

Abertura de Filtração de Filtros Geotêxteis sob Confinamento

Trejos, H.L.

Universidade de Brasília-UnB, Brasília, DF, Brasil, heydytrejos@gmail.com

Palmeira, E.M.

Universidade de Brasília-UnB, Brasília, DF, Brasil, palmeira@unb.br

Messias da Silva, A.

Universidade de Brasília-UnB, Brasília, DF, Brasil, andressamessias8@gmail.com

RESUMO: Geotêxteis são comumente utilizados como filtros em obras geotécnicas e de proteção ambiental, tais como em sistemas drenantes de estruturas de contenção, encostas e aterros sanitários, por exemplo. Uma grandeza fundamental para a correta especificação de um filtro geotêxtil é a sua abertura de filtração (O_f), entendida como o diâmetro da maior partícula de solo capaz de atravessar a camada de geotêxtil, e que está associada às dimensões dos poros e restrições no geotêxtil. Ensaios padronizados comumente usados para a determinação desta grandeza não levam em conta a compressibilidade do filtro geotêxtil, que é particularmente mais relevante no caso de geotêxteis do tipo não tecido. Entretanto, em uma situação real, o filtro enterrado sofrerá compressão devido a tensões oriundas da massa de solo circunvizinha. Isto pode provocar consideráveis erros na estimativa da capacidade de retenção de filtros geotêxteis e conduzir a projetos muito conservadores ou sob condições irreais no que se refere à possibilidade de colmatação. No presente trabalho investigou-se a influência do nível de tensões de compressão na abertura de filtração de geotêxteis não tecidos. Para tal, foi desenvolvido um equipamento para ensaios de ponto de bolha (*Bubble Point Test*) capaz de realizar ensaios em geotêxteis comprimidos, o qual fornece maior acurácia na medição da abertura de filtração e utiliza o método de intrusão de poros. O equipamento permite a realização do ensaio com rapidez, o que facilita uma comparação abrangente entre resultados obtidos sob diferentes condições. Diferentes tipos de geotêxteis não tecidos foram ensaiados sob variados níveis de tensões normais. Os resultados obtidos mostraram a marcante influência do nível de tensões no valor de abertura de filtração de geotêxteis não tecidos. A repercussão de tal influência sobre o dimensionamento de filtros geotêxteis é discutida à luz dos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxteis, Bubble Point Test, Abertura de Filtração, Confinamento.

1 INTRODUÇÃO

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 utilizar condições mais próximas 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.

Por causa do processo de fabricação, os geotêxteis não tecidos não têm formas uniformes 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.

Atualmente, rotineiramente são feitos ensaios para a determinação da abertura de filtração por meio de técnicas que não levam em conta o confinamento do geotêxtil. Assim, é importante a realização de ensaios que reproduzam condições mais realistas que serão impostas ao geotêxtil e que se possam observar as variações de comportamento filtrante apresentadas sob diferentes estados de tensão.

Este trabalho visou investigar a variação de propriedades físicas e hidráulicas de geotêxteis não tecidos devido ao confinamento.

2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

2.1 Materiais

Com o intuito de comparar o comportamento das propriedades físicas e hidráulicas dos geotêxteis segundo o material que o compõe e a sua gramatura, foram ensaiados geotêxteis não tecidos, agulhados de filamentos contínuos, de poliéster (PET) e polipropileno (PP) de 200g/m² e 300 g/m².

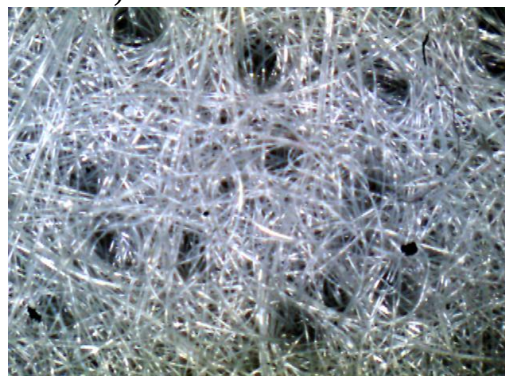
Tabela 1. Principais propriedades dos geotêxteis ensaiados.

