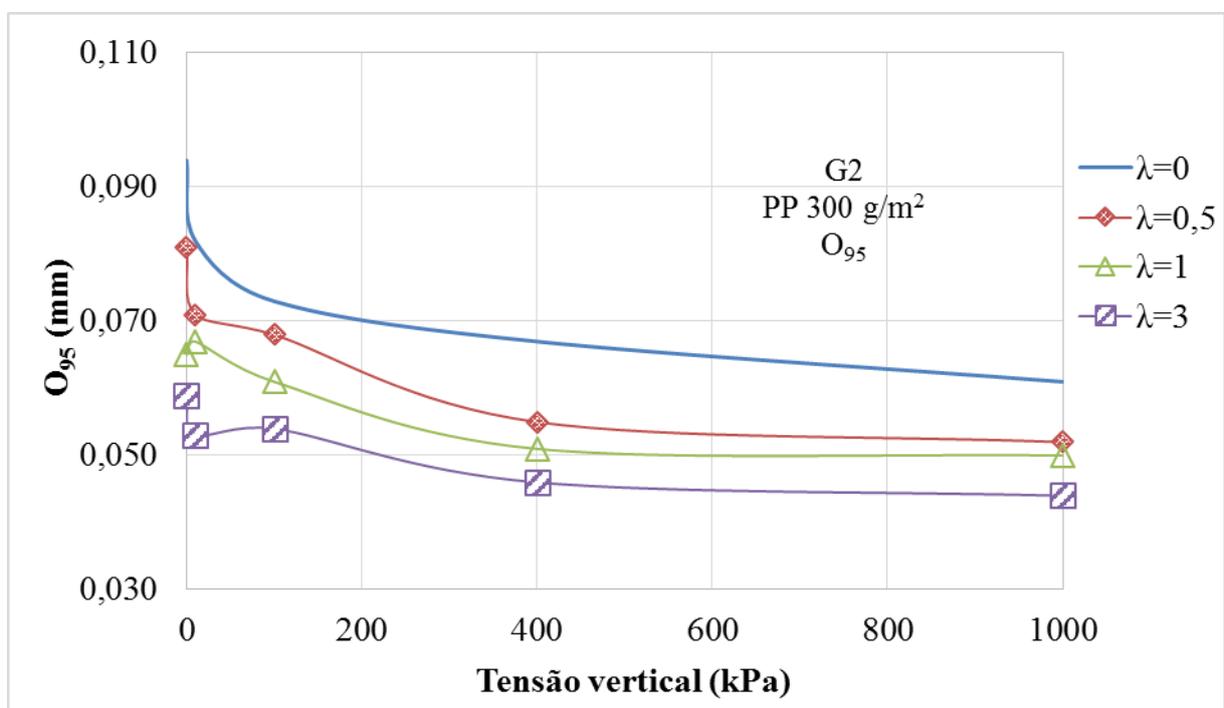


Figura 5.51 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G2.

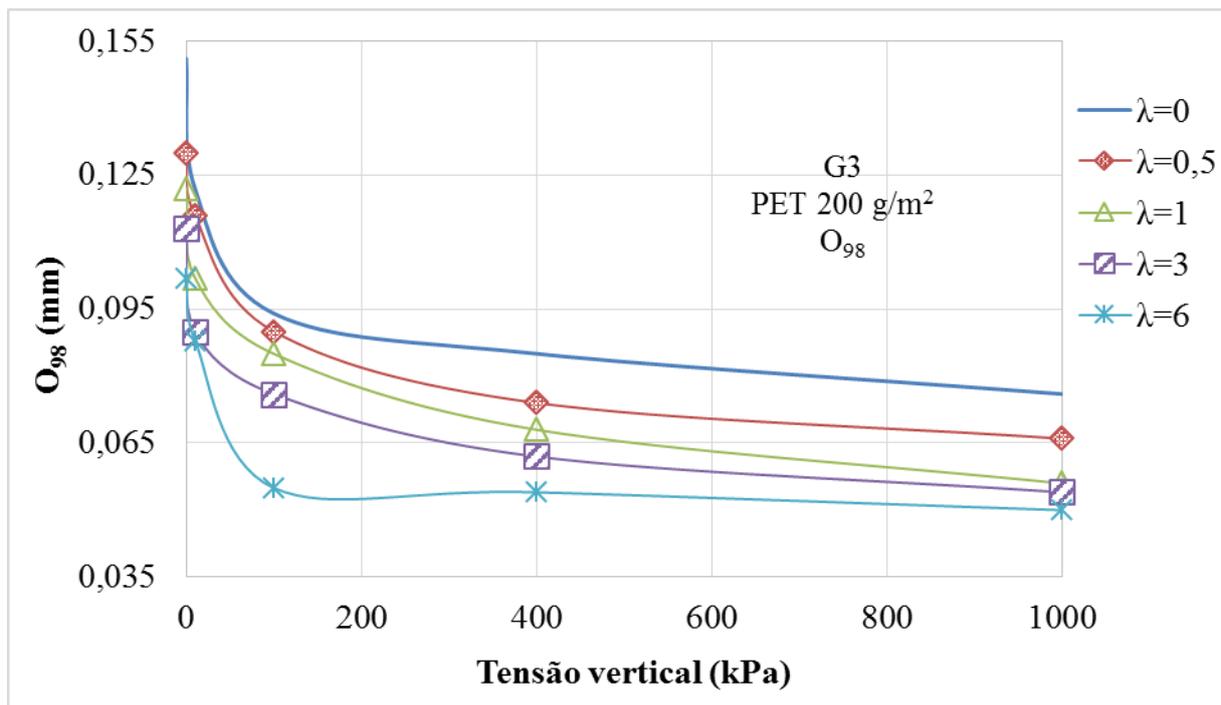


Figura 5.52 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G3.

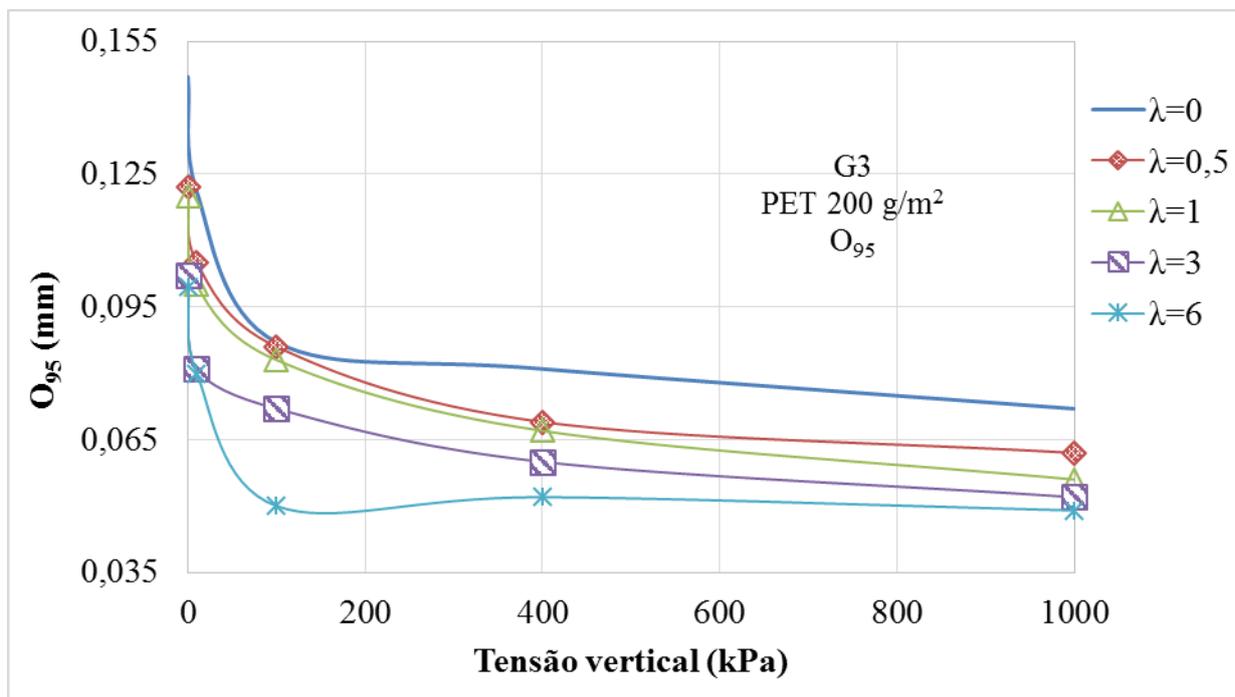


Figura 5.53 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G3.

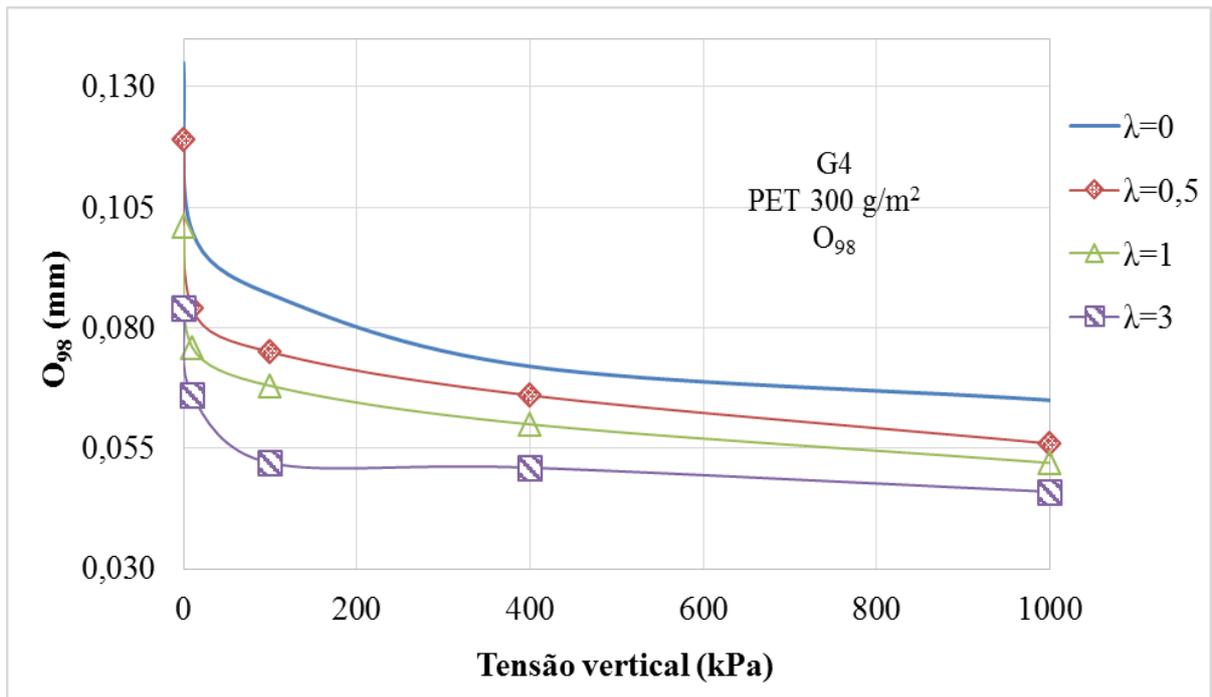


Figura 5.54 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G4.

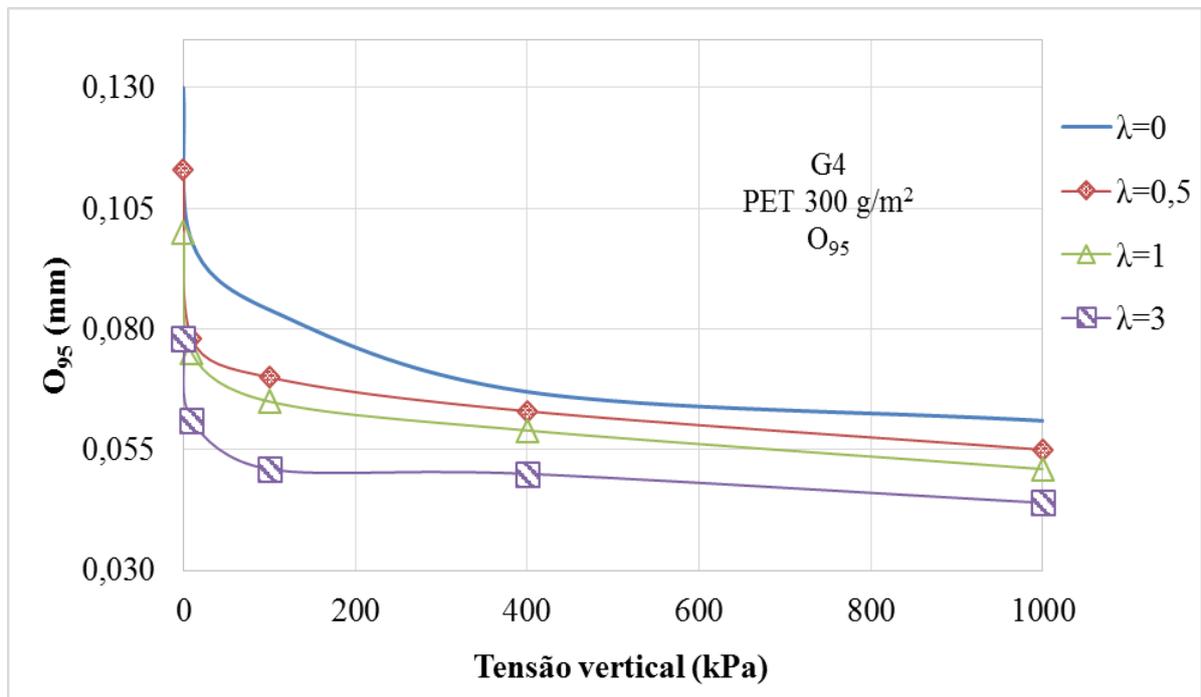


Figura 5.55 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G4.

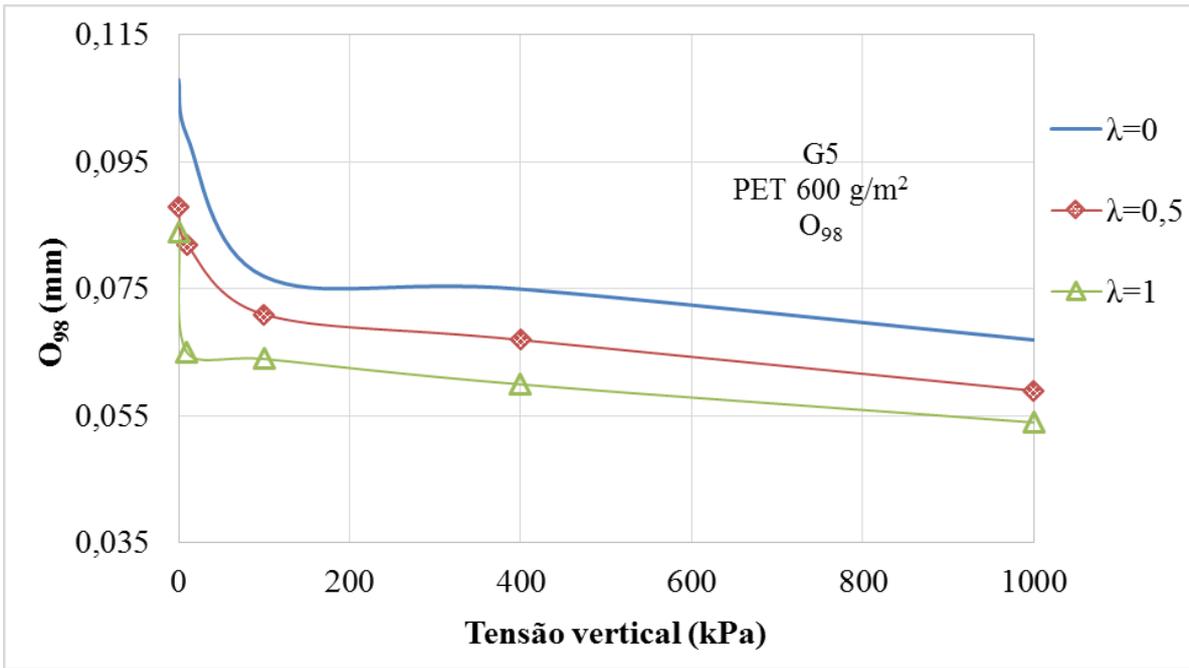


Figura 5.56 Variação do O_{98} com o nível de tensão e impregnação para G5.

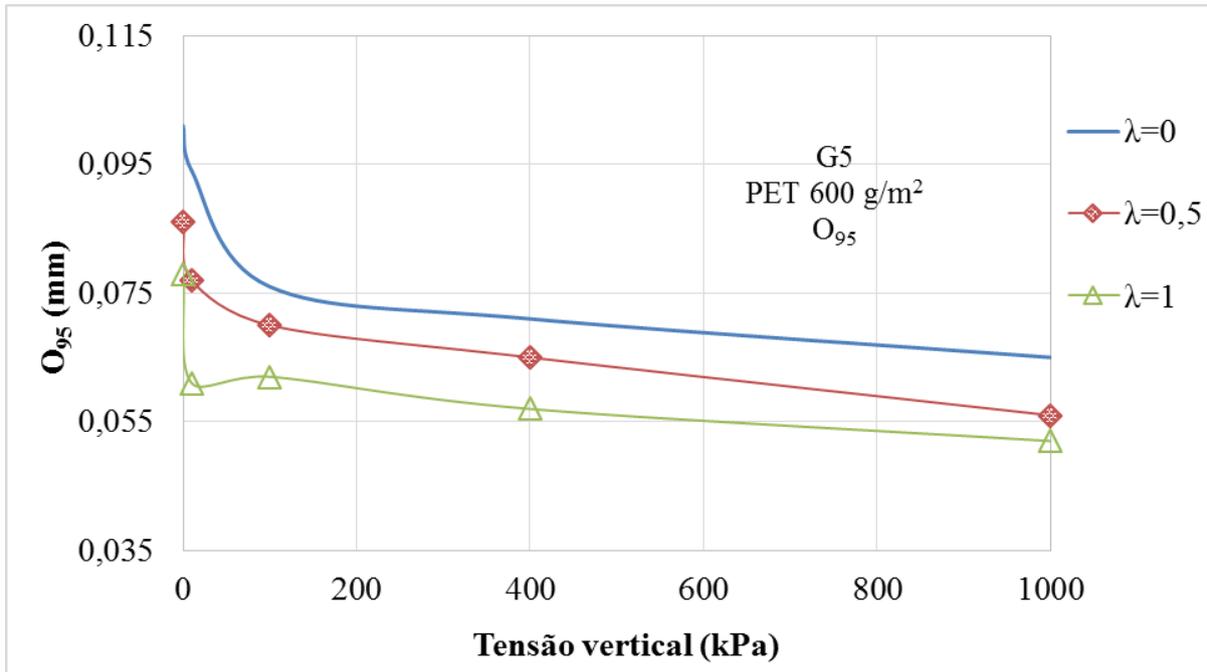


Figura 5.57 Variação do O_{95} com o nível de tensão e impregnação para G5.

