

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

**ABERTURAS DE FILTRAÇÃO DE GEOTÊXTEIS
CONFINADOS SOBRE MATERIAL GRANULAR COM USO
DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA**

ANA BEATRIZ ARAÚJO NOBRE DIAS

Orientador: **ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM – 331/19

BRASÍLIA – DF, JULHO DE 2019.

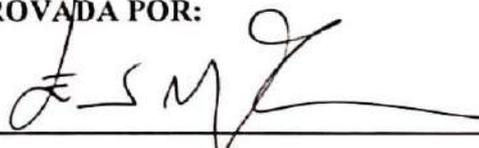
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

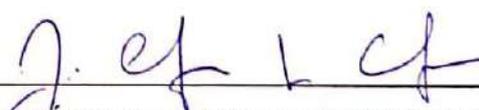
ABERTURAS DE FILTRAÇÃO DE GEOTÊXTEIS CONFINADOS SOBRE
MATERIAL GRANULAR COM USO DO ENSAIO DE PONTO DE BOLHA

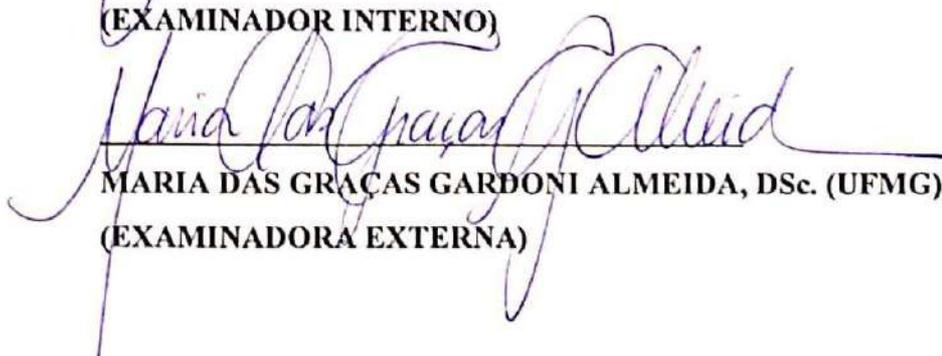
ANA BEATRIZ ARAÚJO NOBRE DIAS

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)


JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)


MARIA DAS GRACAS GARDONI ALMEIDA, DSc. (UFMG)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 22 DE JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

DIAS, ANA BEATRIZ ARAÚJO NOBRE;

Aberturas de filtração de geotêxteis confinados sobre material granular com uso do ensaio de ponto de bolha. [Distrito Federal] 2019.

xx, - 75p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2019)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geotêxtil

2. *Bubble Point Test*

3. Abertura de filtração

4. Confinamento

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DIAS, A.B.A.N. (2019). **Abertura de filtração de geotêxteis confinados sobre material granular com uso do ensaio de ponto de bolha.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-331/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75p.

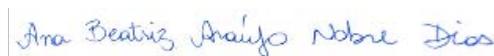
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ANA BEATRIZ ARAÚJO NOBRE DIAS.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Aberturas de filtração de geotêxteis confinados sobre material granular com uso do ensaio de ponto de bolha.**

GRAU / ANO: Mestre / 2019.

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.



Ana Beatriz Araújo Nobre Dias

SQN 411, Bloco E, Apt 103, Asa Norte

70.866-050 – Brasília/DF – Brasil

“The extremists are afraid of books and pens, the power of education frightens them. They are afraid of women.”

Malala Yousafzai

AGRADECIMENTOS

Muita ajuda e suporte foram necessários para que esta dissertação ganhasse vida e todo esse apoio se transforma em gratidão nesta fase. Aqui espero poder expressar um pouco desse sentimento poderoso.

À minha família, alicerce de todo meu crescimento, meu mais sincero muito obrigada. Em especial, minha mãe, meu irmão e minha avó, vocês foram os maiores motivadores nesta jornada, os que sempre acreditaram incondicionalmente no meu potencial. A vocês dedico este trabalho.

À Giovanna Miranda, por todo apoio e companheirismo, por escutar minhas incontáveis reclamações, por todos os pernoites no laboratório, por todas as caronas para compra de materiais, por ter dado um novo significado a esta minha aventura em Brasília.