Geotêxtil	Material	M _A (g/m ²)	t _{GT} (mm)	O ₉₅ (mm)
G1	PP	200	1,2	0,130
G2	PP	300	1,4	0,110
G3	PET	200	1,9	0,100
G4	PET	300	2,3	0,090

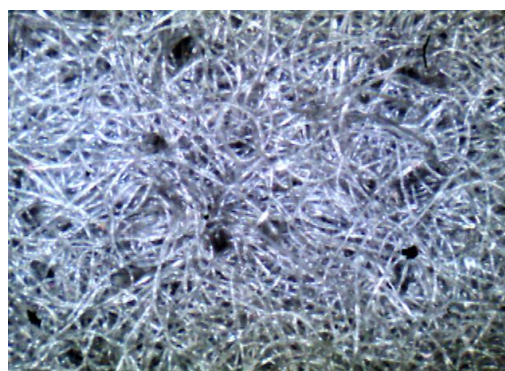
Notas: M_A = massa por unidade de área (gramatura), t_{GT} = espessura nominal (ABNT NBR ISO 9863), O₉₅ = abertura de filtração. Valores de M_A e O₉₅ são dados fornecidos pelos fabricantes.

Foi evidente a diferença dos tamanhos dos furos do processo de agulhagem entre os geotêxteis de fabricantes distintos, além da diferença entre as espessuras para geotêxteis da mesma gramatura, diâmetro e arranjo das fibras. Tais fatores influenciam diretamente a abertura de filtração do geotêxtil. A Figura 1 apresenta 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 (Palmeira & Fannin 1998).



(a)



(b)

Figura 1. Furos do processo de agulhagem nos geotêxteis de 200g/m², ampliados em 50 vezes: (a) Poliéster, (b) Polipropileno.

2.2 Equipamentos

2.2.1 Equipamento de Aplicação de Compressão Uniaxial

Para conhecer a variação da espessura dos geotêxteis 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 2. O equipamento permitiu a aplicação de tensões de até 1700 kPa sobre os espécimes

de geotêxteis

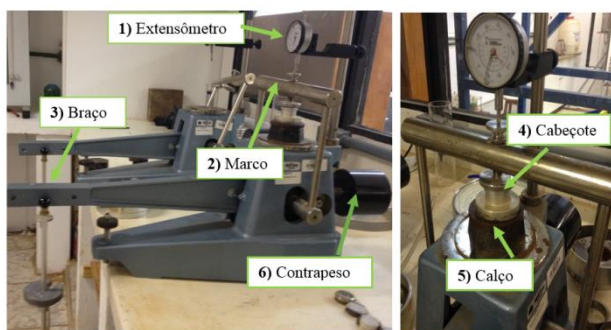


Figura 2. Equipamento de compressão uniaxial.

2.2.2 Equipamento de Ponto de Bolha

O equipamento de ponto de bolha (*Bubble Point Test, BBP*) usado para a obtenção da curva da distribuição dos tamanhos dos poros dos geotêxteis avaliados é apresentado na Figura 3. Ele foi desenvolvido na Universidade de Brasília por Lima (2014) baseado tanto na norma D6767 (ASTM, 2014), quanto no trabalho de Eun & Tinjum (2011) e modificado por Messias da Silva (2014) com o objetivo de obter resultados mais acurados e precisos.

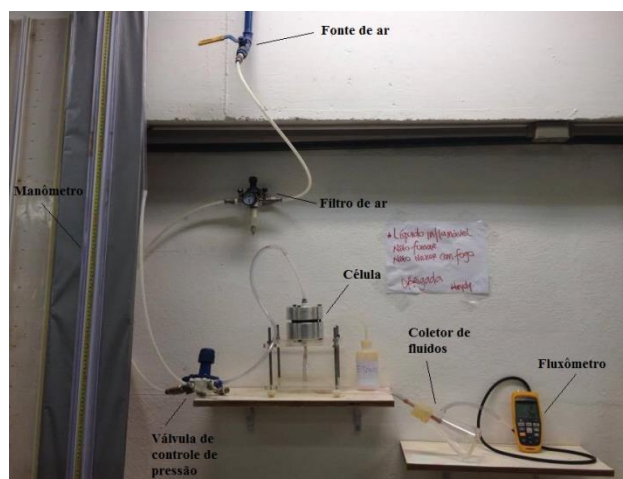


Figura 3. Equipamento de ponto de bolha.

A célula de ensaio é composta por duas partes que são mantidas solidárias por meio de parafusos; a parte inferior é formada por uma placa perfurada sobre a qual é instalada a amostra de geotêxtil e 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. A parte superior é vedada também por meio de dois anéis de borracha. O detalhe da célula é apresentado na Figura 4.