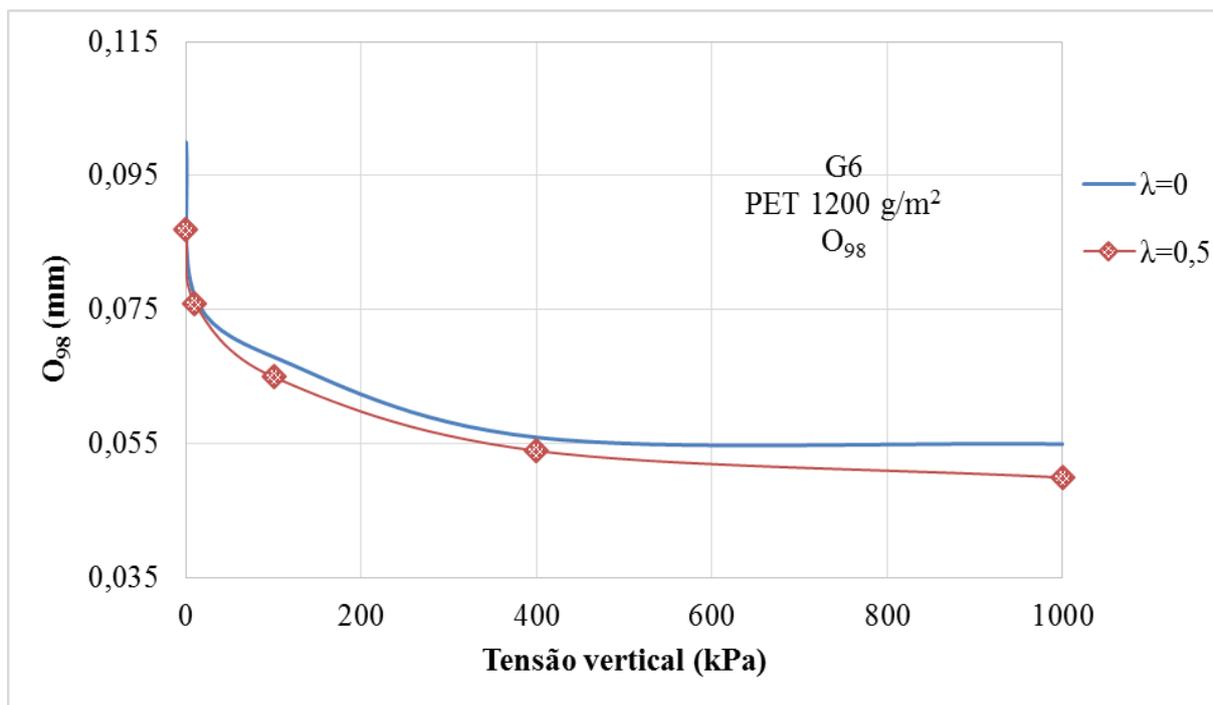


Figura 5.58 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G6.

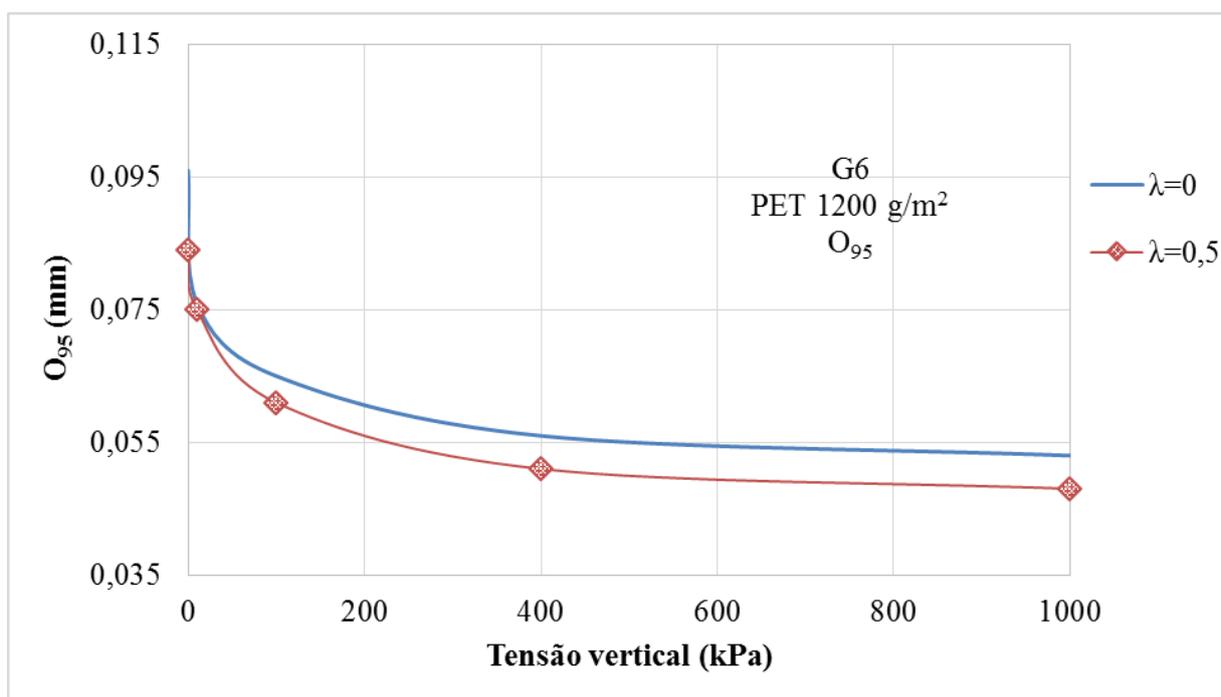


Figura 5.59 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G6.

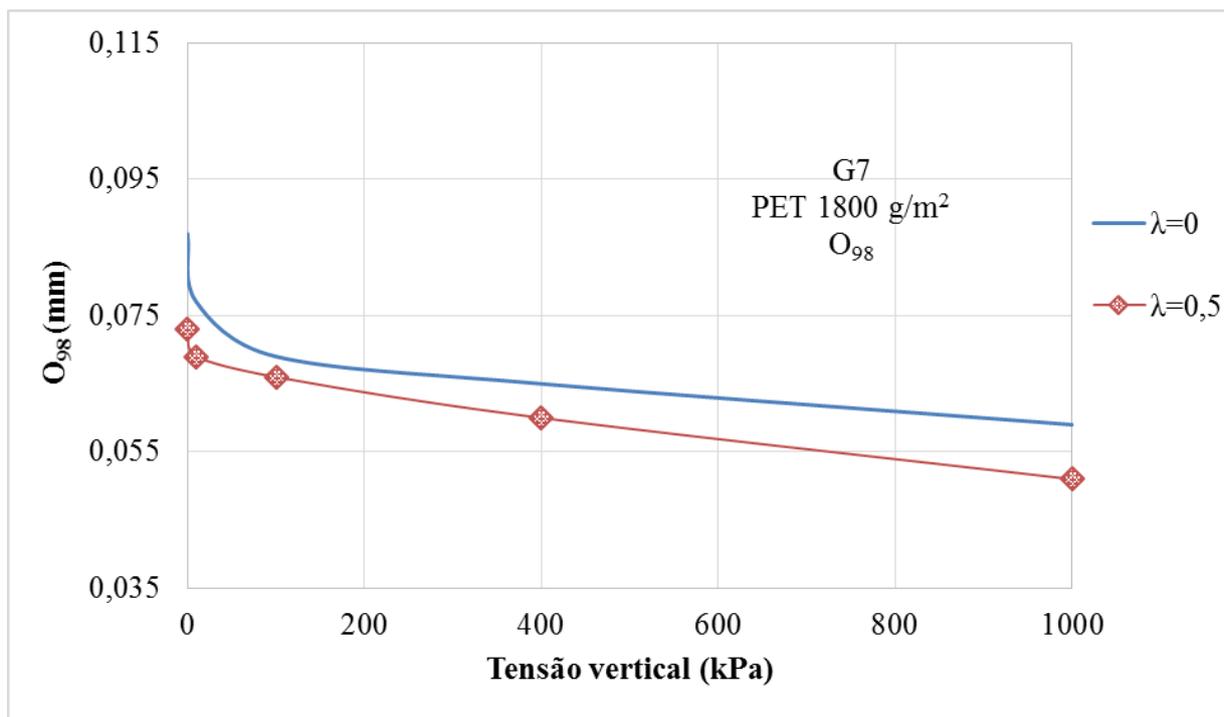


Figura 5.60 Variação do O₉₈ com o nível de tensão e impregnação para G7.

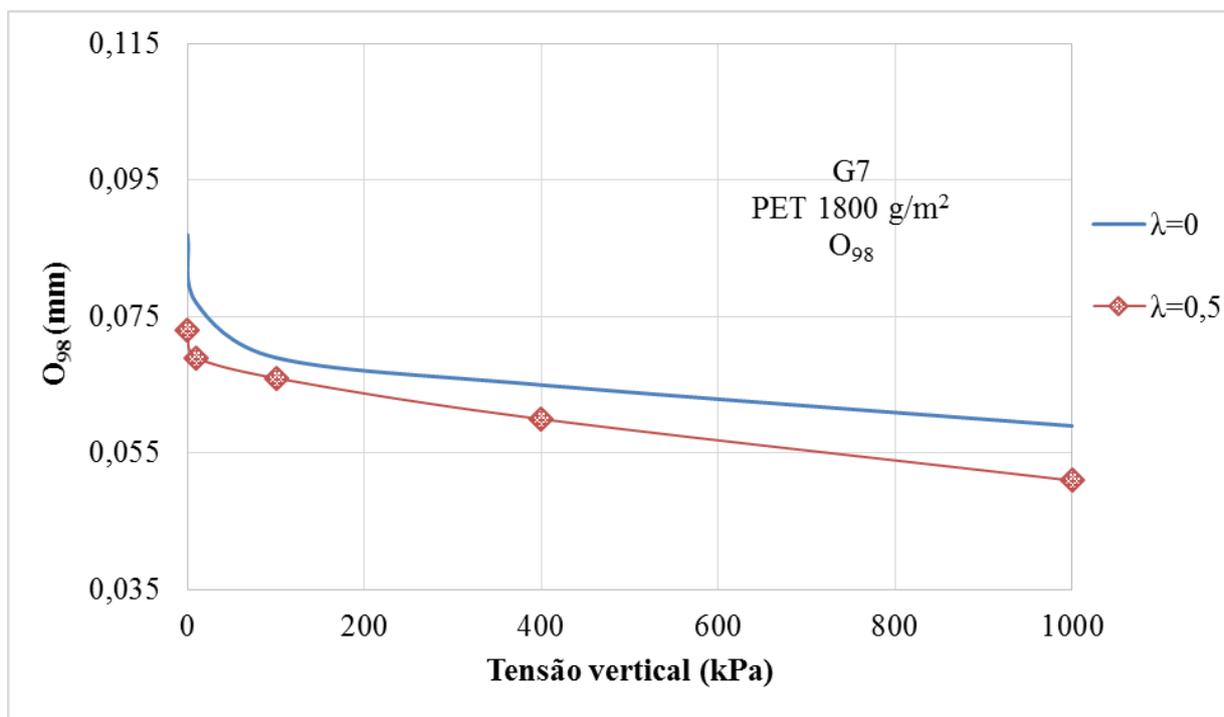


Figura 5.61 Variação do O₉₅ com o nível de tensão e impregnação para G7.

A Tabela 5.7 apresenta os valores de abertura de filtração para todos os geotêxteis ensaiados, sob condições de confinamento e impregnação. Os resultados obtidos complementam os estudos realizados para a obtenção da abertura de filtração sob tensão feitos por Messias da Silva (2014), levando em conta os efeitos da impregnação tanto na compressibilidade do geotêxtil como no tamanho dos poros disponíveis.

Tabela 5.7 Valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os geotêxteis comprimidos e impregnados.

Abertura de filtração (mm)							
Amostra	Impregnação		Tensão vertical (kPa)				
			0	10	100	400	1000
G1 (PP200)	$\lambda=0$	O_{98}	0,120	0,093	0,082	0,071	0,066
		O_{95}	0,115	0,090	0,077	0,068	0,062
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,100	0,078	0,073	0,063	0,061
		O_{95}	0,096	0,076	0,068	0,062	0,059
	$\lambda=1$	O_{98}	0,087	0,075	0,067	0,060	0,054
		O_{95}	0,080	0,072	0,064	0,057	0,052
	$\lambda=3$	O_{98}	0,077	0,064	0,059	0,055	0,051
		O_{95}	0,073	0,061	0,056	0,054	0,049
G2 (PP300)	$\lambda=0$	O_{98}	0,099	0,086	0,077	0,068	0,062
		O_{95}	0,094	0,082	0,073	0,067	0,061
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,086	0,075	0,072	0,056	0,054
		O_{95}	0,081	0,071	0,068	0,055	0,052
	$\lambda=1$	O_{98}	0,073	0,069	0,062	0,054	0,051
		O_{95}	0,065	0,067	0,061	0,051	0,050
	$\lambda=3$	O_{98}	0,062	0,059	0,058	0,048	0,046
		O_{95}	0,059	0,053	0,054	0,046	0,044
G3 (PET200)	$\lambda=0$	O_{98}	0,151	0,122	0,094	0,085	0,076
		O_{95}	0,147	0,121	0,087	0,081	0,072
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,130	0,116	0,090	0,074	0,066
		O_{95}	0,122	0,105	0,086	0,069	0,062
	$\lambda=1$	O_{98}	0,122	0,102	0,085	0,068	0,056
		O_{95}	0,120	0,100	0,083	0,067	0,056
	$\lambda=3$	O_{98}	0,113	0,090	0,076	0,062	0,054
		O_{95}	0,102	0,081	0,072	0,060	0,052
	$\lambda=6$	O_{98}	0,102	0,088	0,055	0,054	0,050
		O_{95}	0,100	0,080	0,050	0,052	0,049
G4 (PET300)	$\lambda=0$	O_{98}	0,135	0,100	0,087	0,072	0,065
		O_{95}	0,130	0,098	0,084	0,067	0,061
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,119	0,084	0,075	0,066	0,056
		O_{95}	0,113	0,078	0,070	0,063	0,055

Tabela 5.7 Valores de O_{98} e O_{95} obtidos para os geotêxteis comprimidos e impregnados
(continuação)

Abertura de filtração (mm)							
Amostra	Impregnação		Tensão vertical (kPa)				
			0	10	100	400	1000
G4 (PET300)	$\lambda=1$	O_{98}	0,101	0,076	0,068	0,060	0,052
		O_{95}	0,100	0,075	0,065	0,059	0,051
	$\lambda=3$	O_{98}	0,084	0,066	0,052	0,051	0,046
		O_{95}	0,078	0,061	0,051	0,050	0,044
G5 (PET600)	$\lambda=0$	O_{98}	0,108	0,099	0,077	0,075	0,067
		O_{95}	0,101	0,094	0,076	0,071	0,065
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,088	0,082	0,071	0,067	0,059
		O_{95}	0,086	0,077	0,070	0,065	0,056
	$\lambda=1$	O_{98}	0,084	0,065	0,064	0,060	0,054
		O_{95}	0,078	0,061	0,062	0,057	0,052
G6 (PET1200)	$\lambda=0$	O_{98}	0,100	0,077	0,068	0,056	0,055
		O_{95}	0,096	0,076	0,065	0,056	0,053
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,087	0,076	0,065	0,054	0,050
		O_{95}	0,084	0,075	0,061	0,051	0,048
G7 (PET1800)	$\lambda=0$	O_{98}	0,087	0,077	0,069	0,065	0,059
		O_{95}	0,084	0,076	0,068	0,062	0,055
	$\lambda=0,5$	O_{98}	0,073	0,069	0,066	0,060	0,051
		O_{95}	0,062	0,066	0,063	0,057	0,050

5.6. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE GEOTÊXTEIS IMPREGNADOS E SUBMETIDOS A TENSÃO

5.6.1. PERMEABILIDADE SOB CONDIÇÕES VIRGENS E IMPREGNADAS

Como apresentado no Capítulo 2, a impregnação do geotêxtil causa uma redução na sua compressibilidade e porosidade, portanto as características hidráulicas do material também apresentam variações em relação a de geotêxteis virgens. Na literatura existe uma variedade de expressões que permitem calcular propriedades hidráulicas, tais como coeficiente de permeabilidade e permissividade de materiais geossintéticos, mesmo impregnados e submetidos a tensão de compressão.

Com o resultado de abertura de filtração obtido no ensaio de ponto de bolha foi possível estimar a permeabilidade da manta de geotêxtil levando em consideração os efeitos da tensão de compressão e impregnação por meio das Equações 2.3 e 2.4 desenvolvidas por Giroud (1996), apresentadas no Capítulo 2, além dessas duas equações foi utilizada uma outra expressão proposta por Fischer *et al.* (1995) que leva em consideração os resultados obtidos dos ensaios de ponto de bolha, apresentada a seguir.

$$k = 30,6n_{GT}^3 \left[\sum (O_j^2 \cdot p_j) \right] \quad (5.1)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade;

n_{GT} = porosidade do geotêxtil;

O_j = diâmetro do poro;

p_j = porcentagem de poros com diâmetro O_j no geotêxtil

Os Valores de O_j e p_j são calculados dos gráficos de distribuição dos tamanhos de poros obtidos nos ensaios de ponto de bolha, tal como pode ser observado na Figura 5.62.

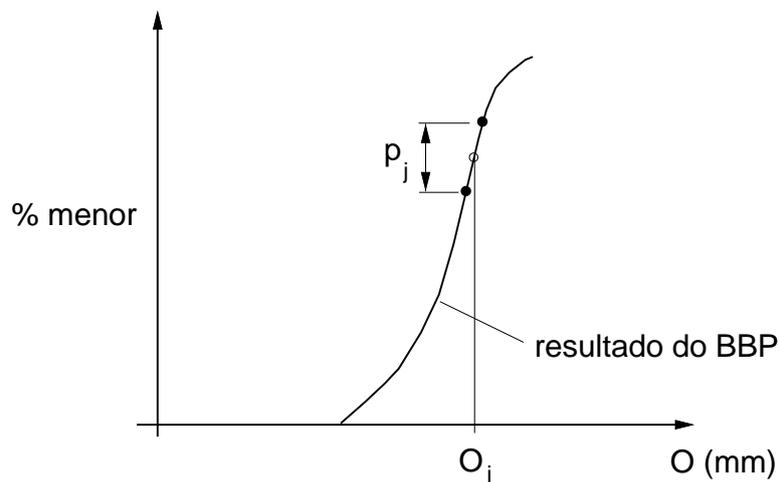


Figura 5.62 Obtenção de O_j e p_j do gráfico dos ensaios de BBP

A abertura de filtração sob confinamento também foi estimada por meio da Equação 2.10 com a finalidade de comparar com os resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha realizados.

A Tabela 5.8 apresenta os valores constantes utilizados para a realização dos cálculos mencionados. Cabe destacar que para o cálculo da permeabilidade com os dados do ensaio de ponto de bolha, propriedades do fluido foram calculadas para a temperatura registrada no ensaio, portanto não estão dentro dos valores admitidos constantes.