À Débora Melo, por toda paciência do mundo ao me guiar durante este último ano. Muito obrigada por ter doado tanto do seu tempo e disposição para me ajudar.

Ao meu orientador, professor Ennio Marques Palmeira, por todo os ensinamentos durante as disciplinas e por toda disponibilidade, paciência e dedicação durante o ano de desenvolvimento desta dissertação. Sem dúvidas, levo grandes lições aprendidas com esse profissional exemplar para minha futura carreira docente. Muito obrigada por tudo.

Aos amigos que fiz em Brasília, vocês foram um pilar de sustento em momentos extremamente difíceis. Em especial, aos amigos que fiz em minha turma, Patricia Figueiredo, Ronaldo Vilela e Taís Avelar, o que seria de mim sem vocês? Ou melhor, o que seria de nós sem um ao outro? Nada se constrói sozinho e com certeza fomos fatores importantes para que esta fase se encerre com um final feliz.

Aos amigos de Maceió e do intercâmbio, por sempre estarem presentes, apesar da distância.

Aos companheiros de laboratório e da sala 4, vocês são os melhores, vocês tornaram este ambiente de trabalho em um meio de agradável convivência. Aos técnicos do laboratório por toda ajuda.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB e da graduação na UFAL, em especial as professoras Juliane Figueiredo Marques e Viviane Carrilho Leão

Ramos, por terem me incentivado de todas as maneiras possíveis. Dentro dessas duas universidades públicas aprendi e vivi experiências pelas quais serei eternamente grata.

Ao Programa de Educação Tutorial de Engenharia Civil da UFAL, não somente pelo aprendizado, mas principalmente pelas pessoas que o programa trouxe para a minha vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e a empresa Bidim pela doação de material feita para o laboratório.

Diversos são os usos de geotêxteis para a engenharia geotécnica e ambiental, sendo a filtração uma das mais utilizadas por apresentar vantagens em relação aos filtros granulares como, por exemplo, uma espessura menor, propriedades controladas e reguladas no processo de fabricação, continuidade da estrutura filtrante, facilidade de instalação e baixo custo. No dimensionamento de um filtro de geotêxtil é preciso conhecer a sua abertura de filtração (O_f) e a dimensão dos poros. O ensaio de ponto de bolha (BBP) é um dos que se destacam na determinação da abertura de filtração de geotêxteis. Estudos variados têm sido realizados empregando esse ensaio, mas nenhum deles com a inclusão de camadas de solo. Frente a esta lacuna científica, esta dissertação tem por objetivo determinar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos na presença de um material granular, sub e sobrejacente, quando submetidos a esforços normais ao plano (confinamento). Ensaio de ponto de bolha foram conduzidos, seguindo recomendações da ASTM D6767, com a inclusão de camadas de brita sub e sobrejacentes com diâmetros dos grãos entre 9,5 e 1,2 mm. Foram ensaiados três geotêxteis não tecido, com gramaturas de 200, 300 e 500 g/m², e cinco níveis de compressão, 0, 10, 100, 400 e 1000 kPa. Para cada geotêxtil, o ensaio foi repetido três vezes para a determinação do padrão de comportamento do material. Os resultados encontrados mostraram uma tendência de comportamento semelhante entre os geotêxteis de 200 e 500 g/m², com uma diminuição das aberturas de filtração brusca para o primeiro carregamento e um pico de aumento logo após para a carga de 100 kPa. O geotêxtil de 300 g/m², apresentou comportamento diferenciado dos outros dois, mas semelhante aos ensaios realizados em estudos anteriores. No geral, foi possível perceber uma influência relevante da presença das britas, pois, seu arranjo em contato com o geotêxtil influenciou os valores de abertura de filtração obtidos nos ensaios, indicando a importância de mais estudos com esse tipo de configuração e a necessidade da consideração da presença de solos sub e sobrejacentes ao geotêxtil em projetos de engenharia.