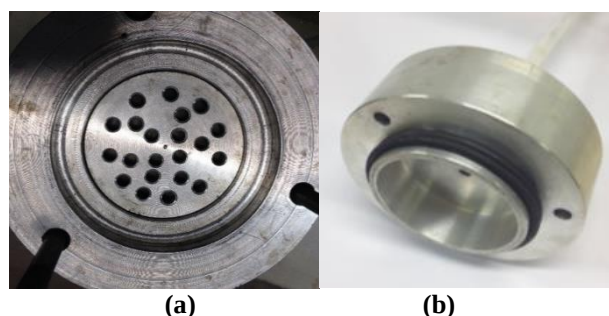


Figura 4. Detalhe da célula do ensaio do ponto de bolha (a) Parte inferior: placa perfurada, (b) parte superior.

É importante usar um fluido de baixa viscosidade na execução de ensaios de ponto de bolha, para se obter resultados mais acurados. É importante garantir que o ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil seja próximo de zero, já que um erro nesse parâmetro pode levar a valores de aberturas de filtração distantes dos reais. Por isso, 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 (até 60 °C), resultando na seguinte equação:

$$\sigma_1 = 0,0244 \cdot e^{-0,0046T} \quad (1)$$

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

O equipamento de ponto de bolha permitiu avaliar a abertura de filtração dos geotêxteis não tecidos comprimidos. O confinamento foi simulado por meio de duas telas metálicas costuradas, rígidas de aço inoxidável com

abertura muito maior do que os tamanhos de poros esperados nos geotêxteis (Figura 5), levando em consideração os resultados obtidos dos ensaios de compressão uniaxial. Nesse caso foram avaliados geotêxteis submetidos a tensões de 10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa.



Figura 5. Geotêxtil comprimido para controle da espessura das amostras.

Com a finalidade de avaliar a acurácia do ensaio, foi executado um ensaio em branco para a calibração do equipamento. Para isso, utilizou-se a peneira #170 como amostra de referência. A Figura 6 apresenta a distribuição dos tamanhos das aberturas da tela.

Além do anterior, foram feitos cinco ensaios no geotêxtil PP 200 g/m², para conferir a repetibilidade do ensaio de ponto de bolha. Os resultados são mostrados na Figura 7.

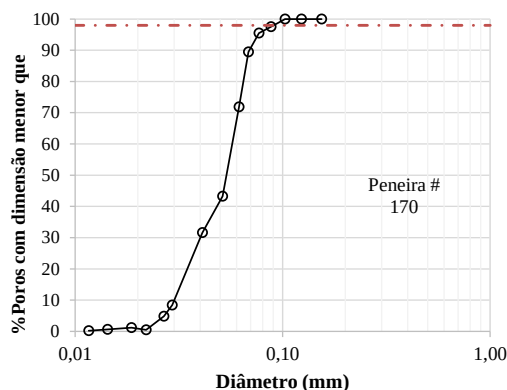


Figura 6. Curva de distribuição dos tamanhos das aberturas da peneira #170.

Pela Figura 6, pode-se considerar $O_{98} = 0,0908$ mm para a peneira #170, que de acordo com a norma E11 (ASTM, 2015) se deve encontrar entre $0,090\text{mm} \pm 0,032\text{mm}$. Esse resultado mostra a satisfatória acurácia dos resultados obtidos pelo equipamento.

A Figura 7 mostra que os ensaios de ponto de bolha apresentam excelente repetibilidade.

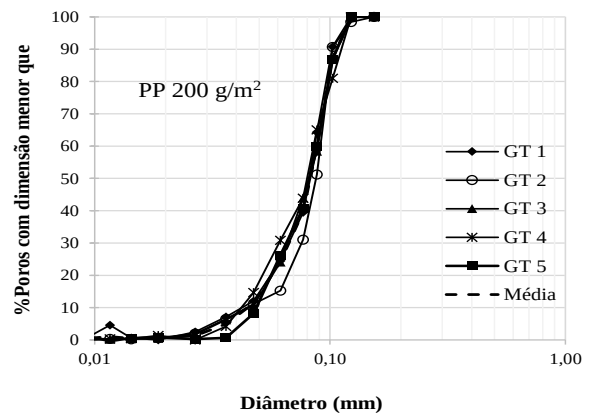


Figura 7. Repetibilidade do ensaio: curva de distribuição das aberturas de GT PP 200 g/m².