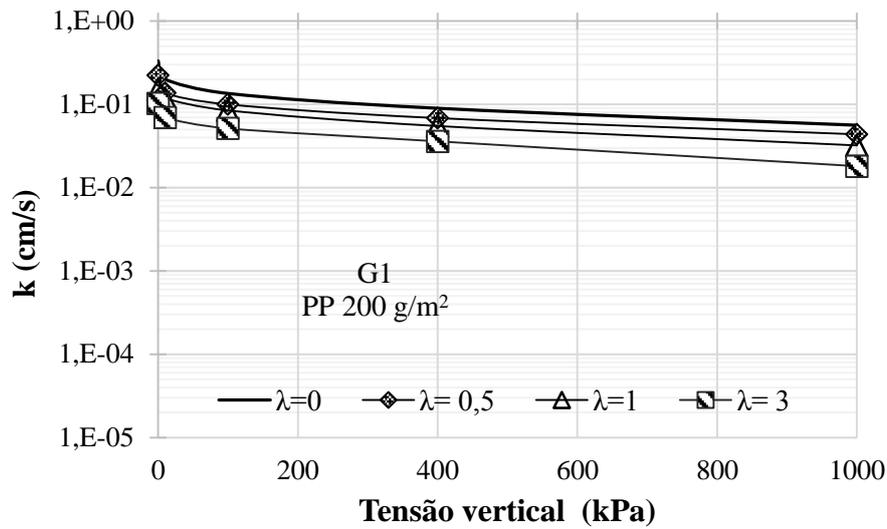
Tabela 5.8 Valores fixos utilizados no cálculo das propriedades hidráulicas.

Diâmetro das fibras (PET)	d_f	0,027	mm
Diâmetro das fibras (PP)	d_f	0,037	mm
Densidade das fibras (PET)	ρ_f	1380	kg/m ³
Densidade das fibras (PP)	ρ_f	910	kg/m ³
Densidade dos grãos	ρ_s	2500	kg/m ³
Aceleração da gravidade	G	9,81	m/s ²
Viscosidade dinâmica da água	η_w	0,001	kg/m*s
Densidade da água	ρ_w	1000	kg/m ³
Fator de forma gt virgem	B	0,11	
Fator de forma gt impregnado ^(*)	B	0,14	

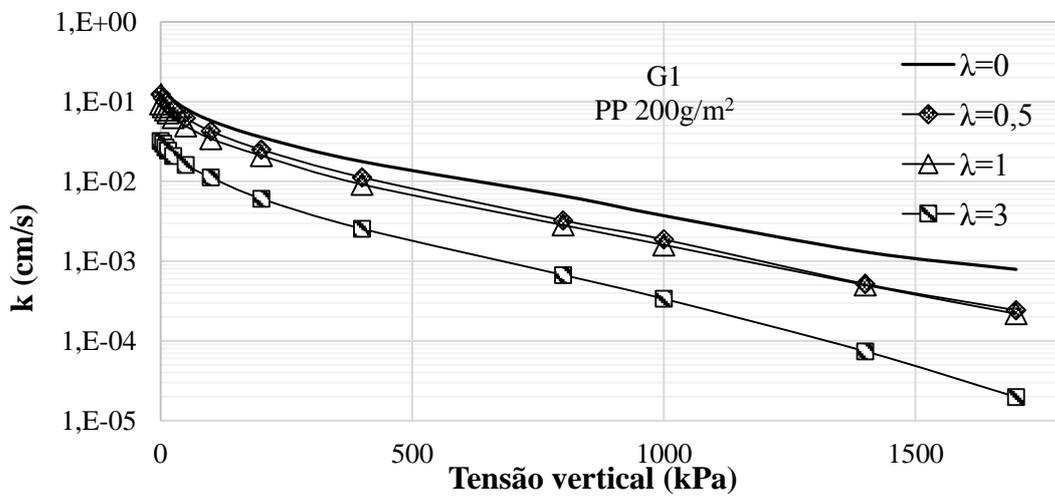
Nota: ^(*) Palmeira & Gardoni (2000b) ajustaram a equação de Giroud (1996) com os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados por eles e encontraram que o valor de β para amostras impregnadas é igual a 0,14.

A Equação 2.4, que foi apresentada por Giroud (1996) e modificada por Palmeira & Gardoni (2000b), é a única expressão das utilizadas que leva em conta o nível de impregnação da manta. Assim, cabe notar que a Equação 2.3 não foi inicialmente desenvolvida para espécimes de geotêxtil impregnados. Foram feitas comparações dos resultados obtidos por Gardoni (2000) em ensaios de laboratório para geotêxteis de poliéster de 200g/m², 300 g/m² e 600 g/m² virgens submetidos a tensão. Essas comparações são apresentadas nas Figuras 5.65 a 5.67.

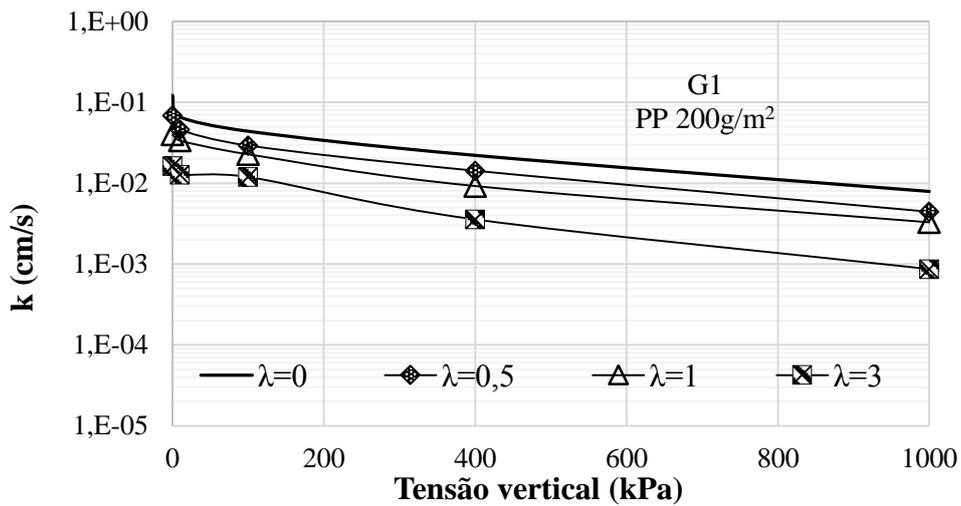
As Figura 5.63 a 5.69 apresentam os resultados de coeficiente de permeabilidade calculados por meio das metodologias mencionadas para os diferentes geotêxteis ensaiados.



(a)

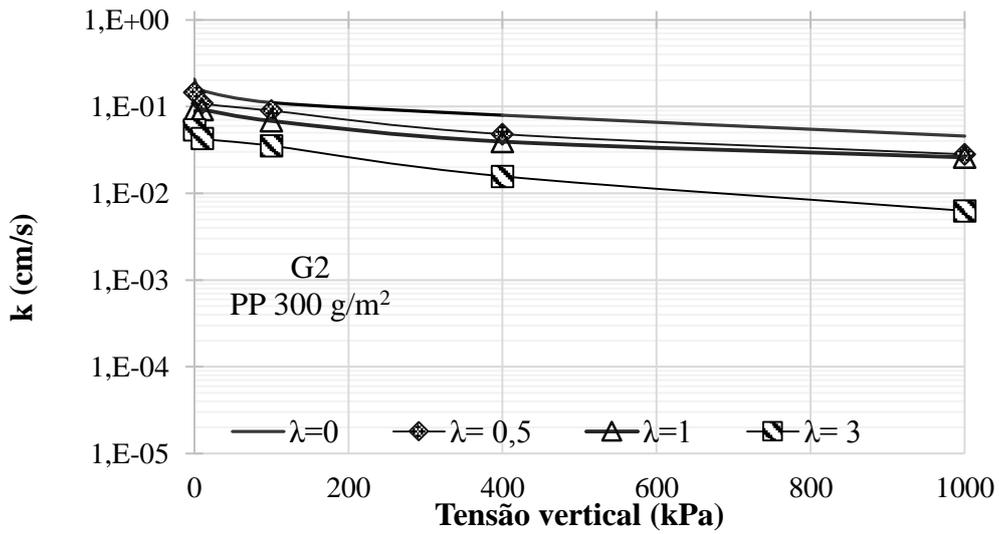


(b)

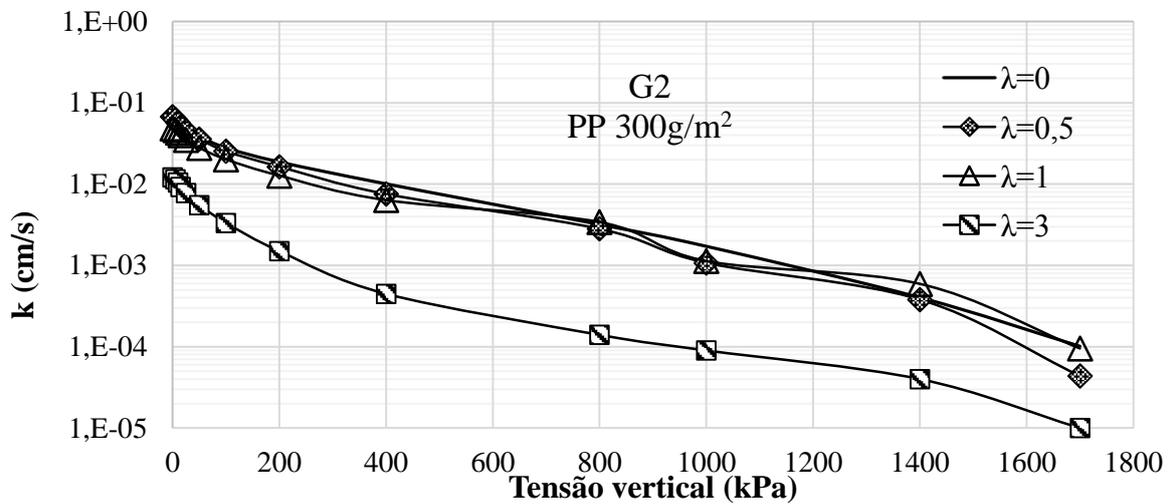


(c)

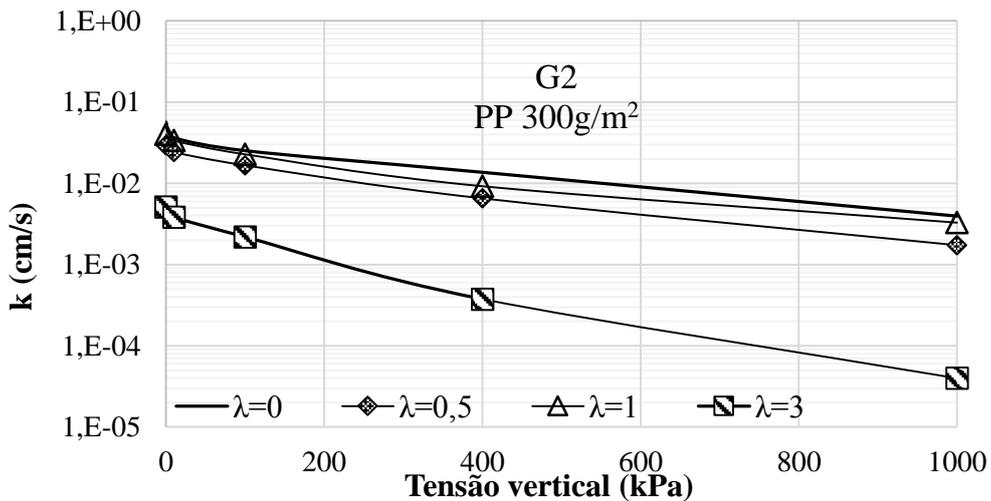
Figura 5.63 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G1 (PP 200 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.*(1995).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.64 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G2 (PP 300 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

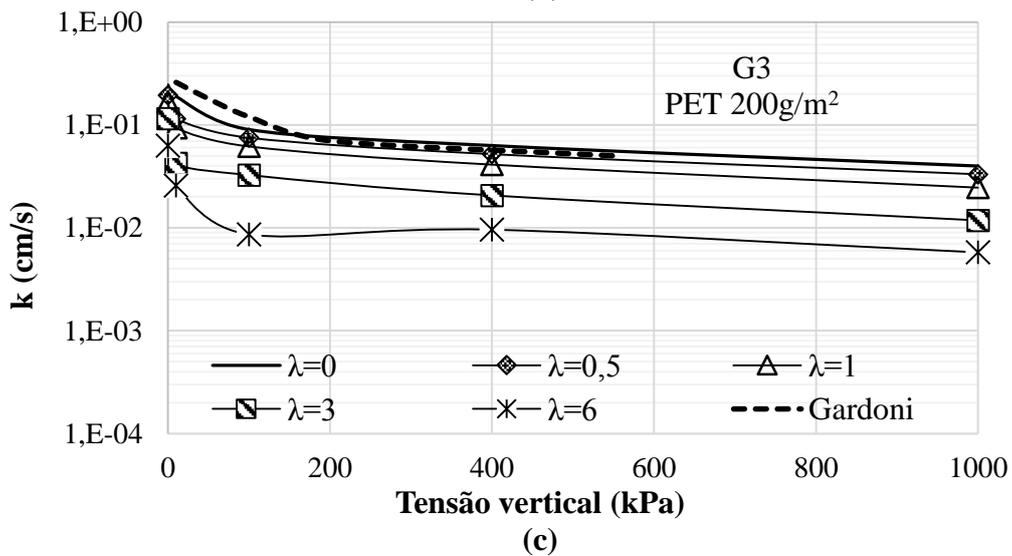
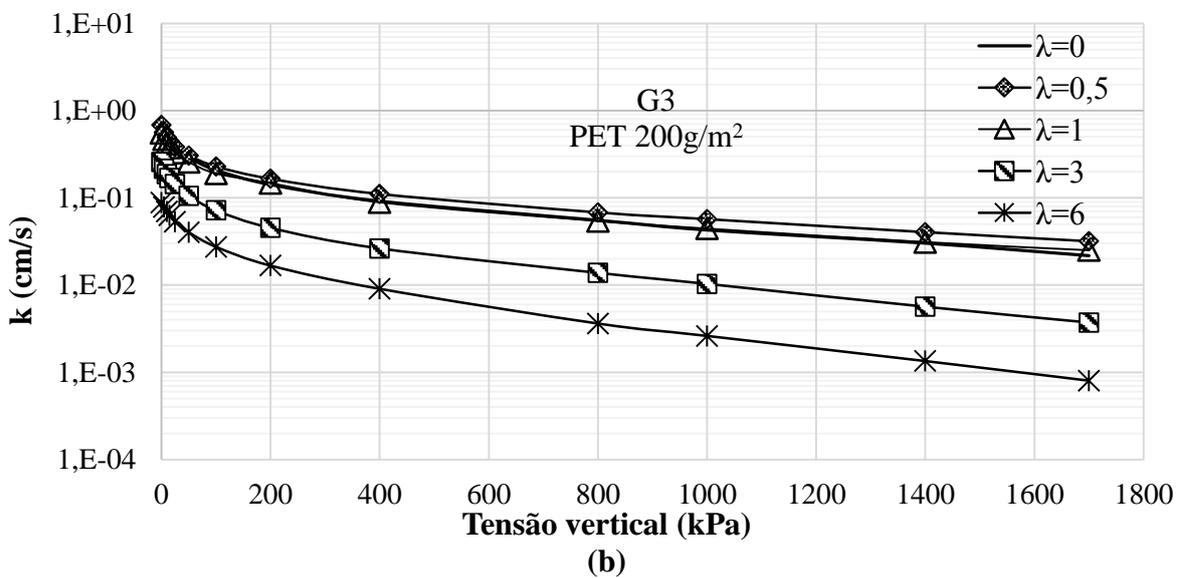
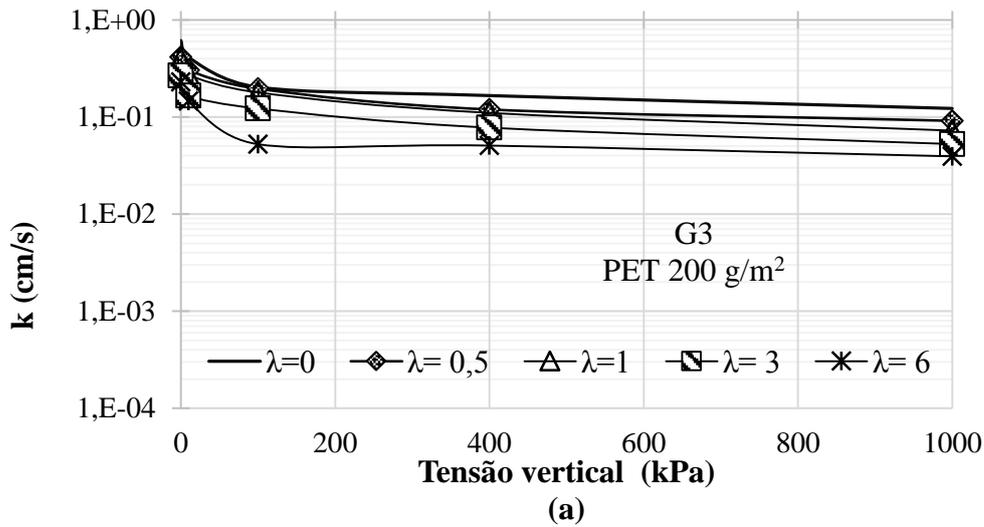


Figura 5.65 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G3 (PET 200 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

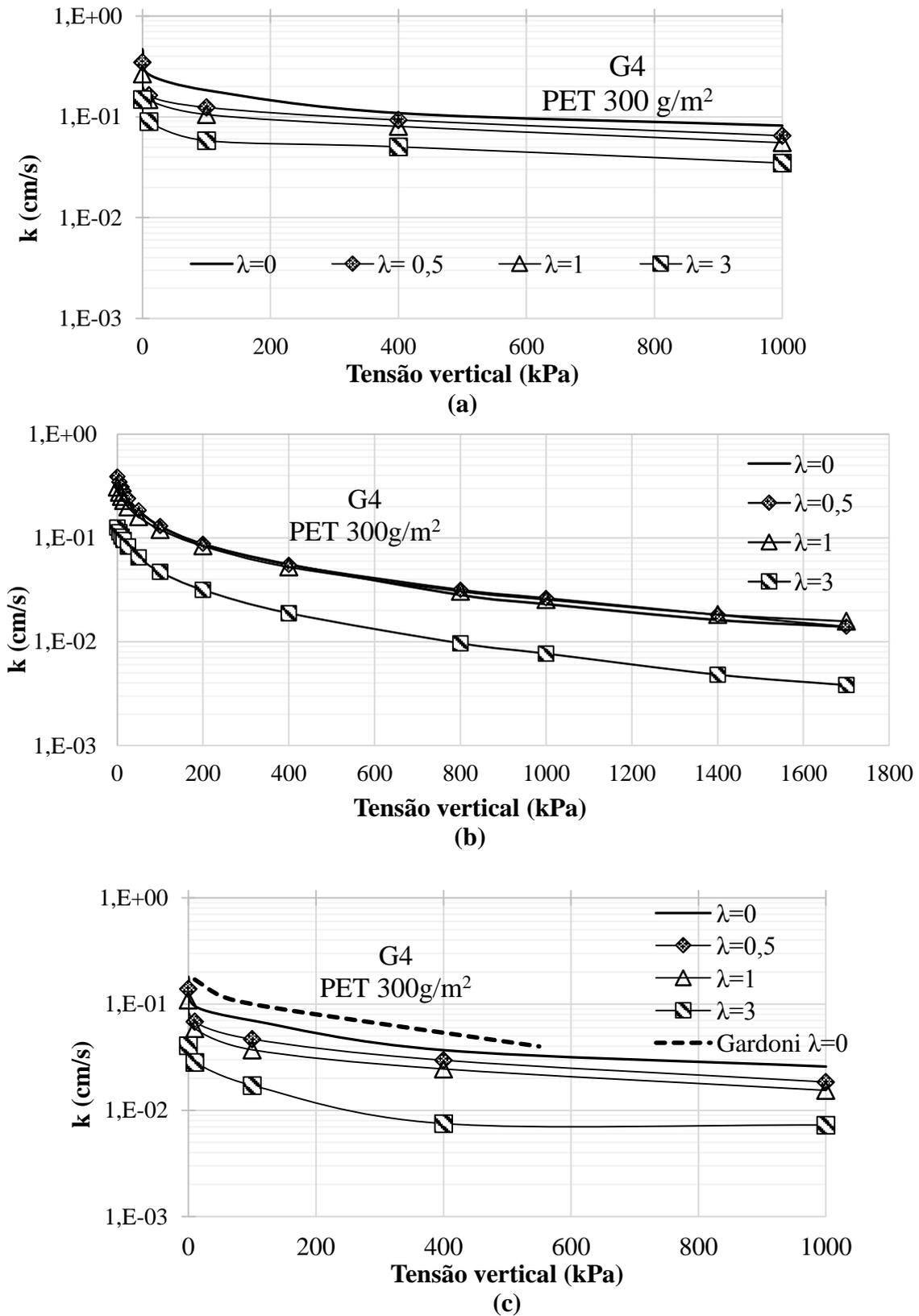


Figura 5.66 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G4 (PET 300 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