Geotextiles are widely used in geotechnical and geoenvironmental engineering. Filtration is one of the most used function of geotextiles because they present advantages in relation to granular filters, such as a lower thickness, controlled properties in the manufacturing process, continuity of the filter structure, ease of installation and low cost. In the design of a nonwoven geotextile filter, it is necessary to know its filtration opening size (O_f) and the size of the pores. The Bubble Point Test (BBP) is one that stands out in determining the filtration opening size of geotextiles. Several studies have been carried out using this test, but none of them has considered the presence a soil layers. In view of this scientific gap, this dissertation aimed to determine the filtration opening size of nonwoven geotextiles with the presence of granular layers, under and overlying it, under confinement. Bubble Point Tests were conducted, following the recommendations of ASTM D6767, with gravel layers above and below the geotextile, with particle diameters between 9.5 and 1.2 mm. Three nonwoven geotextiles were tested, with masses per unit area of 200, 300 and 500g/m² and five levels of confinement were applied, 0, 10, 100, 400 and 1000kPa. For each geotextile, the tests were repeated three times to determine the scatter of test results. The results showed a similar behavior between the geotextiles with 200 and 500g/m² with an abrupt decrease of the filtration openings for the first loading stage and a peak soon after, for the load of 100 kPa. The geotextile with 300g/m², presented different behavior from the other two, but similar to results reported by previous studies. In general, it was possible to note a relevant influence of the presence of the gravel, because its arrangement in contact with the geotextile influenced the filtration opening size of the latter obtained in the tests. These results highlight the importance of further studies with this type of configuration and the need for consideration of the presence of soils above and below a geotextile filter in design.