3 RESULTADOS

3.1 Variação de Propriedades Físicas com a Tensão Normal

Foram executados 6 ensaios de aplicação de compressão uniaxial para cada espécime de geotêxtil estudado e posteriormente foram calculadas as médias dos resultados obtidos. As variações das médias das espessuras dos geotêxteis com a tensão normal são apresentadas nas Figuras 8 e 9.

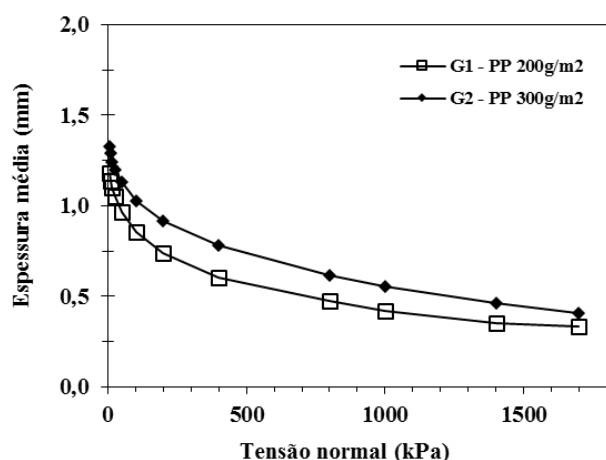


Figura 8. Variação da espessura com a tensão normal para os geotêxteis de polipropileno (G1 e G2).

Na Tabela 2 são apresentados os valores, em porcentagem, da redução da espessura ao final do teste de compressibilidade. Pode-se observar

que mesmo confeccionados com polímeros diferentes, os dois geotêxteis de 200g/m² e 300g/m² de polipropileno apresentaram compressibilidades similares às dos correspondentes em poliéster ao final do ensaio (1700 kPa). Entretanto, observaram-se variações durante o ensaio (Trejos, 2016), como se pode verificar nas Figuras 8 e 9.

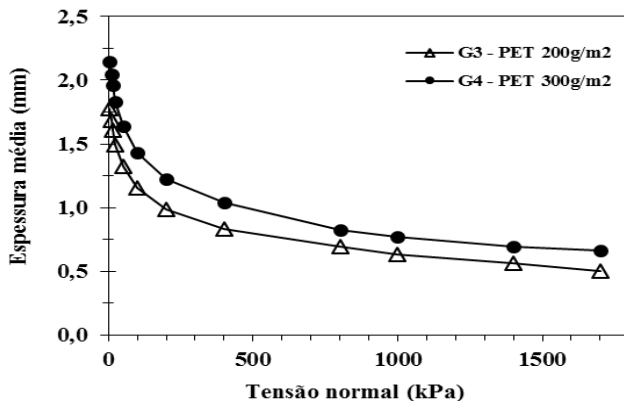


Figura 9. Variação da espessura com a tensão normal para os geotêxteis de poliéster (G3 e G4).

Tabela 2. Porcentagem de redução da espessura à máxima tensão aplicada (1700 kPa).

Geotêxtil		% Redução espessura
G1	PP 200	72,0
G2	PP 300	69,2
G3	PET 200	71,5
G4	PET 300	69,1

3.2 Ensaios de Ponto de Bolha

3.2.1 Avaliação da Influência do Confinamento do Geotêxtil

Para a avaliação da influência do confinamento, foram utilizados espécimes de geotêxteis comprimidos por meio de telas metálicas, como explicado anteriormente. Com os resultados de compressão uniaxial foi possível associar a espessura do espécime à tensão vertical que o levaria a tal espessura. A redução de espessura foi feita para simular 4 condições de tensão (10 kPa, 100 kPa, 400 kPa e 1000 kPa).

Nas Figuras 10 a 13 são apresentados os resultados da distribuição dos tamanhos das aberturas dos geotêxteis analisados em função

do nível de tensão aplicado. Como era de se esperar, quanto maior a compressão sofrida pelo geotêxtil, menores as dimensões dos seus poros.