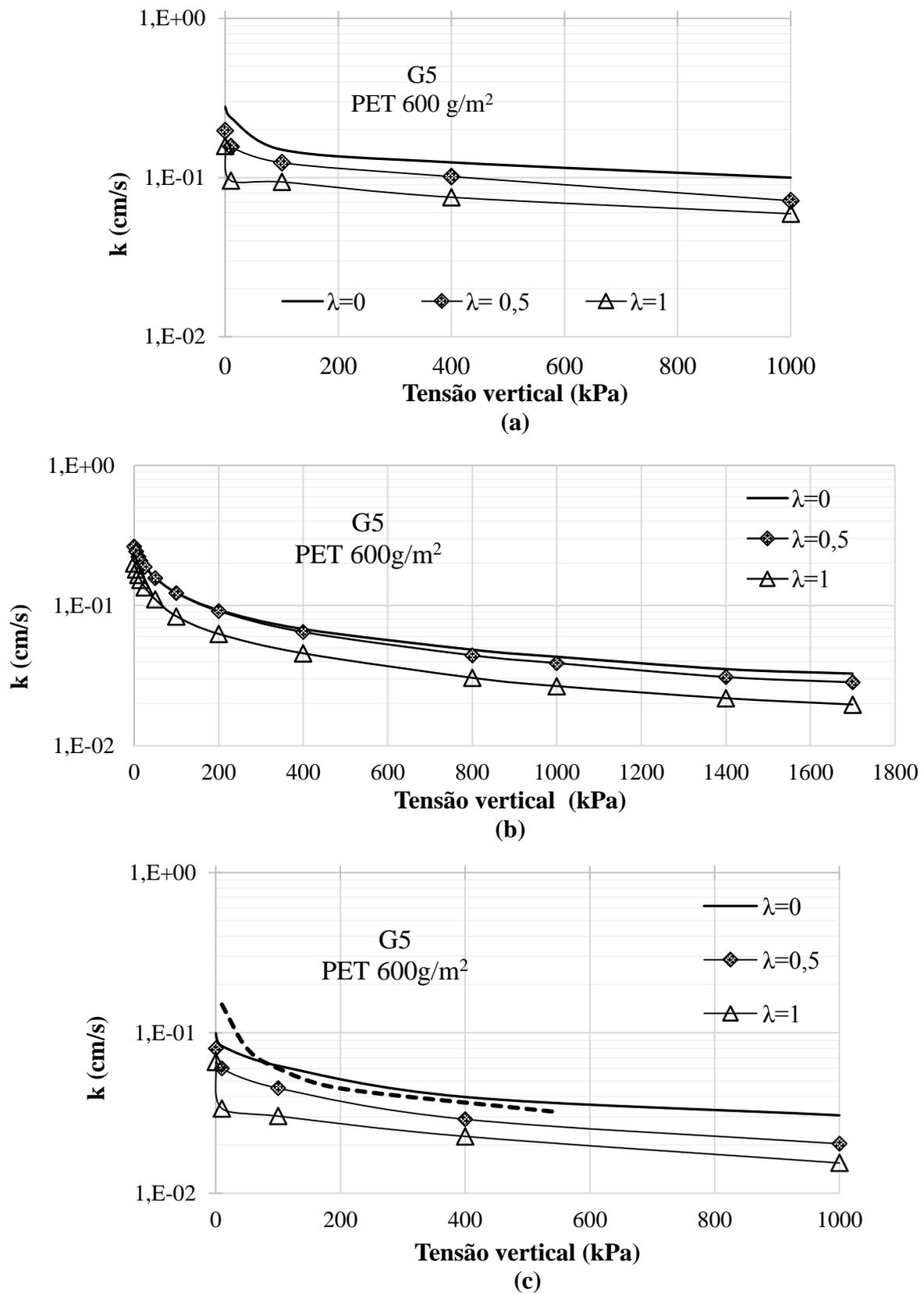


Figura 5.67 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G5 (PET 600 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

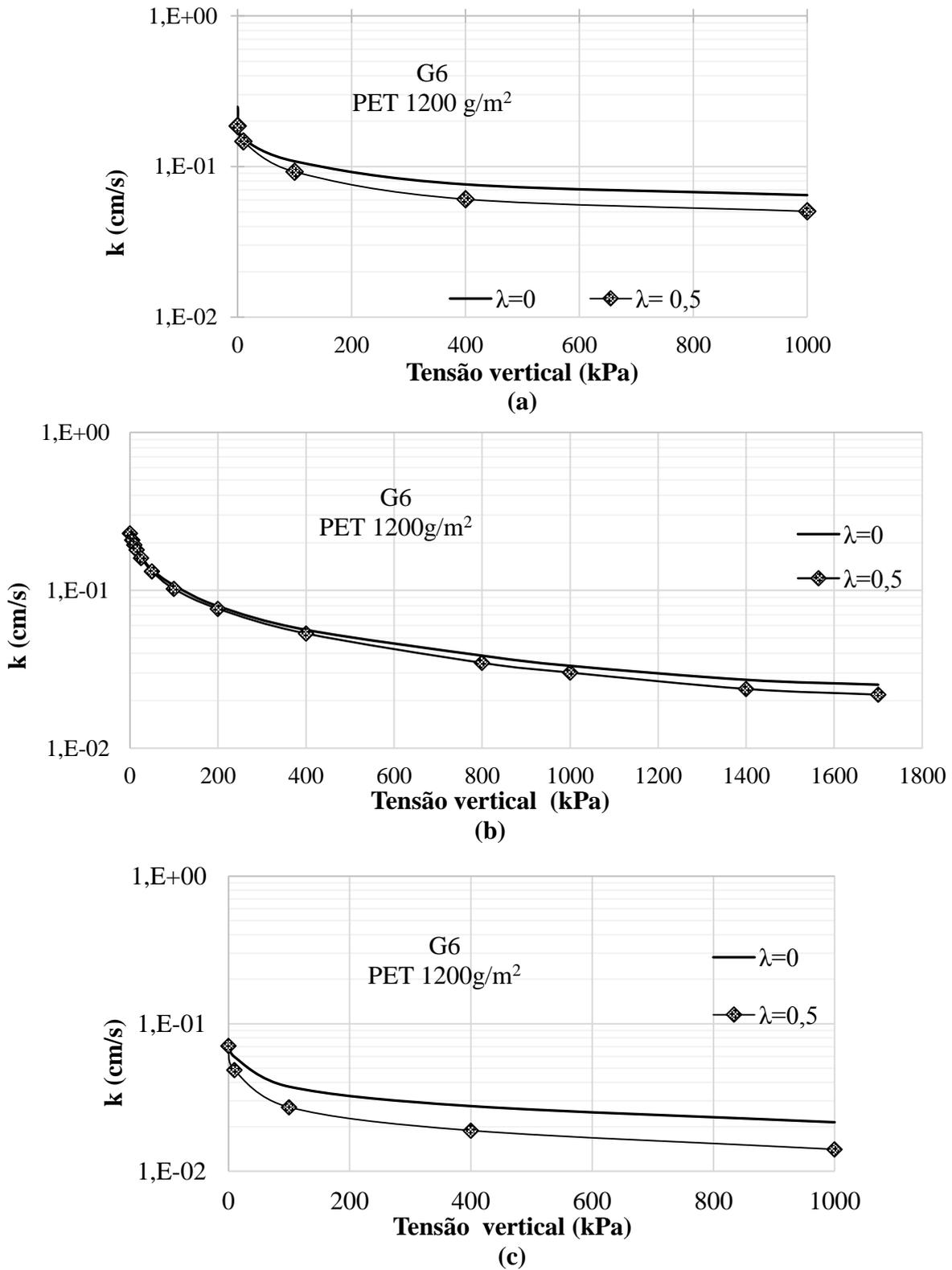


Figura 5.68 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G6 (PET 1200 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

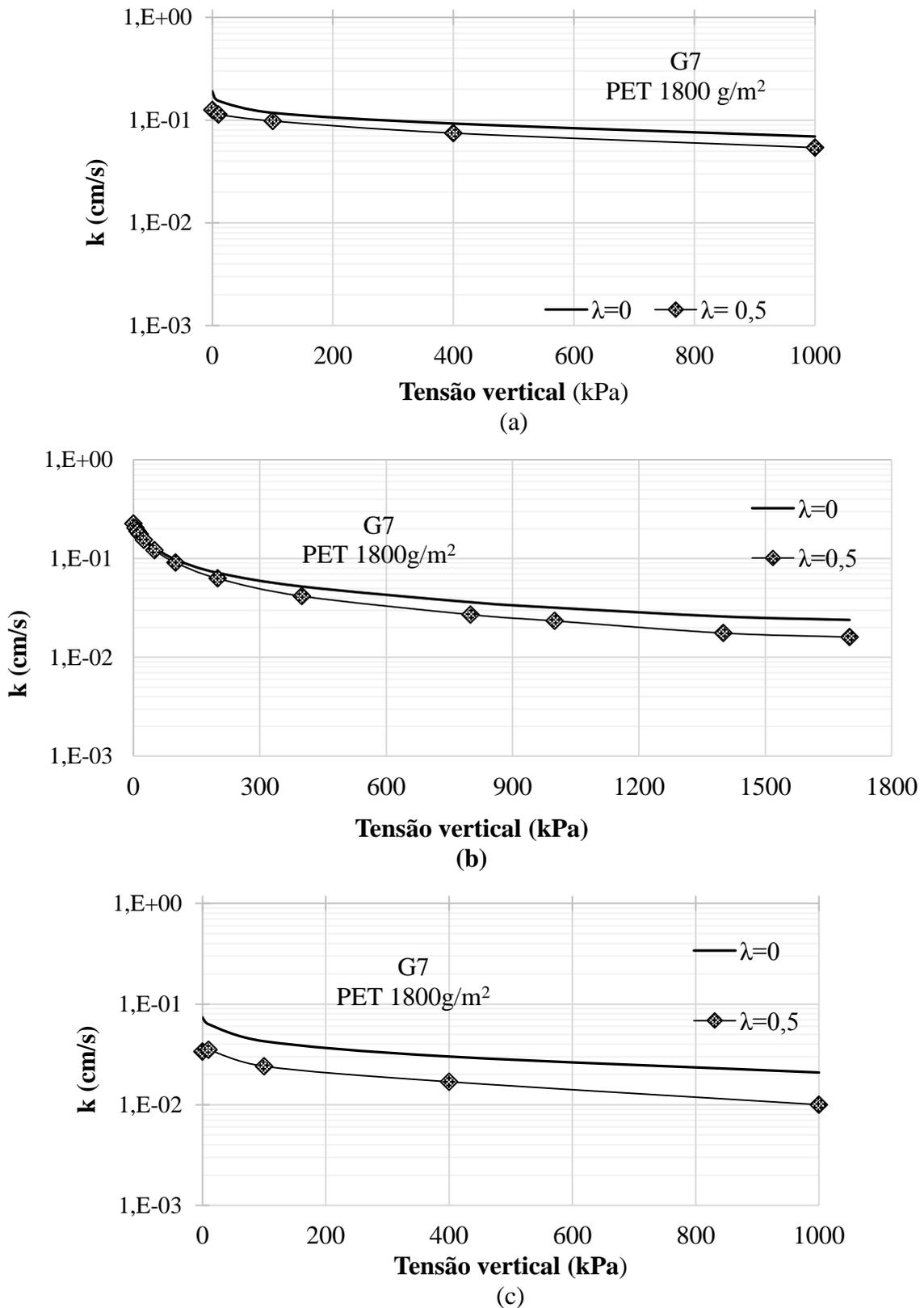


Figura 5.69 Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil submetido a tensão de compressão e impregnação para a amostra G7 (PET 1800 g/m²), (a) Giroud (1996) em função de O_{98} , e (b) Giroud (1996) modificado por Palmeira & Gardoni (2000b) e (c) Fischer *et al.* (1995).

A partir dos gráficos apresentados anteriormente, é possível afirmar para todas as amostras ensaiadas obteve-se uma redução do coeficiente de permeabilidade entre 55% e 95%, dependendo da metodologia empregada para o cálculo. Deve-se frisar que Palmeira e Gardoni (2000a) só obtiveram boas comparações entre resultados previstos pela Equação 2.3 e resultados de ensaios de permissividade para geotêxtil com gramatura mais baixa ($< 300 \text{ g/m}^2$).

Em geral, os valores de coeficiente de permeabilidade calculados situaram-se entre $6 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ e 10^{-4} cm/s . Na Tabela 5.9 são apresentados os valores típicos de coeficientes de permeabilidade para os diferentes tipos de solos. Pode-se notar que mesmo em condições impregnadas, os geotêxteis ainda seriam significativamente mais permeáveis que os solos de base na grande maioria das aplicações geotécnicas. Ou seja, ainda que impregnado (para a faixa de valores usadas nos ensaios), o filtro geotêxtil atenderia aos critérios de permeabilidade apresentados na Tabela 2.3 na grande maioria das situações práticas.

Tabela 5.9 Valores típicos do coeficiente de permeabilidade nos solos (Modificado- Ribeiro, 2013).

Permeabilidade		Tipo de solo	k (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-1}$
	Média	Areias	$10^{-1} - 10^{-3}$
	Baixa	Siltes e argilas	$10^{-3} - 10^{-5}$
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	$10^{-5} - 10^{-7}$
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-7}$

5.6.2. ABERTURA DE FILTRAÇÃO SOB CONDIÇÕES VIRGENS E IMPREGNADAS

A Equação 2.10, apresentada por Giroud (1996), foi utilizada para estimar aberturas de filtração dos geotêxteis ensaiados sob condições virgens e impregnados. Os valores previstos foram então comparados com os obtidos nos ensaios de ponto de bolha. Nos cálculos da abertura de filtração pela metodologia proposta por Giroud (1996) foram feitas calibrações com a finalidade de encontrar o valor de ξ que levasse ao melhor ajuste dos resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha. No caso dos geotêxteis de polipropileno (G1 e G2) o valor que apresentou melhor ajuste foi $\xi = 12,5$ para geotêxteis virgens e impregnados e no caso dos geotêxteis de

poliéster (G3 a G7) o valor de melhor ajuste foi $\xi = 15$. Esse último valor concorda com o encontrado por Gardoni & Palmeira (2002) em ensaios de filtração tipo Razão entre Gradientes.

Os valores de abertura de filtração obtidos variaram para geotêxteis de polipropileno e poliéster, já que a expressão usada relaciona as propriedades intrínsecas do material que compõe o geotêxtil. É importante ressaltar que os cálculos foram feitos levando em conta a porosidade efetiva do geotêxtil para os casos de impregnação, o que pode explicar por que o valor de ξ não muda significativamente para geotêxteis virgens ou impregnados.

A seguir é apresentada a comparação entre as aberturas de filtração (O_{95}) obtidas nos ensaios de ponto de bolha e previsões pela metodologia proposta por Giroud (1996) (Equação 2.10) para todos os geotêxteis ensaiados. A Figura 5.70 mostra os resultados obtidos para geotêxteis virgens, enquanto a Figura 5.71 apresenta os resultados para os geotêxteis impregnados e submetidos a compressão. As mesmas análises também foram realizadas para o valor de O_{98} , e as Figuras 5.71 e 5.72 apresentam as comparações para geotêxteis virgens e impregnados, respectivamente.

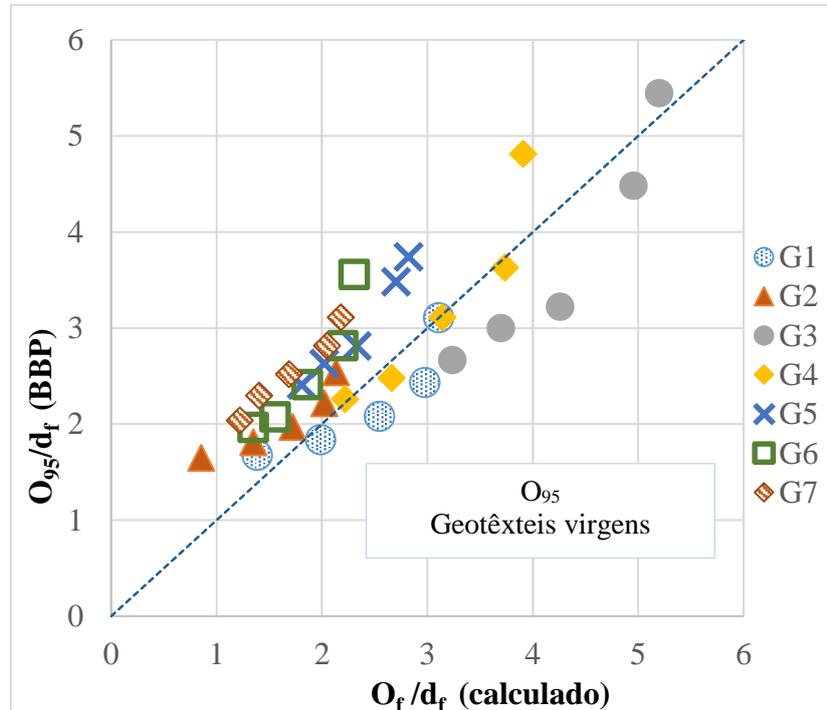


Figura 5.70 Comparação entre abertura de filtração (O_{95}) normalizada dos geotêxteis virgens obtida no *Bubble point test* com o método de Giroud (1996).