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Motivação da Pesquisa..... | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1. Objetivo Geral..... | 3 |
| 1.2.2. Objetivo Específico..... | 3 |
| 1.3. Estrutura da Dissertação..... | 3 |
| CAPÍTULO 02..... | 5 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 5 |
| 2.1. Geotêxteis..... | 6 |
| 2.2. Filtros..... | 7 |
| 2.3. Filtros Geotêxteis Não Tecidos..... | 7 |
| 2.4. Fabricação..... | 8 |
| 2.4.1. Matéria Prima: Polímeros..... | 9 |
| 2.4.2. Matéria Prima: Fibras..... | 9 |
| 2.4.3. Tipos de ligação dos elementos estruturais..... | 10 |
| 2.4.3.1. Ligação mecânica..... | 11 |
| 2.4.3.2. Ligação Térmica..... | 12 |
| 2.4.3.3. Ligação Química..... | 13 |
| 2.5. Abertura de filtração..... | 14 |
| 2.6. Critérios de projeto para filtros de GTN..... | 15 |
| 2.6.1. Critério de retenção..... | 15 |
| 2.6.2. Critério de permeabilidade..... | 17 |
| 2.6.3. Critério anticolmatação..... | 18 |
| 2.6.4. Critério de sobrevivência e durabilidade..... | 18 |
| 2.7. Determinação de características de filtração..... | 19 |
| 2.7.1. Modelo teórico..... | 20 |
| 2.7.2. Peneiramento..... | 21 |
| 2.7.3. Análise de imagens..... | 22 |
| 2.7.4. Intrusão de mercúrio..... | 23 |
| 2.7.5. Ensaio de Ponto de Bolha (<i>Bubble point test</i> , BBP)..... | 24 |
| 2.8. Confinamento dos filtros de GTN..... | 25 |
| 2.8.1. Alguns estudos recentes..... | 25 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 03..... | 27 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 27 |
| 3.1. Materiais..... | 27 |
| 3.1.1. Geotêxtil não tecido | 27 |
| 3.1.2. Líquido de saturação | 27 |
| 3.1.3. Brita..... | 28 |
| 3.2. Equipamentos | 29 |
| 3.2.1. Fluxômetro - Fluke 922 | 29 |
| 3.2.2. Conjunto de equipamentos do <i>Bubble Point Test</i> | 30 |
| 3.2.3. Sistema de Aplicação de Tensões de Confinamento | 32 |
| 3.2.4. Equipamento de Aquisição de Dados | 33 |
| CAPÍTULO 04..... | 35 |
| 4. METODOLOGIA..... | 35 |
| 4.1. Preparação das Amostras | 35 |
| 4.2. Gramatura..... | 37 |
| 4.3. Programa de ensaios..... | 38 |
| 4.4. Calibração do Sistema de Aplicação de Carga..... | 38 |
| 4.5. Confinamento do Sistema | 39 |
| 4.6. Procedimentos para o Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)..... | 40 |
| 4.7. Obtenção da Curva de Distribuição da Dimensão dos Poros..... | 42 |
| 4.8. Calibração e Repetibilidade do Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)..... | 43 |
| CAPÍTULO 05..... | 45 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 45 |
| 5.1. Condição sem Confinamento | 45 |
| 5.1.1. Apresentação dos Resultados..... | 45 |
| 5.1.2. Intervalo de Confiabilidade..... | 48 |
| 5.2. Condições com Confinamento | 51 |
| 5.2.1. Carregamento de 10kPa | 52 |
| 5.2.2. Carregamento de 100kPa | 55 |
| 5.2.3. Carregamento de 400kPa | 58 |
| 5.2.4. Carregamento de 1000kPa | 60 |
| 5.3. Avaliação das Amostras Ensaçadas sob Confinamento..... | 63 |
| 5.4. Análise da Influência do Confinamento..... | 64 |
| CAPÍTULO 06..... | 68 |
| 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS..... | 68 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Conclusões | 68 |
| 6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 70 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 71 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1: Tipos de geossintéticos e aplicações típicas (MODIFICADO de Palmeira, 2018) | 6 |
| Tabela 2.2: Alguns critérios de retenção encontrados na literatura (Palmeira, 2018) | 16 |
| Tabela 2.3: Alguns critérios de permeabilidade encontrados na literatura (Palmeira, 2018) | 17 |
| Tabela 2.4: Recomendações para a avaliação da natureza crítica e severidade (Palmeira, 2018 <i>apud</i> Carroll, 1983) | 19 |
| Tabela 2.5: Requisitos do critério de sobrevivência (Christopher & Fischer, 1992 <i>apud</i> AASHTO, 1986) | 19 |
| Tabela 3.1: Propriedades dos geotêxteis fornecidas pelo fabricante | 27 |
| Tabela 3.2: Massa específica dos grãos da brita utilizada nos ensaios | 29 |
| Tabela 5.1: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN ₂₀₀ | 46 |
| Tabela 5.2: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN ₃₀₀ | 46 |
| Tabela 5.3: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN ₅₀₀ | 47 |
| Tabela 5.4: Médias dos valores de abertura de filtração dos ensaios sem confinamento para o GTN ₂₀₀ , GTN ₃₀₀ e GTN ₅₀₀ | 47 |
| Tabela 5.5: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN ₂₀₀ | 49 |
| Tabela 5.6: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN ₃₀₀ | 49 |
| Tabela 5.7: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN ₅₀₀ | 50 |
| Tabela 5.8: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN ₂₀₀ | 52 |
| Tabela 5.9: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN ₃₀₀ | 53 |
| Tabela 5.10: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN ₅₀₀ | 53 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5.11: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN ₂₀₀ | 55 |
| Tabela 5.12: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN ₃₀₀ | 56 |
| Tabela 5.13: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN ₅₀₀ | 57 |
| Tabela 5.14: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN ₂₀₀ | 58 |
| Tabela 5.15: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN ₃₀₀ | 59 |
| Tabela 5.16: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN ₅₀₀ | 60 |
| Tabela 5.17: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN ₂₀₀ | 61 |
| Tabela 5.18: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN ₃₀₀ | 62 |
| Tabela 5.19: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN ₅₀₀ | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Filtros geotêxteis sob camada de drenagem granular grossa: (a) Filtro geotêxtil sobrecarregado durante a construção; (b) Prática de construção precária e danos ao filtro (MODIFICADO de Palmeira et al. 2012) | 2 |
| Figura 2.1: Exemplos de Geossintéticos: (a) Geotêxtil; (b) Geogrelha; (c) Georrede; (d) Geomembrana; (e) Geocomposto; (f) Geocomposto argiloso; (g) Geotubo; (h) Geocélula; (i) Geoexpandido (IGS, 2015) | 5 |