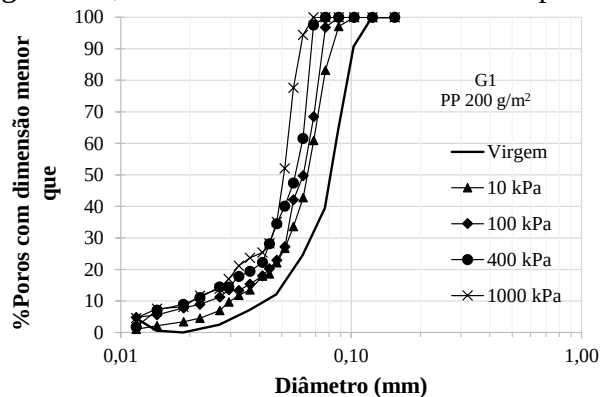


Figura 10. Distribuição de poros para G1 confinado.

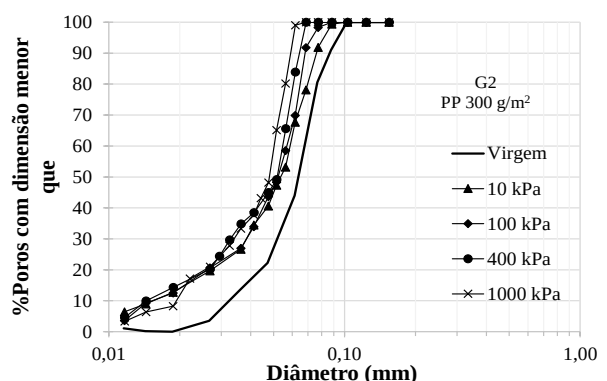


Figura 11. Distribuição de poros para G2 confinado.

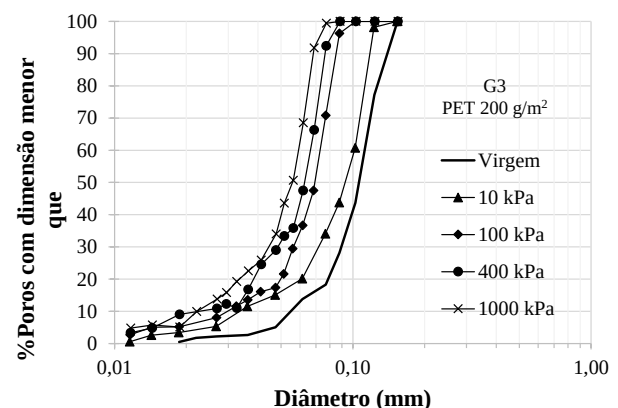


Figura 12. Distribuição de poros para G3 confinado.

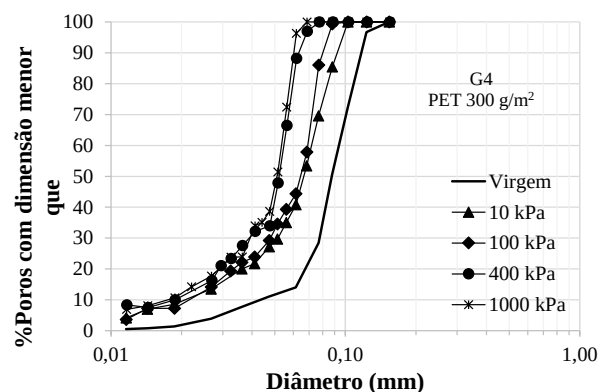


Figura 13. Distribuição de poros para G4 confinado.

A Tabela 3 apresenta os valores de O_{98} (diâmetro equivalente da maior restrição no geotêxtil) obtidos para os espécimes comprimidos. Considerando-se o valor de O_{98} como a abertura de filtração de geotêxteis (outros autores ou normas utilizam O_{95} ou O_{90} , por exemplo), a partir dos resultados das Figuras 10 a 13 foi possível obter a variação da abertura de filtração com o nível de tensão. Os resultados são apresentados na Figura 13, onde pode-se observar uma significativa redução da abertura de filtração com o aumento da tensão vertical sobre o geotêxtil. Tal aspecto ainda não é considerado nos critérios de filtros para geotêxteis disponíveis na literatura.

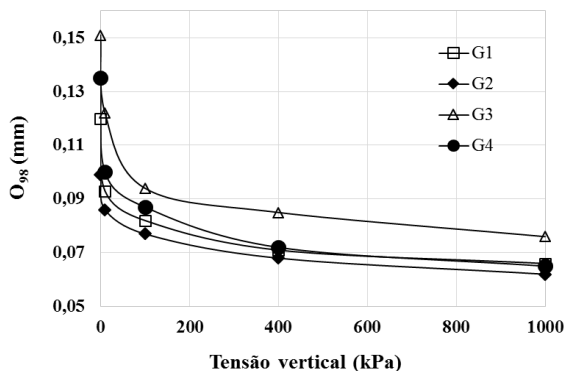


Figura 14. Variação da abertura de filtração (O_{98}) com a tensão vertical.