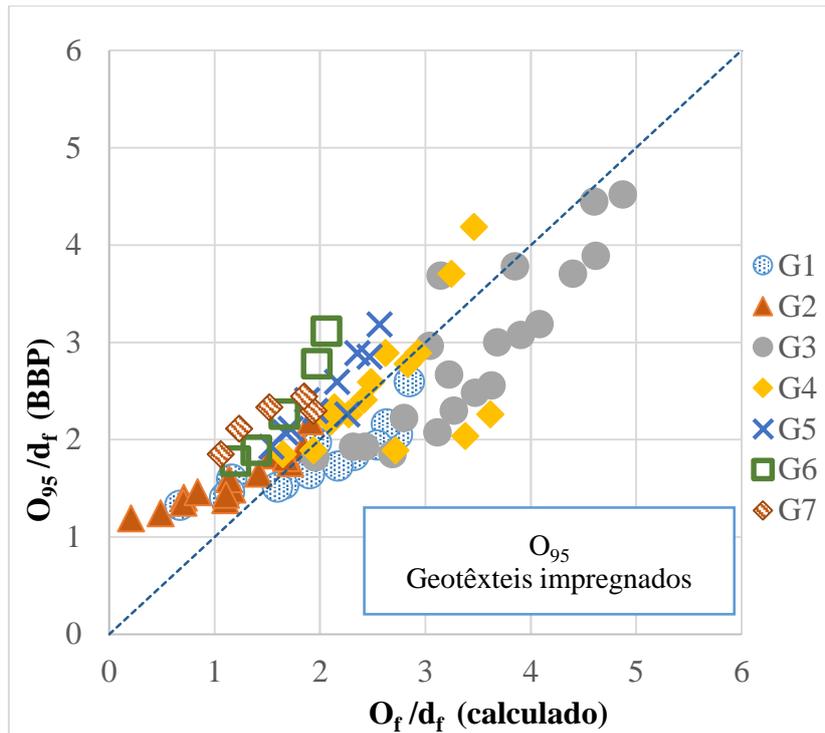


Figura 5.71 Comparação entre abertura de filtração (O_{95}) normalizada dos geotêxteis impregnados obtida no *Bubble point test* com o método de Giroud (1996).

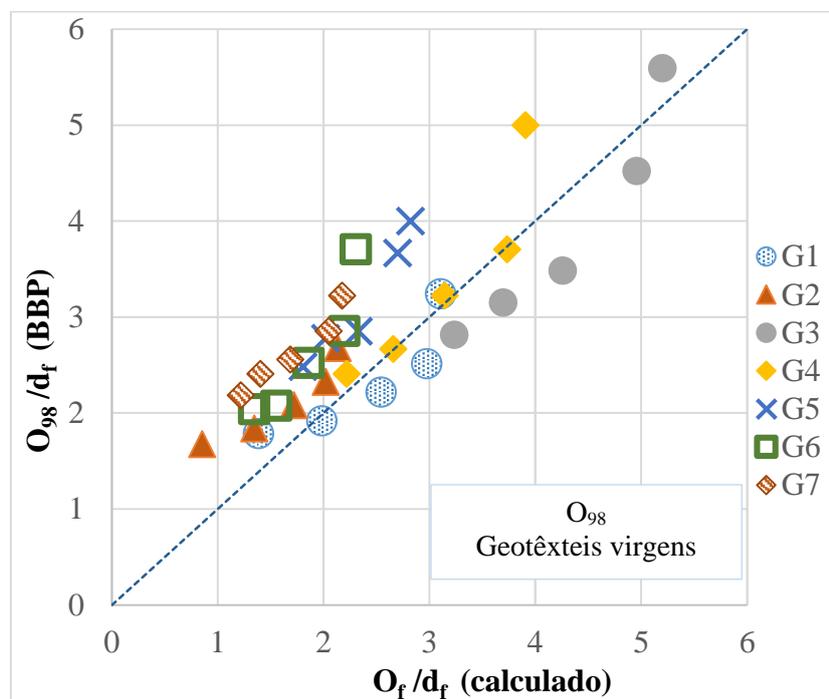


Figura 5.72 Comparação entre abertura de filtração (O_{98}) normalizada dos geotêxteis virgens obtida no *Bubble point test* com o método de Giroud (1996).

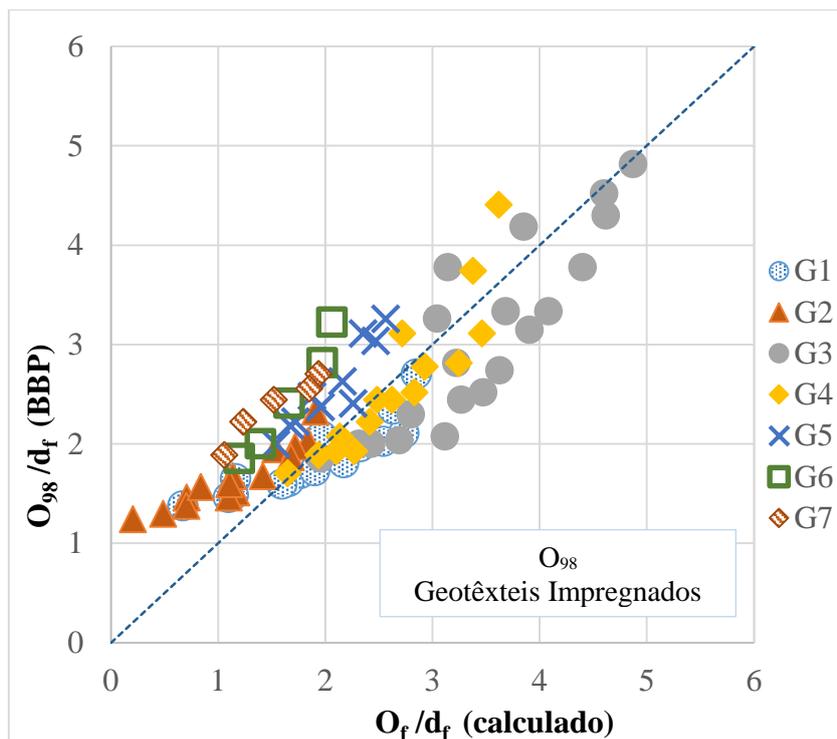


Figura 5.73 Comparação entre abertura de filtração (O_{98}) normalizada dos geotêxteis impregnados obtida no *Bubble point test* com o método de Giroud (1996).

Como observado nas Figuras 5.71 a 5.73, de forma geral as previsões pelo método simples proposto por Giroud (1996) se mostraram satisfatórias para valores de ξ igual a 12,5 para os geotêxteis de polipropileno e igual a 15 para os geotêxteis de poliéster sob confinamento e impregnados. As maiores discrepâncias entre previsões e medições foram observadas para valores de O_f/d_f menores que 1.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou avaliar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento e impregnação, de forma isolada e conjunta, visando contribuir para o entendimento da influência nas propriedades hidráulicas e também em alguns critérios de filtro. Para isso utilizou-se o ensaio de ponto de bolha (*Bubble Point Test* – BBP), por meio de equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília.

O equipamento e a metodologia empregados nos ensaios para a determinação da distribuição das aberturas dos geotêxteis se mostraram adequados, considerando o intervalo de tamanhos de poros esperados. Os ensaios de ponto de bolha apresentaram excelente repetibilidade e acurácia nos ensaios de calibração realizados. Os resultados obtidos permitiram estudar o comportamento da abertura de filtração dos geotêxteis não tecidos, agulhados, de poliéster ou polipropileno e diferentes gramaturas, quando submetidos às tensões normais entre 10 kPa e 1000 kPa e níveis de impregnação de até $\lambda = 6$.

Mesmo sendo de matérias diferentes os geotêxteis G2 e G4 (300g/m²) apresentaram compressibilidades muito parecidas, exceto para o teor de impregnação $\lambda=3$. Os geotêxteis de poliéster mostraram redução na compressibilidade com o aumento da gramatura (G3, G4 e G5). Por outro lado, as combinações de duas e três camadas de geotêxtil de 600g/m² (G6 e G7) mostraram reduções percentuais de espessuras semelhantes às de uma só camada de 600g/m².

Como era esperado, a compressibilidade do geotêxtil diminuiu com o aumento do nível de impregnação para todos os geotêxteis estudados, isso aconteceu devido à presença das microesferas de vidro nos vazios do geotêxtil, o que torna o geotêxtil menos compressível.

No ensaio de compressão uniaxial, o geotêxtil G2 (PP 300g/m²) apresentou uma mudança abrupta nas deformações para o nível de tensão maiores a 800 kPa, possivelmente devido à quebra das partículas das microesferas de vidro. Essas mudanças são mais notórias nos teores de impregnação maiores.

De forma geral, previsões por equação proposta por Giroud (1996) para estimativa da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos compararam satisfatoriamente com os resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha, tanto para ensaios em amostras virgens quanto em ensaios em

amostras impregnadas. As maiores discrepâncias entre previsões e medições foram observadas para valores de O_f/d_f menores que 1.

Os resultados mostraram que quando submetidos às condições analisadas de tensão (até 1000 kPa) e impregnação (até $\lambda=6$), os geotêxteis podem aumentar consideravelmente a sua capacidade de retenção e a sua permeabilidade continua sendo muito maior do que a de solos comumente utilizados em sistemas filtro-drenantes.

As aberturas de filtração obtidas para as amostras de polipropileno (G1 e G2), assim como os coeficientes de permeabilidade, foram menores que os valores obtidos para seus correspondentes em poliéster (G3 e G4).

De forma geral, foi encontrado que quanto maior a gramatura menor a abertura de filtração. A gramatura, espessura e o tipo de material do geotêxtil influenciaram os resultados obtidos de compressibilidade, abertura de filtração e permeabilidade. Estes são fatores importantes que apresentam grande relação com as propriedades hidráulicas. Os geotêxteis G1 e G3, mesmo tendo igual gramatura, não apresentaram propriedades hidráulicas iguais ou muito similares, motivo pelo qual não se deve adotar aquela propriedade física do geotêxtil de maneira isolada para estimar outras propriedades.

As previsões realizadas pelas equações para o coeficiente de permeabilidade de geotêxteis disponíveis na literatura foram comparadas. Observaram-se diferenças significativas entre os resultados obtidos pela metodologia proposta por Giroud (1996) e pela equação modificada por Palmeira & Gardoni (2000^a) e a apresentada por Fischer *et al.* (1995). As duas últimas metodologias mencionadas, apresentaram melhor concordância nos valores obtidos por Gardoni (2000) para os geotêxteis de poliéster de 200 g/m², 300 g/m² e 600 g/m² avaliados sob confinamento em ensaios de laboratório. Segundo as análises com as metodologias de cálculo empregadas, obteve-se uma redução do coeficiente de permeabilidade entre 55% e 95%.

Em geral, os valores de coeficiente de permeabilidade calculados situaram-se entre 6×10^{-1} cm/s e 10^{-4} cm/s e mesmo em condições impregnadas (para a faixa de valores usadas nos ensaios), os geotêxteis ainda seriam significativamente mais permeáveis que os solos de base na grande maioria das aplicações geotécnicas.

A metodologia de cálculo modificada por Palmeira & Gardoni (2000b) e a expressão apresentada por Fischer *et al.*(1995), mostraram boa concordância nos valores de coeficiente de permeabilidade obtidos. Para as amostras G3, G4 e G5 foi possível fazer a comparação com resultados dos ensaios de laboratório feitos por Gardoni (2000) para geotêxteis virgens submetidos a compressão, e também foi obtida boa concordância. Essas duas metodologias se mostraram satisfatórias para a estimativa do coeficiente de permeabilidade para geotêxteis impregnados.

6.1.1. EFEITO DA TENSÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

Segundo as análises realizadas nesta pesquisa, a tensão gera maiores reduções da abertura de filtração nos geotêxteis de gramaturas menores, assim para G1 (PP 200g/m²), G3 (PET 200g/m²) e G4 (PET 300g/m²) o valor da abertura de filtração apresentou redução de aproximadamente 50% para a tensão máxima avaliada (1000kPa), enquanto que para o resto de amostras essa redução foi menor ou igual a 40%.

Os geotêxteis de 200g/m² (G1 e G3) apresentaram uma redução na abertura de filtração de 50%, enquanto que os geotêxteis de 300g/m² (G2 e G4) mostraram comportamentos diferentes, foram obtidos valores de 37% para a amostra G2 e de 50% para a amostra G4. Segundo esses resultados, os geotêxteis de poliéster se mostraram mais susceptíveis ao nível de tensão do que os geotêxteis de polipropileno.

6.1.2. EFEITO DA IMPREGNAÇÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

Para os níveis de impregnação analisados, foi obtida uma redução na abertura de filtração de máxima de 38% (G2 e G4, com $\lambda=3$), pelo que é possível afirmar que para as condições de tensão e impregnação avaliadas nesta pesquisa, o aumento da tensão vertical gera uma maior redução no valor da abertura de filtração do que a impregnação.

Para o teor de impregnação de $\lambda=0,5$, todos os geotêxteis avaliados apresentaram uma diminuição na abertura de filtração variando entre 12% e 19%, quando comparado com o valor obtido para os geotêxteis virgens.

Os geotêxteis G1, G2, G3 e G4 mostraram redução no valor da abertura de filtração entre 25% e 38% para um nível de impregnação $\lambda=3$, sendo maior nos geotêxteis de maior gramatura (PP e PET de 300g/m²), ambos com 38%. Enquanto que para G1 (PP 200g/m²) foi de 36% e para G3 (PET 200g/m²) foi de 25%.

6.1.3. EFEITO TENSÃO-IMPREGNAÇÃO NA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

A máxima redução apresentada na abertura de filtração nas condições mais críticas (máximo nível de tensão e impregnação avaliados) foi de 67% quando comparado com o valor obtido para as condições virgens, e foi apresentado pela amostra G3 (tensão de 1000 kPa e $\lambda=6$). O maior valor de abertura de filtração encontrada nos geotêxteis ensaiados foi de 0,151mm (G3- virgem) e o mínimo foi de 0,044 mm (G2 e G4, com $\sigma = 1000$ kPa e $\lambda = 3$).

Para o teor de impregnação de $\lambda=0,5$ e tensão de 1000 kPa, todos os geotêxteis avaliados apresentaram reduções entre 40% e 60% no valor da abertura de filtração. De forma geral, com o aumento da gramatura a redução foi menor.

Para os geotêxteis G1, G2, G3 e G4 foram obtidas reduções no valor da abertura de filtração entre 55% e 65%, considerando um nível de tensão de 1000kPa e um teor de impregnação de $\lambda=3$.

6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com intuito de contribuir para a obtenção de resultados mais acurados nos ensaios e ampliar a base de dados deste tipo de estudos, são apresentadas abaixo algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Automatizar e melhorar a acurácia das medidas, particularmente no que se refere a pressões e vazões muito baixas;
- Ensaiar outros tipos de geotêxteis e condições de fronteira;

- Construir uma célula de ensaios que permita a aplicação de confinamento no espécime diretamente, com a finalidade de evitar a necessidade dos ensaios de compressibilidade e de se costurar as amostras, o que é muito trabalhoso e demanda muito tempo;
- Utilizar outras técnicas para se atingir maiores teores de impregnação dos geotêxteis;
- Utilizar outros tipos de materiais para impregnar o geotêxtil, tais como areias e silte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2013). Geossintéticos - Determinação da capacidade de fluxo no plano. NBR ISO 12958. ABNT, São Paulo, 9p.
- ABNT (2013). Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área. NBR ISO 9864. ABNT, São Paulo, 3p.
- ABNT (2013). Geossintéticos-terminologia. NBR ISO 10318. ABNT, Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (2013). Geotêxteis - Determinação da espessura - Método de ensaio. NBR ISO 9863-1. ABNT, São Paulo, 2p.
- ABNT (2013). Geotêxteis – Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. NBR ISO 9862, Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT (2013). Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da abertura de filtração característica. NBR ISO 12956. ABNT, São Paulo, 7p.
- ABNT (2013). Geotêxteis e produtos correlatos — Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento. NBR ISO 11058. ABNT, São Paulo, 18p.
- Aguiar, P.R. & Vertematti, J.C.(2004). Aplicações em filtração. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Vertematti (Ed.), Editora Edgar Blucher Ltda. ABINT, São Paulo, SP, pp. 175-196.
- ASTM (2010). Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, ASTM D 5261. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 3p.
- ASTM (2011). Standard Test Method for Permittivity of Geotextiles Under Load, ASTM D 5493. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 5p.
- ASTM (2012). Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes, ASTM D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216-218.
- ASTM (2014). Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head, ASTM D 4716. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 10p.
- ASTM (2014). Standard test method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test, ASTM D 6767. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6p.
- Basham, D.L., Wright, J.W., Ferguson, K.I. & Moy, G.W. (2004). Engineering Use of Geotextiles. U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command & Air Force Civil Engineering Support Agency. TM 5-818-8/AFJMAN 32-1030. Washington, D.C., USA. 58 p.
- Bueno, B. & Vilar, O.M. (2004). Propriedades, Ensaio e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti (ed.), Editora Edgar Blucher Ltda, ABINT, São Paulo, SP, pp. 27-63.

- Bhatia, S.K., Smith, J.L. and Christopher, B.R. (1996). Geotextile Characterization and Pore-Size Distribution: Part III. Comparison of Methods and Application to Design, *Geosynthetics International*, Vol. 3, No. 3, pp. 301-328.
- Campbell, R. P. & Wu, J. T. H. (1994). In-plane flow of four geosynthetics for landfill drainage. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 17(1): 3-16.
- Carrol, R. G. JR. (1983). Geotextile Filter Criteria in Design Parameters in Geotechnical Engineering. BGS, London, Vol. 2, pp. 121-129.
- Christopher, D. R. & Fischer, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11: 337-353.
- Corbet, S.P. (1993). The Design and Specification of Geotextiles and Geocomposites for Filtration and Drainage. *Geotextiles in filtration and drainage*. Corbet, S.P. & King, J. (Eds). Thomas Telford, London, UK, pp. 29-40.
- Costa, C. M., Lodi, P.C., Costa, Y.D. & Bueno, B.S. (2008). Avaliação de Recomendações Normativas sobre o Uso de Ensaios no Controle de Qualidade de Fabricação de Geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, pp. 158-169.
- Degoutte, G. (1987). Practical examples of geotextile used in small earth dams. *Geotextiles and Geomembranes*, 5(4), pp.239–250.
- Duquennoi, C., Gallo, R. & Thomas, A. (2008). Investigating the Relationship between Creep and Water Flow Capacity of Geosynthetics. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*. Li, G., Chen, Y. & Tang, X. (Eds.). *Geosynthetics Asia 2008, Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China*, pp. 3-7.
- Elton, D.J., Hayes, D.W., Adanur, S. (2006). Bubblepoint testing of geotextiles: apparatus and operation. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 1:1-8.
- Elton, D.J. & Hayes, D.W. (2007). The Bubblepoint Method for Characterizing Geotextile Pore Size. *Geosynthetics in Reinforcement and Hydraulic Applications*. ASCE, 10p.enoble 1, France, 344 p.
- Eun, J.W. & Tinjum, J.M. (2011). Variation in Air Entry Suction of Nonwoven Geotextiles with Pore Size Distribution. *Unsaturated Soils: Theory and Practice - Jotisankasa, Sawangsuriya, Sorlump and Mairaing (Editors)*, Kasetsart University, Thailand, p.p.553-558.
- Faure, Y.H. (1988). Approche structural du comportement filtrant des geotextiles, PhD. Thesis, Université Joseph Fourier-Gr
- Faure, Y.H., Baudoin, A., Pierson, P. & Plé, O.(2005). A contribution for predicting geotextile clogging during filtration suspended solids. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, pp. 11-20.
- Faure, Y. H., Farkouth, B. & Nancey, A. (1999). Analysis of geotextile filter behavior after 21 years in Valcros dam. *Geotextiles and Geomembranes* 17, pp. 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.
- FEMA (2008). *Geotextiles in Embankment Dams: Status Report on the Use of Geotextiles in Embankment Dam Construction and Rehabilitation*. Federal Emergency Management Agency.USA, 254 p.