| Figura 2.2: Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2017)..... | 7 |
| Figura 2.3: Configuração estável de grãos de solo em contato com o filtro geotêxtil (Palmeira, 2018) | 8 |
| Figura 2.4: Tipos de fibras de geotêxteis não tecido: (a) filamento contínuo; (b) filamento descontínuo; (c) filamento descontínuo torcido (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996a) | 10 |
| Figura 2.5: Fotomicrografias da seção transversal de geotêxteis não-tecido (ampliadas 80x): (a) filamentos contínuos; (b) filamentos descontínuos (Bhatia & Smith, 1996a)..... | 11 |
| Figura 2.6: Fotomicrografia (ampliada 40x) do entrelaçamento da estrutura de fibras formadas pelo processo de <i>needle-punching</i> (Bhatia & Smith, 1996a)..... | 12 |
| Figura 2.7: Fotomicrografia (ampliada 40x) de uma vista de plano de um geotêxtil ligado por calor (Bhatia & Smith, 1996a) | 12 |
| Figura 2.8: Fotomicrografia (ampliada 400x) da seção transversal de um heterofilamento onde a casca exterior começou a derreter e o núcleo interno ainda não (Bhatia & Smith, 1996a) .. | 13 |
| Figura 2.9: Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis: (a) cegamento; (b) bloqueamento; (c) obstrução interna (Palmeira, 2017)..... | 18 |
| Figura 2.10: Resultado típico do ensaio de peneiramento a seco com boa repetibilidade e realizado em amostra de geotêxtil não tecido (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996b).. | 22 |
| Figura 2.11: Resultado típico do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio com boa repetibilidade e realizado em amostra de geotêxtil não tecido de gramatura 311 g/m ² (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996b) | 23 |
| Figura 2.12: Vazão de ar versus pressão aplicada – Calibração com tela metálica #170 (Melo, 2018) | 24 |
| Figura 2.13: Curvas de distribuição de poros de cinco telas metálicas #170 (Melo, 2018) | 25 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.1: Brita utilizada no ensaio de ponto de bolha (BBP) | 28 |
| Figura 3.2: Curva granulométrica da brita utilizada nos ensaios | 29 |
| Figura 3.3: Fluxômetros utilizados no ensaio de ponto de bolha (BBP) | 30 |
| Figura 3.4: Conjunto de equipamentos do ensaio de ponto de bolha da UnB | 31 |
| Figura 3.5: Vista externa da célula de ensaio | 31 |
| Figura 3.6: Vista interna da célula de ensaio | 32 |
| Figura 3.7: Fita de silicone utilizada para vedar a lateral da célula de ensaio | 32 |
| Figura 3.8: Sistema de aplicação de confinamento | 33 |
| Figura 3.9: Prato de transmissão de compressão interno à célula de ensaio | 33 |
| Figura 3.10: Leitor digital de cargas utilizado nos ensaios | 34 |
| Figura 4.1: Amostragem de uma das mantas utilizadas para corte dos espécimes | 36 |
| Figura 4.2: Dobras e frisos descartados nas mantas | 36 |
| Figura 4.3: Médias e desvios padrão dos espécimes disponíveis para os ensaios | 37 |
| Figura 4.4: Médias e desvios padrões dos espécimes utilizados nos ensaios | 38 |
| Figura 4.5: Curva força aplicada <i>versus</i> leitura do sistema de aplicação de carga | 39 |
| Figura 4.6: Curva de pressão de entrada <i>versus</i> vazão de saída da calibração do BBP | 44 |
| Figura 4.7: Curva de distribuição da dimensão dos poros da peneira #170 | 44 |
| Figura 5.1: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN ₂₀₀ | 45 |
| Figura 5.2: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN ₃₀₀ | 46 |
| Figura 5.3: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN ₅₀₀ | 47 |
| Figura 5.4: Gráfico das aberturas de filtração do GTN ₂₀₀ com as barras delimitadoras do intervalo de confiança | 50 |
| Figura 5.5: Gráfico das aberturas de filtração do GTN ₃₀₀ com as barras delimitadoras do intervalo de confiança | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.6: Gráfico das aberturas de filtração do GTN ₅₀₀ com as barras delimitadoras do intervalo de confiança | 51 |
| Figura 5.7: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN ₂₀₀ | 52 |
| Figura 5.8: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN ₃₀₀ | 53 |
| Figura 5.9: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN ₅₀₀ | 54 |
| Figura 5.10: Médias das aberturas de filtração dos GTN ₂₀₀ , GTN ₃₀₀ e GTN ₅₀₀ com carregamento de 10kPa | 54 |
| Figura 5.11: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN ₂₀₀ | 55 |
| Figura 5.12: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN ₃₀₀ | 56 |
| Figura 5.13: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN ₅₀₀ | 57 |
| Figura 5.14: Médias das aberturas de filtração dos GTN ₂₀₀ , GTN ₃₀₀ e GTN ₅₀₀ com carregamento de 100kPa | 57 |
| Figura 5.15: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN ₂₀₀ | 58 |
| Figura 5.16: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN ₃₀₀ | 59 |
| Figura 5.17: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN ₅₀₀ | 59 |
| Figura 5.18: Médias das aberturas de filtração dos GTN ₂₀₀ , GTN ₃₀₀ e GTN ₅₀₀ com carregamento de 400kPa | 60 |
| Figura 5.19: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN ₂₀₀ | 61 |
| Figura 5.20: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN ₃₀₀ | 62 |
| Figura 5.21: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN ₅₀₀ | 62 |
| Figura 5.22: Médias das aberturas de filtração dos GTN ₂₀₀ , GTN ₃₀₀ e GTN ₅₀₀ com carregamento de 1000kPa | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.23: Faces (a) superior e (b) inferior de uma das amostras de GTN ensaiadas com compressão de 1000kPa..... | 64 |
| Figura 5.24: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN ₂₀₀ | 65 |
| Figura 5.25: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN ₃₀₀ | 66 |
| Figura 5.26: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN ₅₀₀ | 66 |
| Figura 5.27: Seção transversal da célula de ensaio apresentando o efeito de tracionamento nas amostras durante o ensaio | 67 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