Tabela 3. Valores de O_{98} obtidos para os geotêxteis comprimidos.

Tensão (kPa)	O_{98} (mm)			
	G1	G2	G3	G4
0	0,120	0,099	0,151	0,135
10	0,093	0,086	0,122	0,100
100	0,082	0,077	0,094	0,087
400	0,071	0,068	0,085	0,072
1000	0,066	0,062	0,076	0,065

4 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS COM BASE EM RESULTADOS DO ENSAIO DE BBP

4.1 Coeficiente de Permeabilidade Normal ao Plano

Na literatura existe uma variedade de expressões para se estimar o coeficiente de permeabilidade de geotêxteis em função de suas propriedades físicas ou hidráulicas. Dentre elas,

encontra-se a expressão proposta por Fischer *et al.*, (1995) que leva em consideração os resultados obtidos dos ensaios de ponto de bolha, apresentada a seguir.

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

Onde: k é o coeficiente de permeabilidade normal ao plano; n_{GT} é a porosidade do geotêxtil; O_j é o diâmetro do poro e p_j é a percentagem de poros com diâmetro O_j no geotêxtil.

Os valores de O_j e p_j podem ser obtidos dos gráficos de distribuição dos tamanhos de poros dos ensaios de ponto de bolha (Figuras 10 a 13).

A Figura 15 apresentam os resultados de coeficiente de permeabilidade estimados por meio da metodologia proposta por Fischer *et al.* (1995) para os diferentes geotêxteis ensaiados. São apresentados também os resultados de ensaios de laboratório realizados por Gardoni (2000) para geotêxteis de poliéster de 200 e 300 g/m². Observa-se uma comparação satisfatória entre valores previstos pela equação 2 e os resultados obtidos por Gardoni (2000).

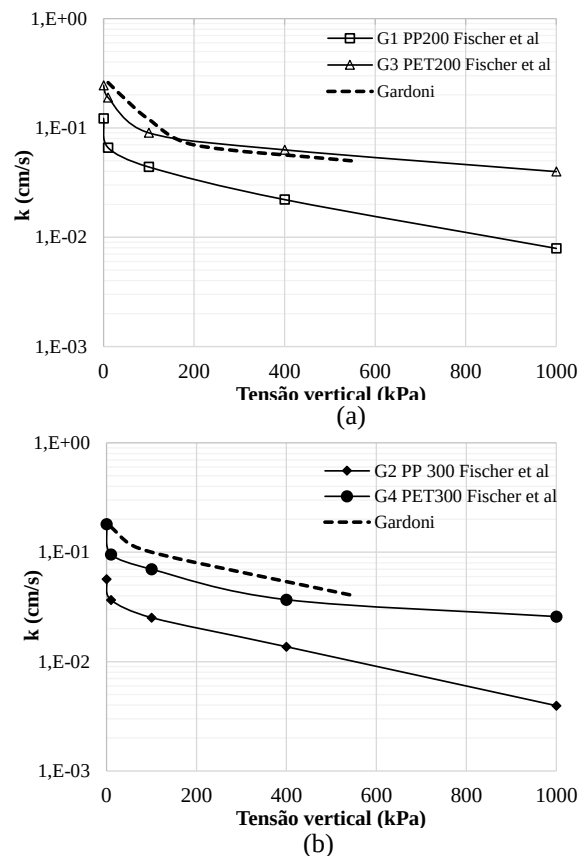


Figura 15. Variação do coeficiente de permeabilidade (a) G1 e G3 (b) G2 e G4.

4.2 Abertura de Filtração

A abertura de filtração sob confinamento também foi estimada com a finalidade de comparar previsões com os resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha realizados. As estimativas foram feitas utilizando-se a expressão proposta por Giroud (1996):

$$\frac{O_f}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1-n_{GT}}} - 1 + \frac{\xi n_{GT}}{(1-n_{GT})t_{GT}/d_f} \quad (3)$$

Onde:

O_f = abertura de filtração do geotêxtil;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

ξ = parâmetro adimensional que pode ser obtido por calibração com dados de ensaio. Giroud (1996) sugeriu um valor de 10 para geotêxteis não tecidos.