- Ferreira, L. M. (2001). Geotêxteis e suas aplicações. Seminário: A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação. Universidade da Beira Interior. Ubitex. Covilhã, Portugal, pp. 10-20.
- Fischer, G.R., Holtz, R.D. and Christopher, B.R.(1995), “Characteristics of Geotextile Pore Structure”, Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites, Bhatia, S.K. and Suits, L.D., Editors, ASTM Special Technical Publication 1281, proceedings of a symposium held in Denver, Colorado, USA, June 1995, in press.
- Freitas, R.A. (2003). Comportamento de Geotêxteis como Filtro em Resíduos- Fosfogesso e Lama Vermelha. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 122p.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.
- Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1999). Transmissivity of geosynthetics under high normal stresses. Geosynthetics'99, Boston, Massachusetts, USA, 2: 769-782.
- Gardoni, M.G.. & Palmeira, E.M (2002). Microstructure and Pore Characteristics of Synthetic Filters Under Confinement. Geotechnique, Vol. 52, No. 6, p. 405-418.
- Gardoni, M. G. A. (1995). Avaliação da Aplicabilidade de 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: pp.127-133.
- Giroud, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture & Keynote Lectures, pp. 3-27. BUSCAR EN 2005 PA VER SI TIENEN LO MISMO
- Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. Geofilters'96. J. Lafleur & Rollin A.L. (eds.). Montreal. Quebec. Canada, pp. 565-678.
- Gourc, J. P. & 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.
- GMA, (2002). Handbook of Geosynthetics. Geosynthetics Materials Association. USA, 64p.
- Gobla, M.J. (2009). Geotextiles in Embankment Dams. U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation. Reclamation managing water in the west. USA, 28 p.
- Hernández, C.A.O. (2012). Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões água-solo. São Carlos, 2012. Dissertação de mestrado – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 140 p.

- Holtz, R. D., Christopher, B. R. & Berg, R.R. (1998). Geosynthetic design and construction guidelines. Participant Notebook. U.S. Federal Highway Administration FHWA. Washington, D.C., pp. 31-54.
- Hutten, I. M. (2007). Filtration Mechanisms and Theory. Handbook of non-woven filter media. Hutten (ed.). Elsevier Science & Technology Books. Delray Beach, USA. pp. 29-70.
- IGS (2000). Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols. South Carolina, U.S.A. 17 p
- John, N.W. (1987). Geotextiles. Blackie and Son. Glasgow, New York. USA. 347 p.
- Koerner, R. M. (2005). Designing with Geosynthetics, fifth Edition, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, pp 29-157.
- Koerner, R.M., Bove, J.A. & Martin, J.P. (1984). Water and Air Transmissivity of geotextiles. Geotextiles and Geomembranes 1, pp. 57-73.
- Lafleur, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. Geotextiles and Geomembranes, (17), pp. 299-312.
- Lafleur, J. & Paré, J.J. (1991). Use of geotextiles in the James Bay hydroelectric project. Geotextiles and Geomembranes, 10(1), pp.35-52.
- Lafleur, J. & Rollin, A. (1983). "Discussion of "Filter Criteria for Geotextiles: Relevance and Use" by Chris R. Lawson (October, 1982)." Journal of Geotechnical Engineering., 109(12), pp.1630-1632.
- Lima, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Liu, L.F. Li, R. H. & Chi, J.K. (2008). Study on Vertical Permeability Coefficient of Nonwoven Geotextile. Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering. Li, G., Chen, Y. & Tang, X. (Eds.). Geosynthetics Asia 2008, Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China, pp. 8-10.
- Lombard, G. (1985). Analyse et Comportement Hydraulique des Geotextiles Thermolies et Thermosoudes. Ph. D. Thesis, École Polytechnique, Université de Montréal, Québec, Canadá, 271p.
- Luetlich, S.M., Giroud, J.P. & Bachus, R.C. (1992). Geotextile Filter Design Guide. Geotextiles and Geomembranes, (11), pp. 335-370.
- Messias da Silva Da Silva, A. (2014). Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento. Tese de mestrado, Publicação G.DM – 247/2014 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.
- Muñoz, C.S. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 119p.
- Murty, A.V.S.R., Mathur, S., Chandra, D. & Rao, N. (1994). Selection of geotextile filters wrapped around pipes in pavement edge drains. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 13, N. 8, pp. 519-529.
- Palmeira, E.M. (2003). Notas de Aula de Ensaios em Geossintéticos, Propriedades de Filtração, Determinação da Abertura de Filtração de Geotêxteis. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 39p.

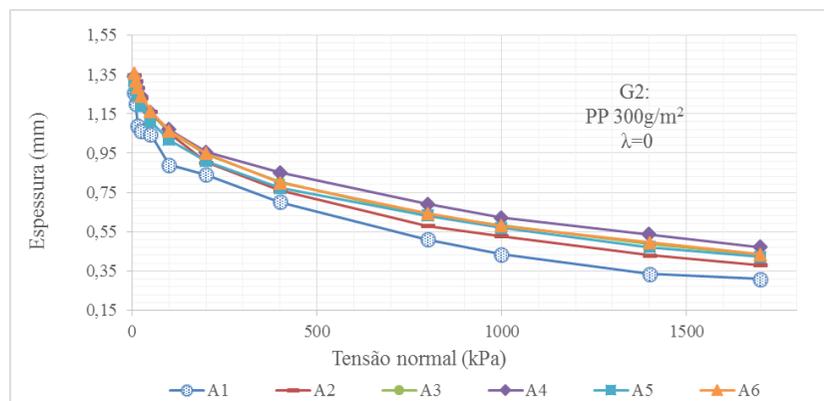
- Palmeira, E.M. & Fannin, R.J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration – Keynote Lecture. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, vol. 3, pp. 853-870.
- Palmeira, E.M. Fannin, R.J. & Vaid, Y.P. (1996). A study on the behavior of soil-geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, December, p. 899-912.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2000a). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International* 7 (4–6), 403–431.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2000b). Geotextiles in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges. In: Mallek, A. (Ed.), *International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85–110.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes* 20(2), pp. 97-115.
- Palmeira, E.M., Gardoni, M.G. & Bessa da Luz, D.W. (2005). Alguns aspectos ligados ao comportamento de sistemas filtro-drenantes sintéticos em obras de estabilização de encostas. IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - Salvador-BA. Pp.287-300.
- Palmeira, E.M., Beirigo, E.A. & Gardoni, M.G. (2010). Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, N.2, pp. 136-148.
- PAVCO . (2012). Manual de diseño con geosintéticos. Departamento de Ingeniería, 9ª edición, Colombia, 434p.
- Perez Ones, Osney; Diaz Rodriguez, Jorge; Zumalacarregui, Lourdes & Goza Leon, Osvaldo. Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (II). *Rev.fac.ing.univ. Antioquia* [online]. 2010, n.52, pp. 62-74. ISSN 0120-6230.
- Rankilor, P.R. (1985). The specification and use of geotextile fin drains. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 2, N.2, pp. 129-149.
- Raumann, G. (1982). In-plane permeability of compressed geotextiles. *Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, pp. 55-60.
- Ribeiro, L.F., (2013). Notas de Aula de laboratório de geotecnia, ensaio de permeabilidade. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 14p.
- Rigo, J. M., Lhote, E, Rollin, A. L., Mlynarek, J., and Lombard, G. (1990). Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination, *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I. D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 90-101.
- Rollin, A.L. & Lombard, G.(1988). Mechanisms Affecting Long-Term Filtration Behavior of Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 7, pp. 119-145.
- Rollin, A. L., Masounave, J. & Lafleur, J. (1982). Pressures drop through nonwoven geotextiles. A new analytical model. *Second International Conference on Geotextile*, Las Vegas, USA, pp. 161-166.
- Sato, M., Yoshida, T. & Futaki, M. (1986). Drainage performance of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 4, N. 3-4, pp. 223-240.

- Shober, W. & Teindl, H. (1979). Filter Criteria for Geotextiles. Design Parameters Geotechnical Engineering, BGS, London, 2: 121-129.
- Shukla, S. K. & Yin, J. H. (2006). Fundamentals of Geosynthetic Engineering. Taylor & Francis Group, London, UK, pp 47-96.
- Spada, J.L. (1991). Ensaio de Filtração em solos com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 180 p.
- Tatto, J. (2010). Comportamento Filtrante de Geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-186/10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.
- Vermeersch, O.G., Mlynarek, J & Desrochers, J.F. (1997). Pore Size Distribution of Non woven Geotextile Filters Under Compression Stress. Geosynthetics 97 Conference Proceedings. Pp. 1109-1121.
- Vertematti, J.C. (2001). Curso básico de geotêxteis, ABINT, São Paulo, SP, pp.7-49.
- Xiao, M. & Reddi, L.N.(2000). Comparison of Fine Particle Clogging in Soil and Geotextile Filters. Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics (GSP 103), pp.12–12.

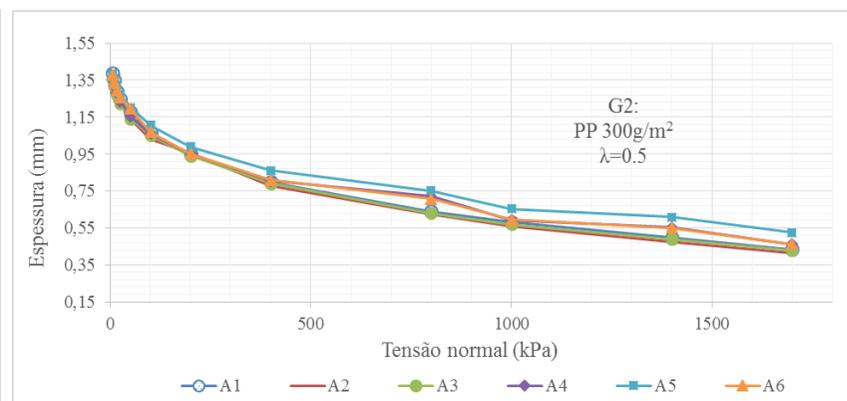
APÊNDICES

A- GRÁFICOS DE ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

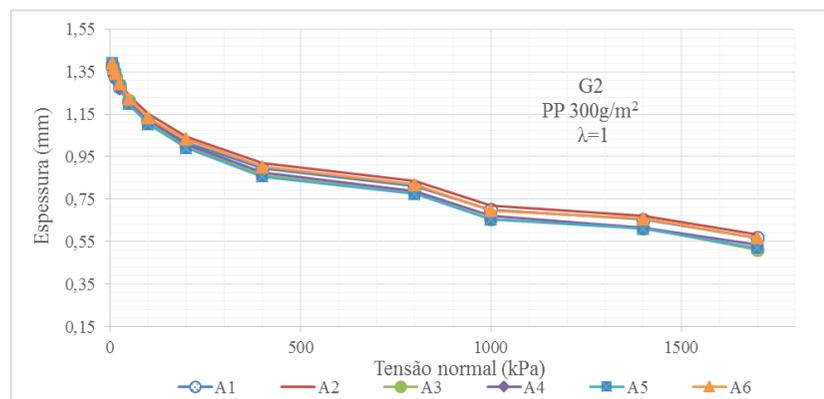
A Figura A. 1 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G2 para os teores de impregnação avaliados.



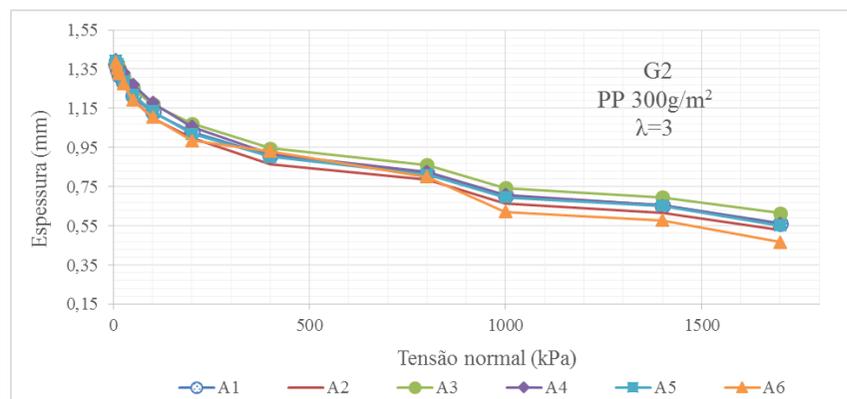
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A. 1 Variação da espessura com a tensão normal para G2- PP 300g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0.5$, (c) $\lambda=1$ e (d) $\lambda=3$.

A Figura A. 2 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G3 para os teores de impregnação avaliados.

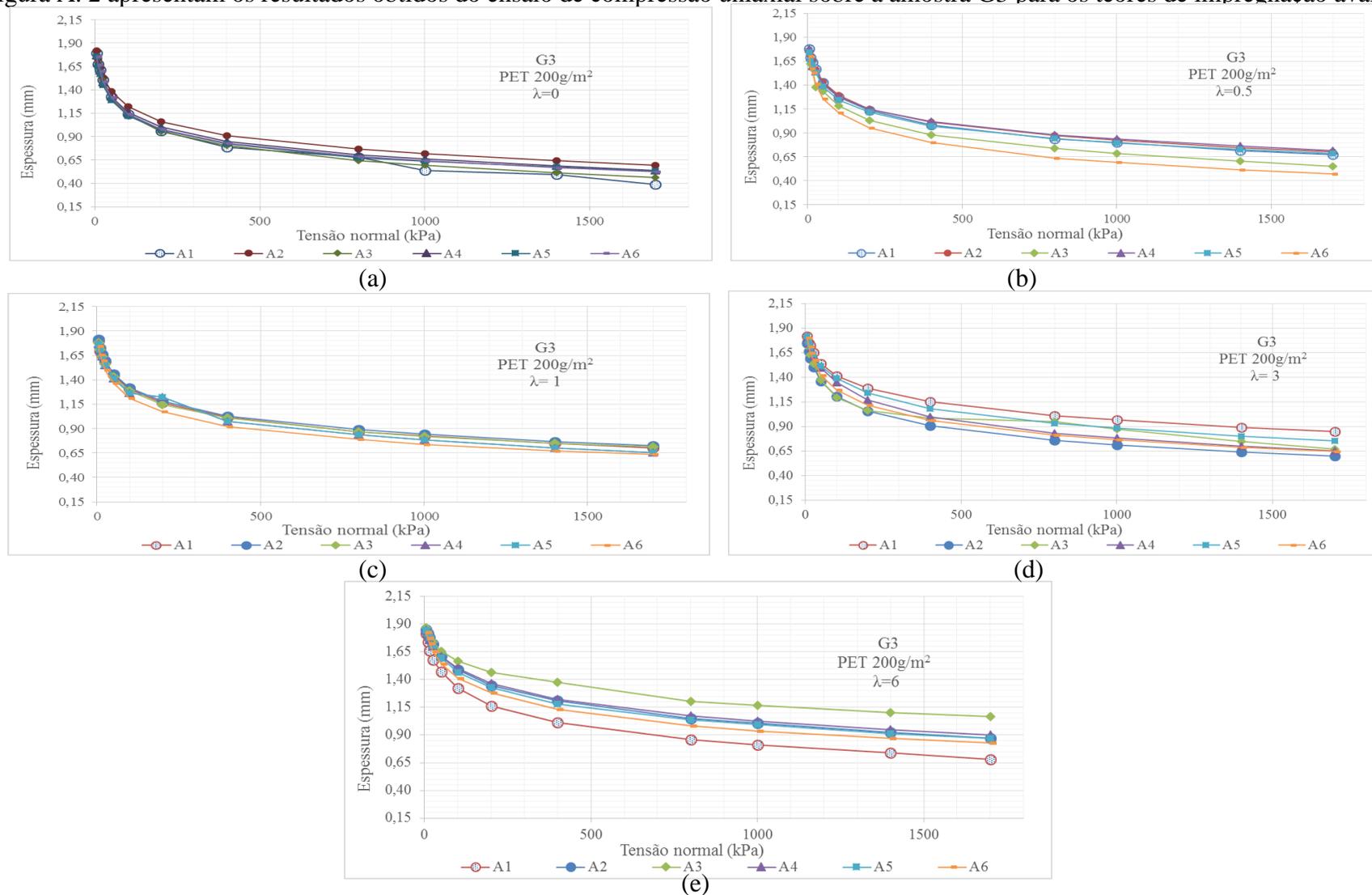
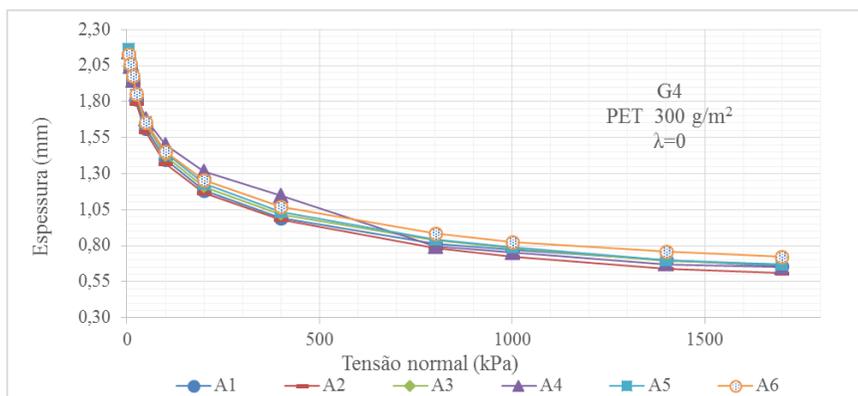
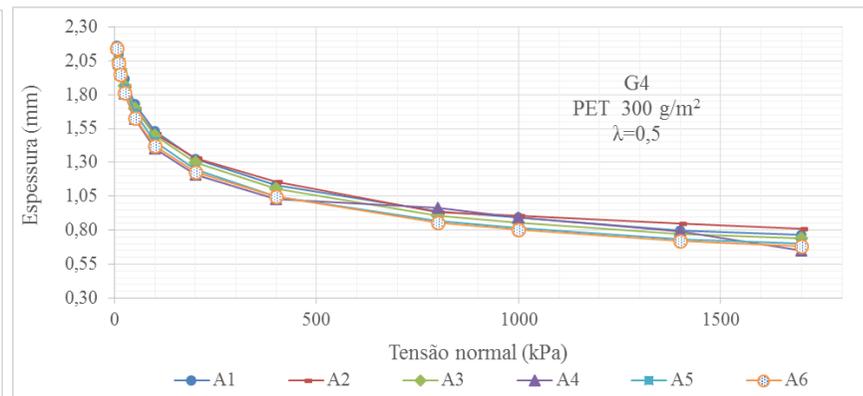


Figura A. 2 Variação da espessura com a tensão normal para G3– PET 200g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0.5$, (c) $\lambda=1$, (d) $\lambda=3$ e (e) $\lambda=6$.