| | |
|-----------------|---|
| A | Área das amostras |
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Norma Técnicas |
| ASTM | <i>America Society of Testing Materials</i> |
| AOS | <i>Apparent Opening Size</i> |
| BBP | <i>Bubble Point Test</i> |
| B | Constante Capilar |
| Cu | Coefficiente de uniformidade |
| d | Diâmetro do poro |
| d _f | Diâmetro do filamento |
| D ₁₅ | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passante em peso |
| D ₃₀ | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso |
| D ₅₀ | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 50% passante em peso |
| D ₈₅ | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passante em peso |
| D ₉₀ | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 90% passante em peso |
| D _I | Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso |
| EOS | <i>Equivalent Opening Size</i> |
| FHWA | <i>Federal Highway Administration</i> |
| FOS | <i>Filtration Opening Size</i> |
| GT | Geotêxtil tecido |
| GTN | Geotêxtil não tecido |
| IC | Intervalo de confiança |
| I _D | Índice de dimensionamento |
| IGS | <i>International Geosynthetics Society</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| k | Número de graus de liberdade |
| K _{GT} | Permeabilidade do geotêxtil |

| | |
|-------------------|--|
| K_n | Permeabilidade normal ao plano |
| K_s | Permeabilidade do filtro |
| m | Massa das amostras |
| M_A | Massa por unidade de área ou gramatura |
| n | Porosidade do geotêxtil ou número de amostras |
| NBR | Norma Brasileira |
| O_f | Abertura de Filtração |
| O_{10} | Abertura do poro que 10% dos poros são menores |
| O_{30} | Abertura do poro que 30% dos poros são menores |
| O_{50} | Abertura do poro que 50% dos poros são menores |
| O_{85} | Abertura do poro que 85% dos poros são menores |
| O_{90} | Abertura do poro que 90% dos poros são menores |
| O_{95} | Abertura do poro que 95% dos poros são menores |
| O_{98} | Abertura do poro que 98% dos poros são menores |
| OP-20/30 | Tipos de geotêxtil |
| P | Pressão |
| PE | Polietileno |
| PET | Poliéster |
| PP | Polipropileno |
| Q | Fluxo de água |
| RT-10/16/31 | Tipos de geotêxtil |
| S | Desvio padrão da média |
| SVM | Máquina de Vetores de Suporte |
| t | Valor da distribuição de Student |
| T | Temperatura |
| t_{GT} | Espessura do geotêxtil |
| UnB | Universidade de Brasília |
| \bar{X} | Média dos valores |
| Ψ | Permissividade |
| σ | Tensão superficial |