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 $\xi = 12,5$ e no caso dos geotêxteis de poliéster (G3 e G4) 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. A Figura 16 apresenta a comparação entre aberturas de filtração normalizadas (O_f/d_f) calculadas e obtidas por meio dos ensaios de ponto de bolha.

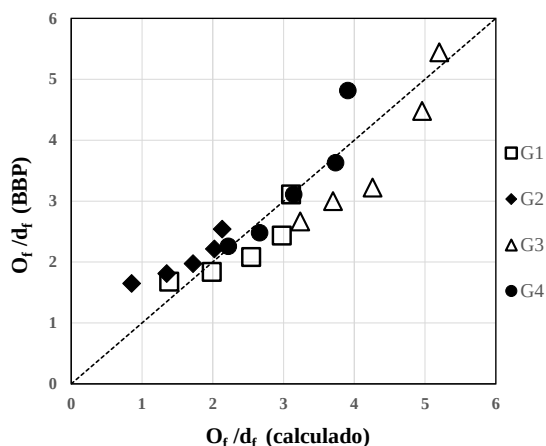


Figura 16. Comparação entre aberturas de filtração (O_{98}) normalizadas obtidas no *Bubble point test* e previstas por Giroud (1996).

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 (Trejos, 2016). Isto mostra que geotêxteis que visualmente possam parecer similares, podem, de fato, apresentar propriedades hidráulicas bastante distintas.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou avaliar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento, visando contribuir para o entendimento da influência no nível de tensões nas propriedades hidráulicas destes materiais e 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.

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).

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 de 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.

Os geotêxteis de 200 g/m² (G1 e G3) apresentaram uma redução na abertura de filtração de 50%, enquanto que os geotêxteis de 300 g/m² (G2 e G4) mostraram comportamentos diferentes, onde foram obtidos reduções de 37% para G2 e de 50% para G4.

Os resultados obtidos mostraram que quando submetidos às condições analisadas de tensão (até 1000 kPa), os geotêxteis podem aumentar consideravelmente a sua capacidade de retenção e a sua permeabilidade pode continuar significativamente superior às dos solos comumente em contato com geotêxteis em sistemas filtro-drenantes.

As previsões realizadas pela equação para o coeficiente de permeabilidade de geotêxteis proposta por Fischer *et al.* (1995) apresentaram boa concordância com os valores obtidos em ensaios por Gardoni (2000) para os geotêxteis de poliéster de 200 g/m² e 300 g/m².

De forma geral, previsões pela equação proposta por Giroud (1996) para a estimativa da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos compararam satisfatoriamente com os resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos às instituições que contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas reportadas no presente trabalho: UnB, CNPq, FAP-DF e CAPES.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2013). Geotêxteis - *Determinação da espessura - Método de ensaio*. NBR ISO 9863-1. ABNT, São Paulo, 2p.
- 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.
- ASTM (2015). *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*, ASTM E 11. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 9p.
- Eun, J.W. & Tinjum, J.M. (2011). *Variation in Air Entry Suction of Nonwoven Geotextiles with Pore Size Distribution*. Unsaturated Soils: Theory and Practice - Jotisankasa, Sawangsuriya, Soralump and Mairaing (Editors), Kasetsart University, Thailand, p.p.553-558.
- Fischer, G.R., Holtz, R.D. and Christopher, B.R.(1995), *Characteristics of Geotextile Pore Structure*, Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites, Bhatia, S.K. and Suits, L.D., Editors, ASTM Special Technical Publication 1281, proceedings of a symposium held in Denver, Colorado, USA, June 1995, in press.
- Gardoni, M. G. A. (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.. & Palmeira, E.M (2002). Microstructure and Pore Characteristics of Synthetic Filters Under Confinement. *Geotechnique*, Vol. 52, No. 6, p. 405-418.
- Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. *Geofilters'96*. J. Lafleur & Rollin A.L. (eds.). Montreal. Quebec. Canada, pp. 565-678.
- 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.
- Messias 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.
- Palmeira, E.M. & Fannin, R.J. (1998). A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. *Geosynthetics International*, Vol. 5, No. 3, p. 347-357.
- 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. & Gardoni, M.G., (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranas* 20(2), pp. 97-115.
- Perez Ones, O; Diaz Rodriguez, J; Zumalacarregui, L & Goza Leon, O. *Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua* (II). *Rev.fac.ing.univ. Antioquia* [online]. 2010, n.52, pp. 62-74. ISSN 0120-6230.
- 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.