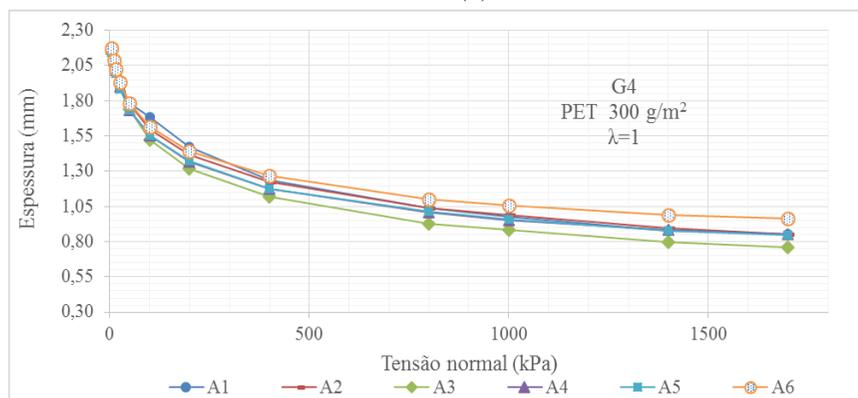
A Figura A. 3 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G4 para os teores de impregnação avaliados.



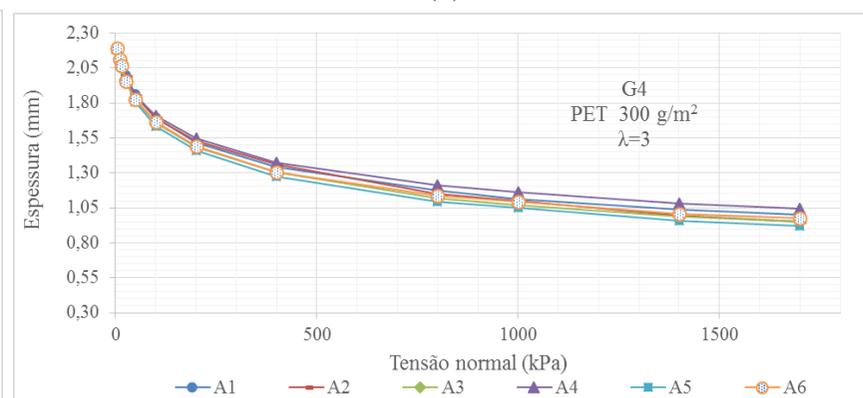
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A. 3 Variação da espessura com a tensão normal para G4– PET 300g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0.5$, (c) $\lambda=1$ e (d) $\lambda=3$.

A Figura A. 4 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G5 para os teores de impregnação avaliados.

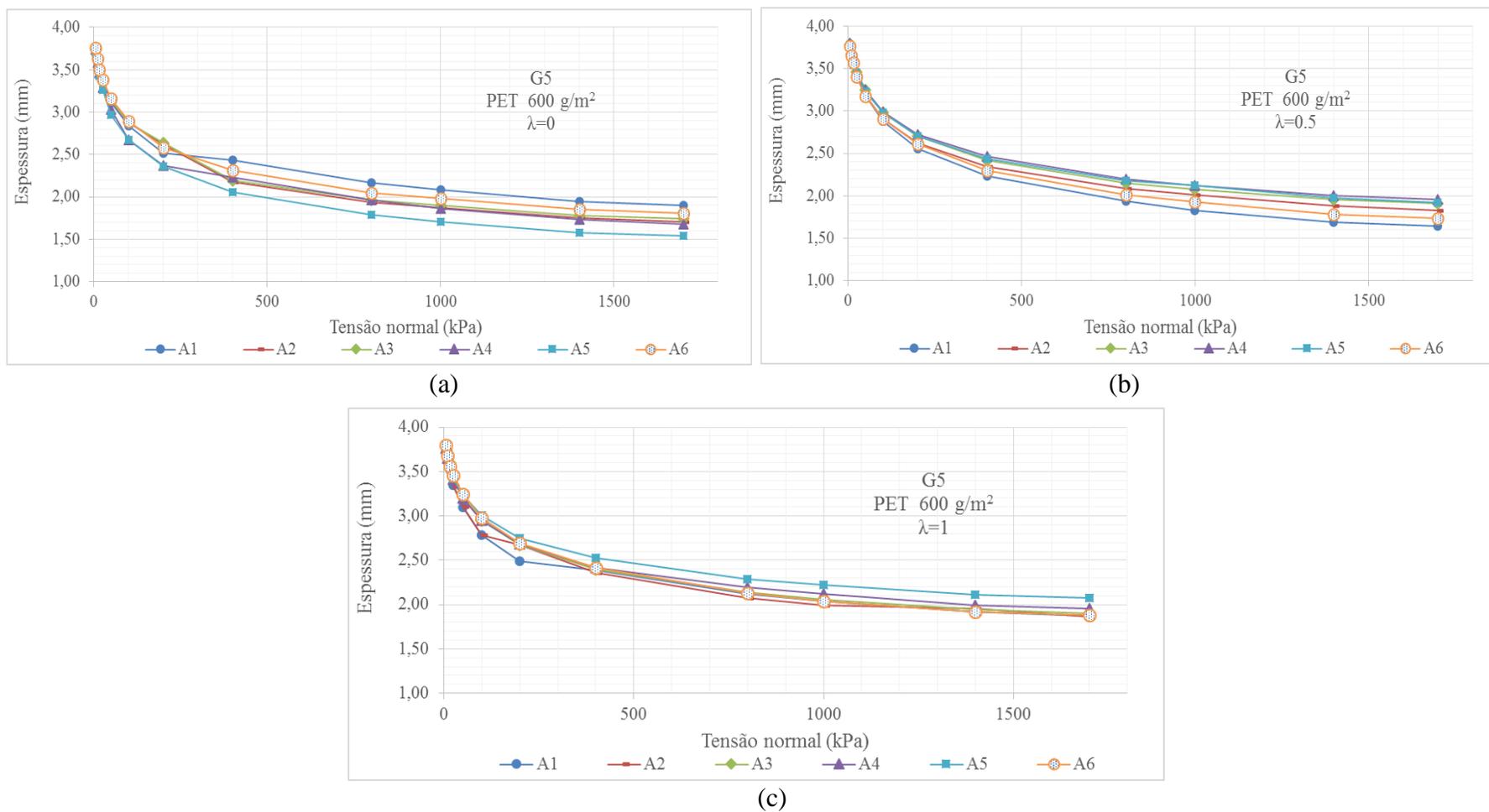
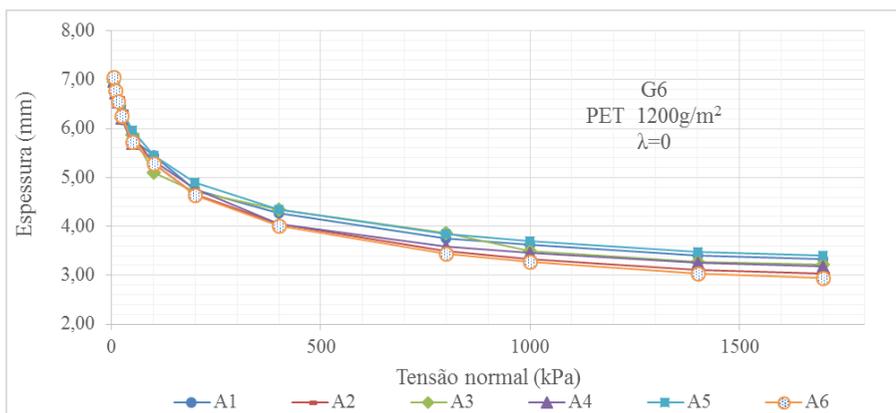
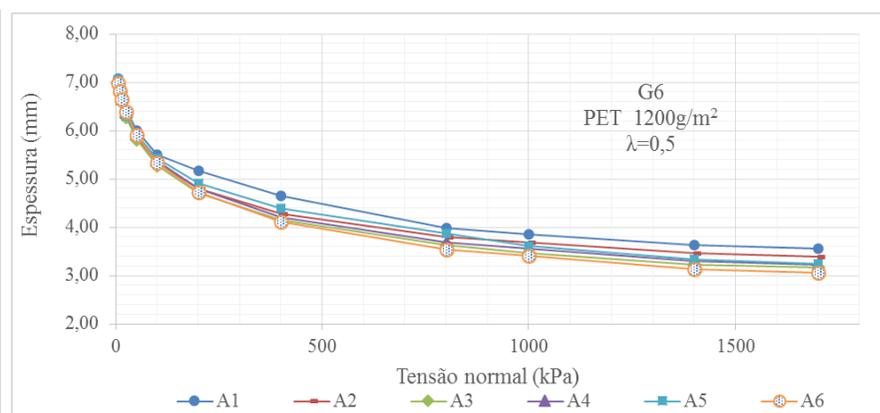


Figura A. 4 Variação da espessura com a tensão normal para G5– PET 600g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0.5$, (c) $\lambda=1$.

A Figura A. 5 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G6 para os teores de impregnação avaliados.



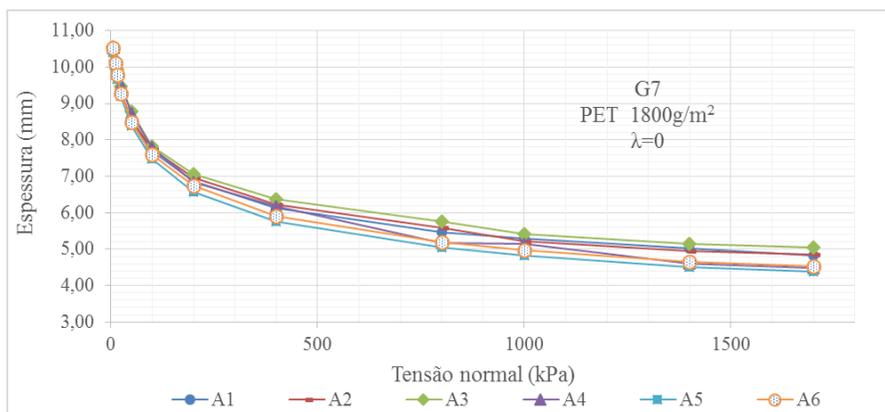
(a)



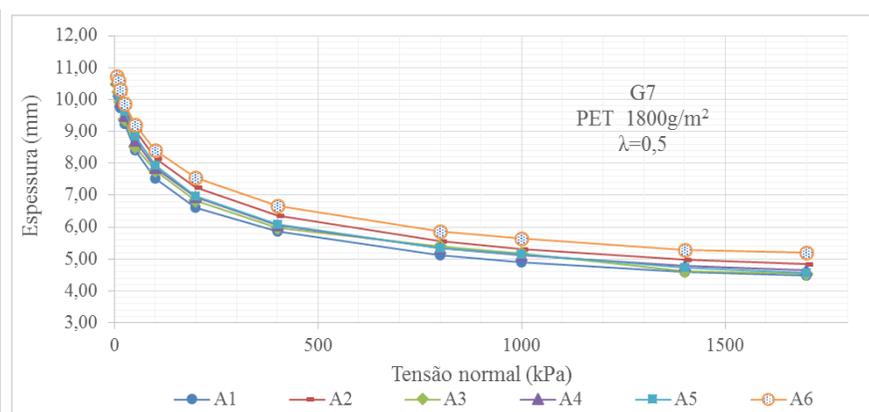
(b)

Figura A. 5 Variação da espessura com a tensão normal para G6– PET 1200g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0,5$.

A Figura A. 6 apresentam os resultados obtidos do ensaio de compressão uniaxial sobre a amostra G7 para os teores de impregnação avaliados.



(a)



(b)

Figura A. 6 Variação da espessura com a tensão normal para G7– PET 1800g/m², (a) $\lambda=0$, (b) $\lambda=0,5$.

B-AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DO CONFINAMENTO E IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL-RESULTADOS

Na Figura B.1 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G1 (PP 200g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

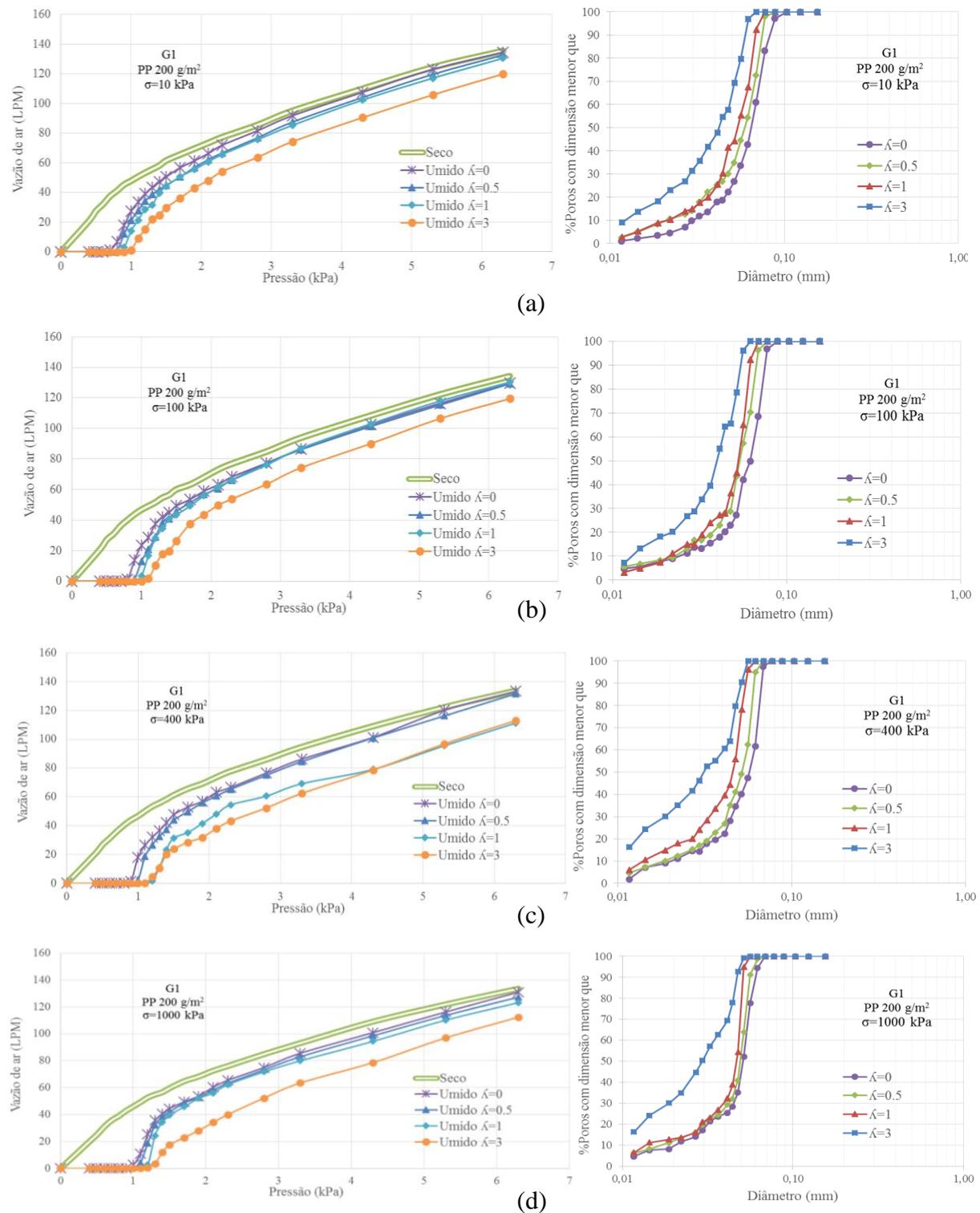


Figura B. 1. Resultados obtidos para amostra G1, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 2 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G2 (PP 300g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

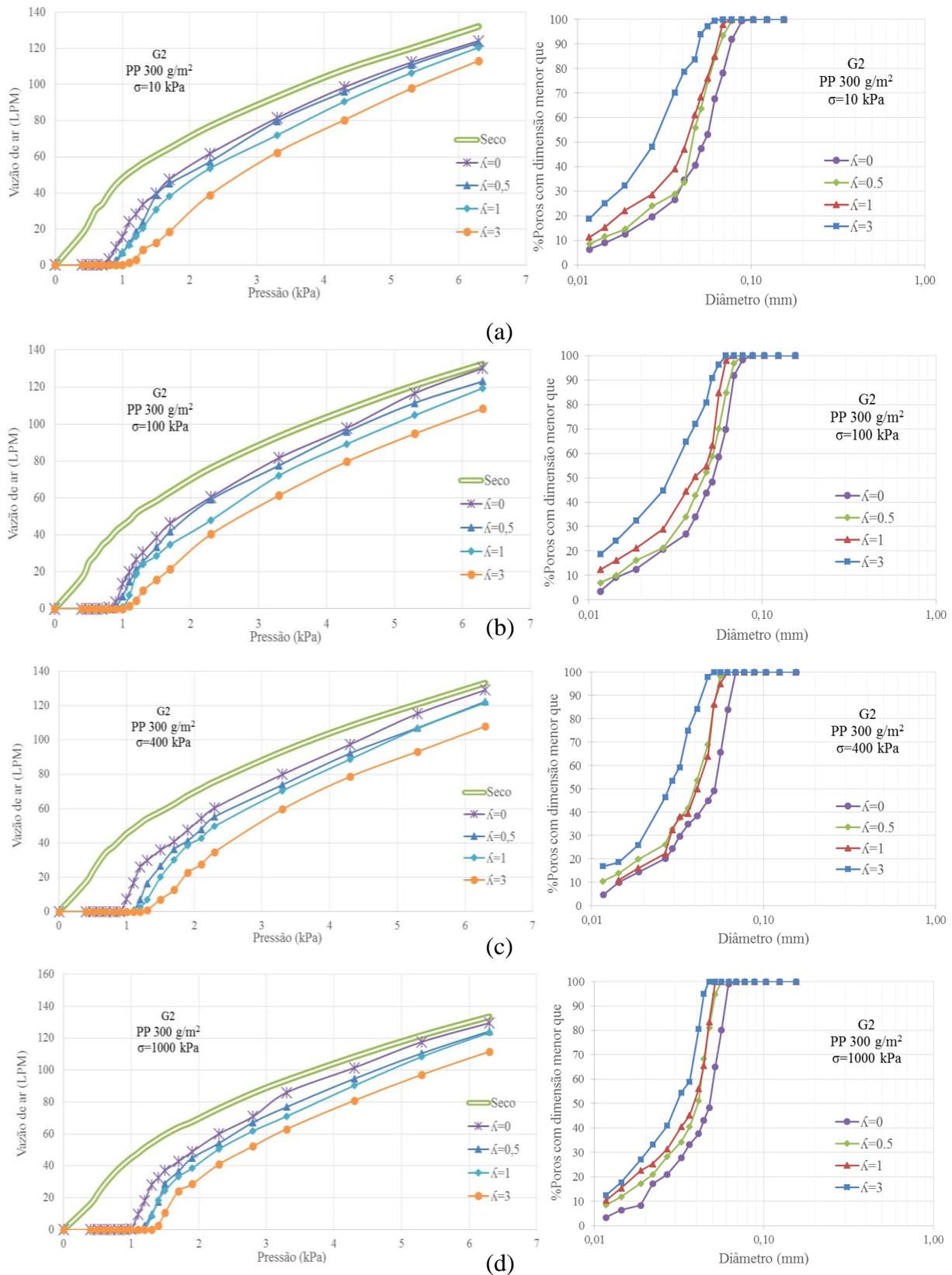


Figura B. 2. Resultados obtidos para amostra G2, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 3 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G3 (PET 200g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