θ Ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil, para o BBP
 ξ Parâmetro empírico
 δ_m Massa específica dos grãos
 $\mu_{inferior}$ Limite inferior do intervalo de confiança
 $\mu_{superior}$ Limite superior do intervalo de confiança

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, com a produção do primeiro geossintético brasileiro, este material, oriundo de polímeros e de amplo uso na engenharia geotécnica vêm ganhando cada vez mais destaque. Consagrou-se como uma das tecnologias mais avançadas no mundo devido ao processo contínuo de melhora baseado em pesquisas e desempenho em campo. Dentre os geossintéticos utilizados, destacam-se os geotêxteis, que são mantas contínuas de fibras ou filamentos com orientação ordenada (tecido) ou aleatória (não tecido).

Geotêxteis têm diversas possibilidades de uso, sendo a filtração a mais utilizada no Brasil por apresentar vantagens em relação aos filtros granulares como, por exemplo, uma espessura menor, propriedades controladas e reguladas no processo de fabricação, continuidade da estrutura filtrante, facilidade de instalação e baixo custo (Aguiar & Vertematti, 2004). No dimensionamento de um filtro de geotêxtil é preciso conhecer a sua abertura de filtração e as dimensões dos poros. Atualmente, essas características são determinadas com ensaios simples sem o confinamento da amostra e sem considerar sua interação com o material com que o geotêxtil entrará em contato, ou seja, sem representar de fato sua condição em campo.

O ensaio utilizando o equipamento de ponto de bolha (*Bubble Point*) é um dos que se destaca na determinação da abertura de filtração de geotêxteis. A metodologia convencional já permite a inclusão da condição de confinamento, refletindo melhor a realidade de campo. Além disso, é também importante ensaiar o geotêxtil em conjunto com uma camada de solo subjacente.

1.1. Motivação da Pesquisa

É de conhecimento de estudos da área de geotêxteis e suas propriedades hidráulicas que as mesmas podem sofrer alterações quando se encontram em campo sob confinamento, não refletindo os pressupostos de critérios de filtro (Heerten, 1982; Faure et al. 1999; Gardoni & Palmeira, 2002; Palmeira & Fannin, 2002; Palmeira et al. 2005, 2010).

Outro aspecto ainda a ser investigado adequadamente relacionado ao comportamento do filtro geotêxtil é a influência das condições de camadas subjacentes ao geotêxtil. Por exemplo, nos esgotos com material de drenagem de cascalho, o filtro geotêxtil pode afundar nos poros do cascalho e influenciar o comportamento filtrante. Para tais drenagens, condições de construção precárias ou níveis de tensão mais altos (Figura 1.1a) aumentam a complexidade do problema, devido à compressão do filtro e condições mais favoráveis para danos mecânicos, como mostrado na Fig. 1.1b (Palmeira et al. 2012).