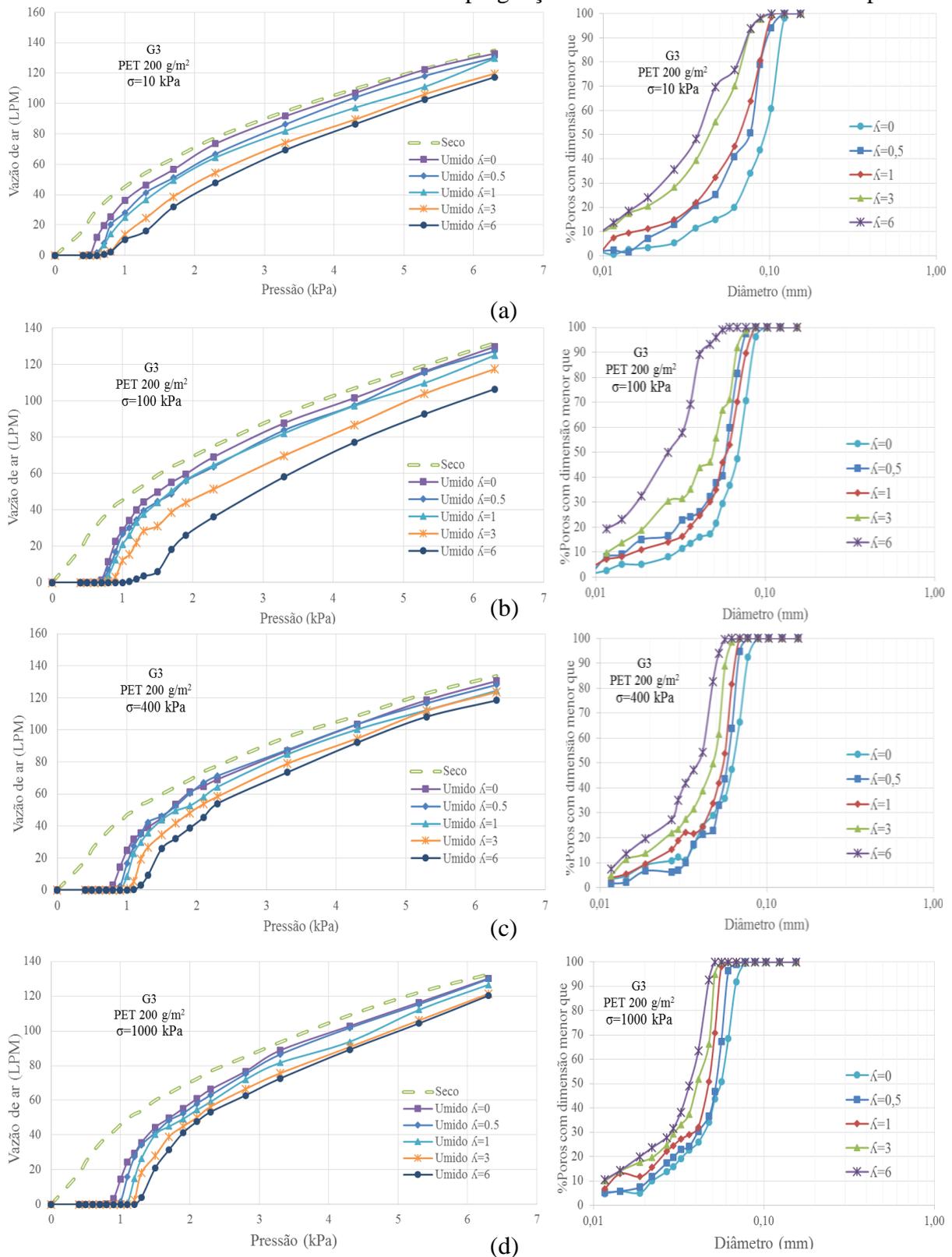


Figura B. 3. Resultados obtidos para amostra G3, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 4 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G4 (PET 300g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

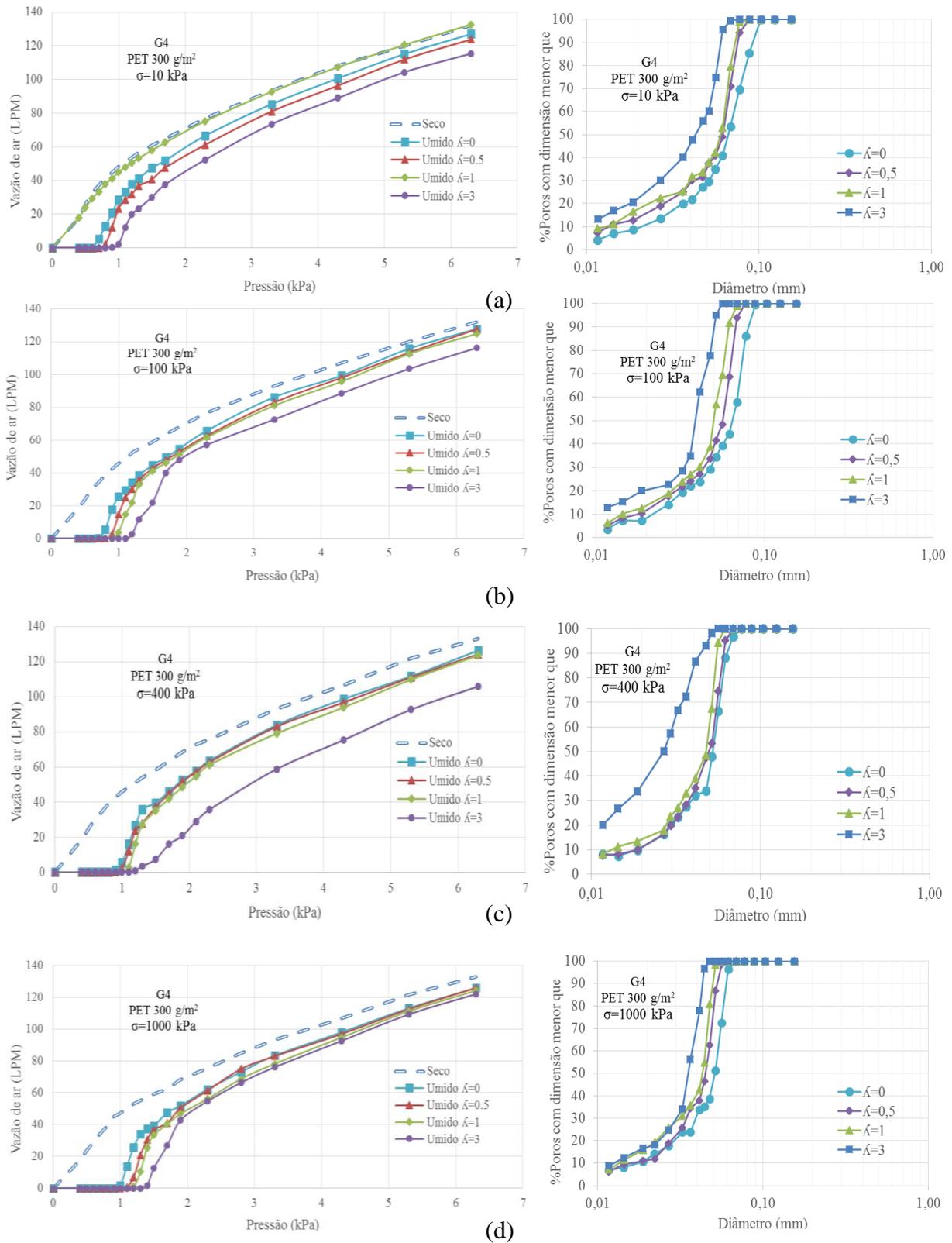


Figura B. 4. Resultados obtidos para amostra G4, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 5 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G5 (PET 600g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

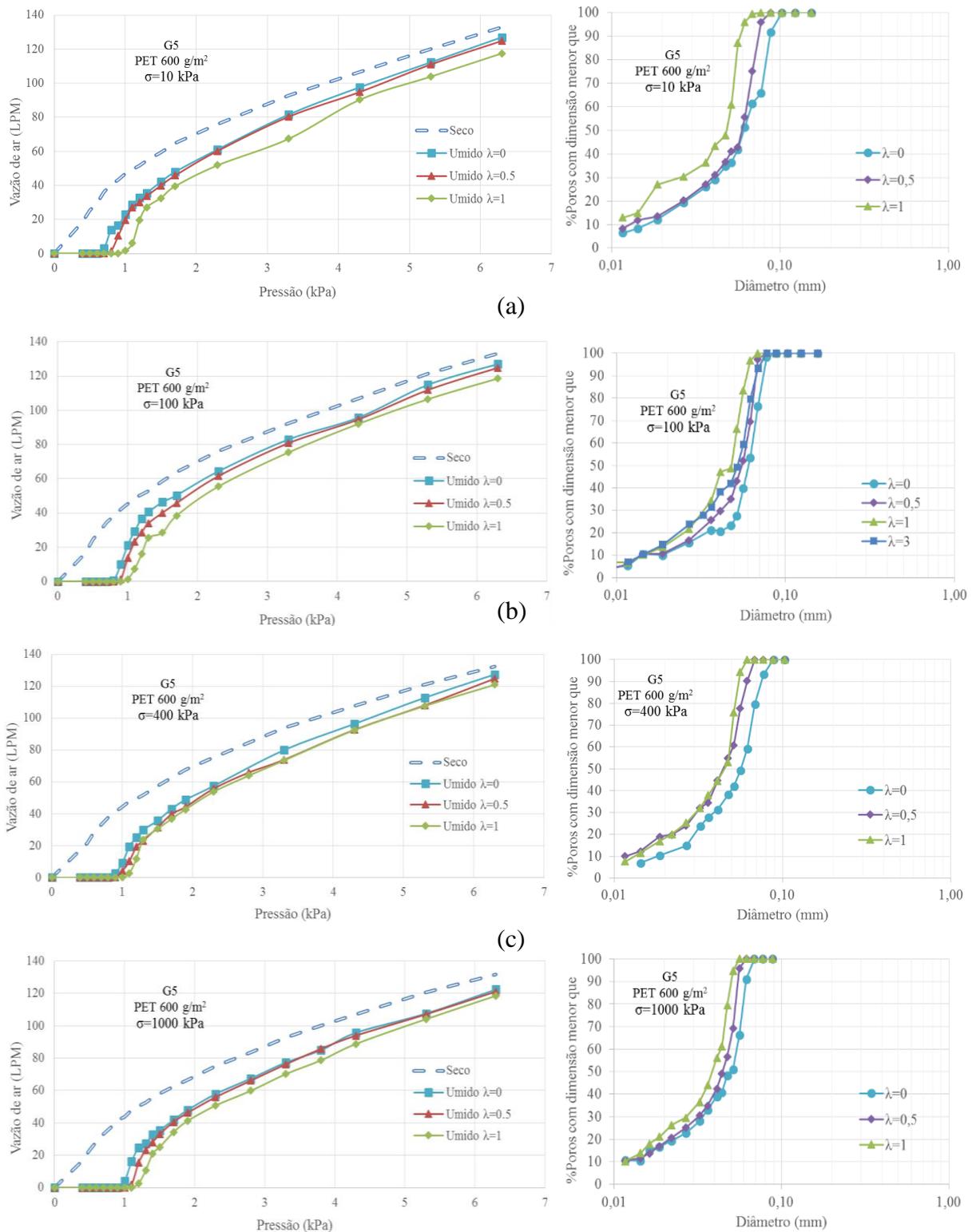


Figura B. 5. Resultados obtidos para amostra G5, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 6 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G6 (PET 1200g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

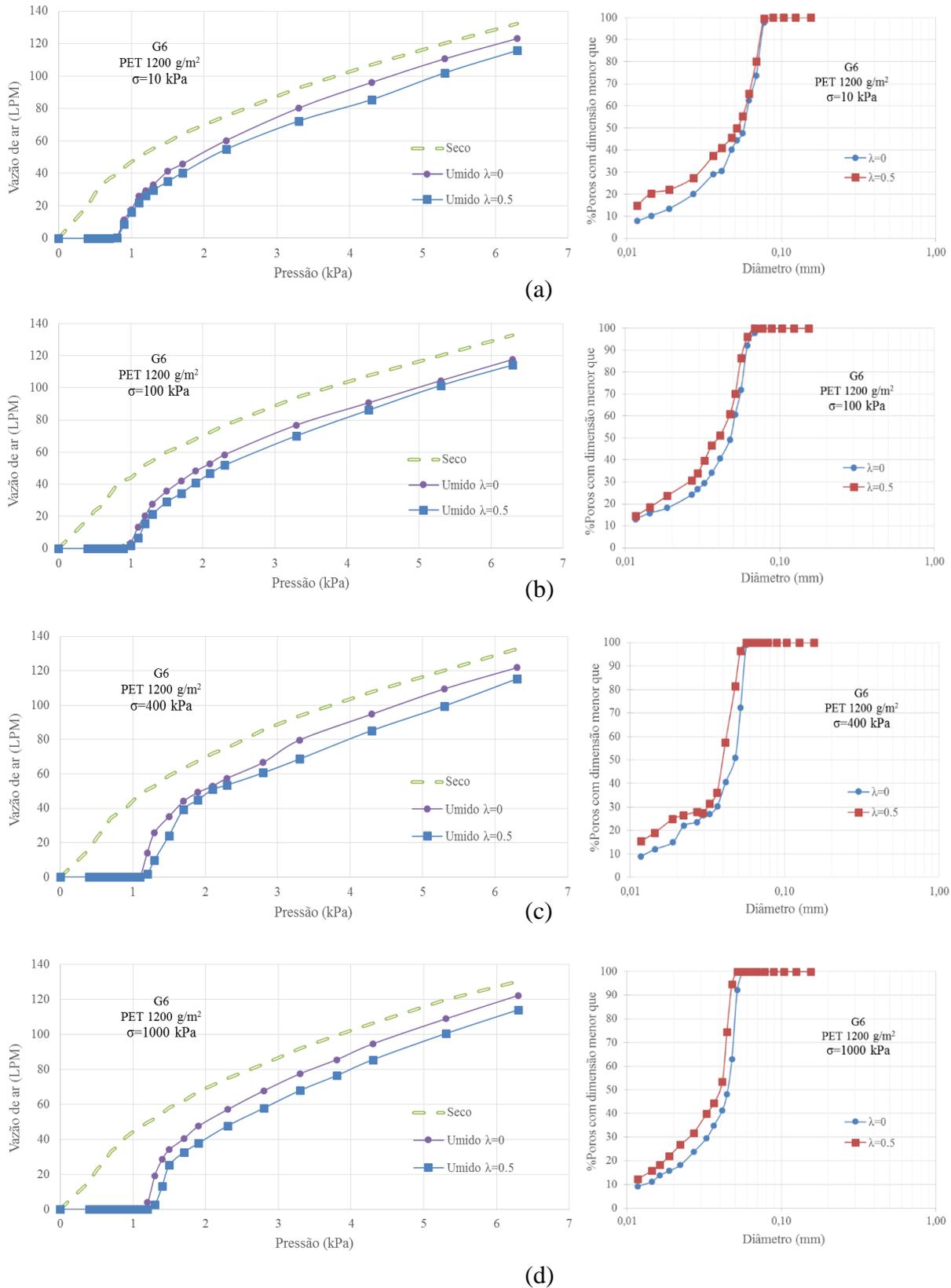


Figura B. 6. Resultados obtidos para amostra G6, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa.

Na Figura B. 7 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil G7 (PET 1800g/m²) levando em conta os efeitos da impregnação e da tensão de compressão.

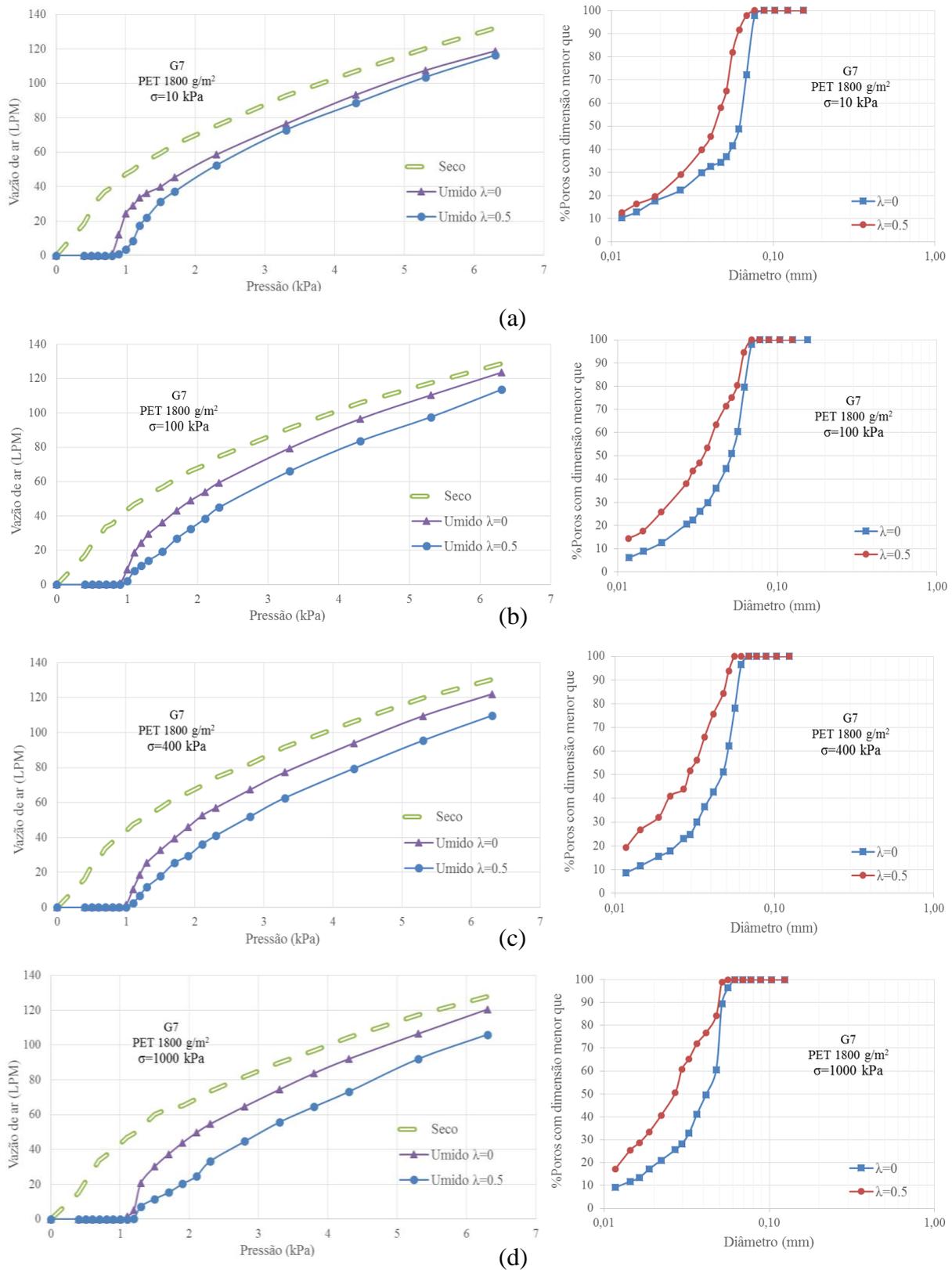


Figura B. 7. Resultados obtidos para amostra G7, (a) tensão de 10 kPa, (b) tensão de 100 kPa, (c) tensão de 400 kPa e (d) tensão de 1000 kPa