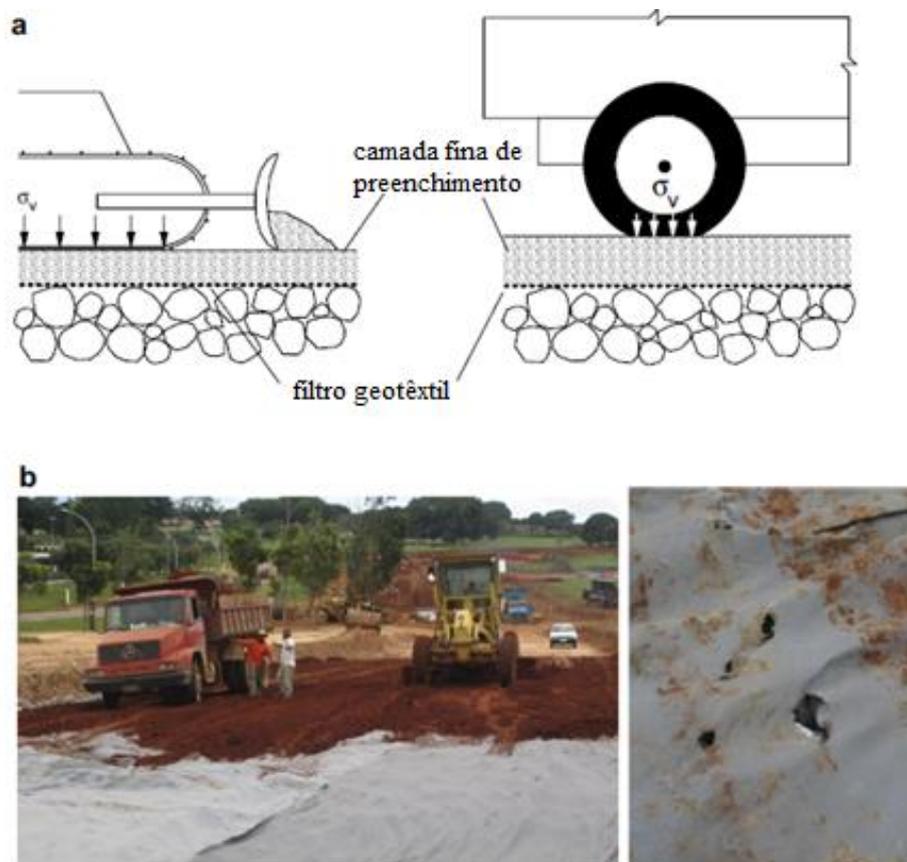


Figura 1.1: Filtros geotêxteis sob camada de drenagem granular grossa: (a) Filtro geotêxtil sobrecarregado durante a construção; (b) Prática de construção precária e danos ao filtro (MODIFICADO de Palmeira et al. 2012)

Diante dessa demanda, observa-se a necessidade de estudar o comportamento da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos submetidos a compressão na presença de um material granular subjacente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Considerando as condições de campo e a respectiva simulação em laboratório, o presente trabalho tem como objetivo determinar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos na presença de um material granular, sub e sobrejacente, quando submetidos a esforços normais ao plano por meio do ensaio de ponto de bolha (BBP).

1.2.2. Objetivo Específico

O objetivo da pesquisa é avaliar experimentalmente:

- A variabilidade da abertura de filtração do conjunto formado por diferentes geotêxteis não tecidos com material granular sub e sobrejacente, quando confinados;
- O efeito das tensões de confinamento na abertura de filtração;
- A influência da brita como material sub e sobrejacente na variabilidade da abertura de filtração geotêxtil.

1.3. Estrutura da Dissertação

Essa dissertação está estruturada em seis capítulos. O capítulo 1 aborda de maneira resumida uma introdução, motivação à problemática estudada. Além disso, também são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho. O capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura sobre o tema, garantindo que conceitos e teorias necessárias para os capítulos seguintes foram devidamente introduzidas ao leitor. Dentre os assuntos abordados por este capítulo, destacam-se: conceito, tipos e usos de geossintéticos; funções e tipos de filtros, com destaque para os filtros geotêxteis não-tecidos; matéria-prima e processo de fabricação dos geotêxteis não-tecidos; critérios de projeto para filtros geotêxteis; conceito de abertura de filtração e metodologias para a sua obtenção; e uma sucinta revisão dos trabalhos mais recentes envolvendo confinamento e uso do ensaio de ponto de bolha.

O capítulo 3 apresenta os materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento desta investigação laboratorial. O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada com os materiais e equipamentos apresentados no capítulo anterior. Esse capítulo também aborda os métodos de avaliação dos dados obtidos.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de ponto de bolha com todas as suas variações. Também estão incluídos nesse capítulo, todas as análises necessárias para que os objetivos descritos anteriormente fossem atingidos. Por fim, o capítulo 6 encerra a dissertação com as conclusões encontradas, assim como apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define geossintético como um produto com pelo menos um de seus componentes produzidos a partir de um polímero sintético ou natural, sob forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações de engenharia geotécnica e civil (ABNT, 2018).

O mercado dispõe de uma vasta gama de opções de geossintéticos disponíveis para uso, sendo os principais: geotêxteis (Fig. 2.1a), geogrelhas (Fig. 2.1b), georredes (Fig. 2.1c), geomembranas (Fig. 2.1d), geocompostos (Fig. 2.1e), geocompostos argilosos (Fig. 2.1f), geotubos (Fig. 2.1g), geocélulas (Fig. 2.1h) e geoexpandidos (Fig. 2.1i).

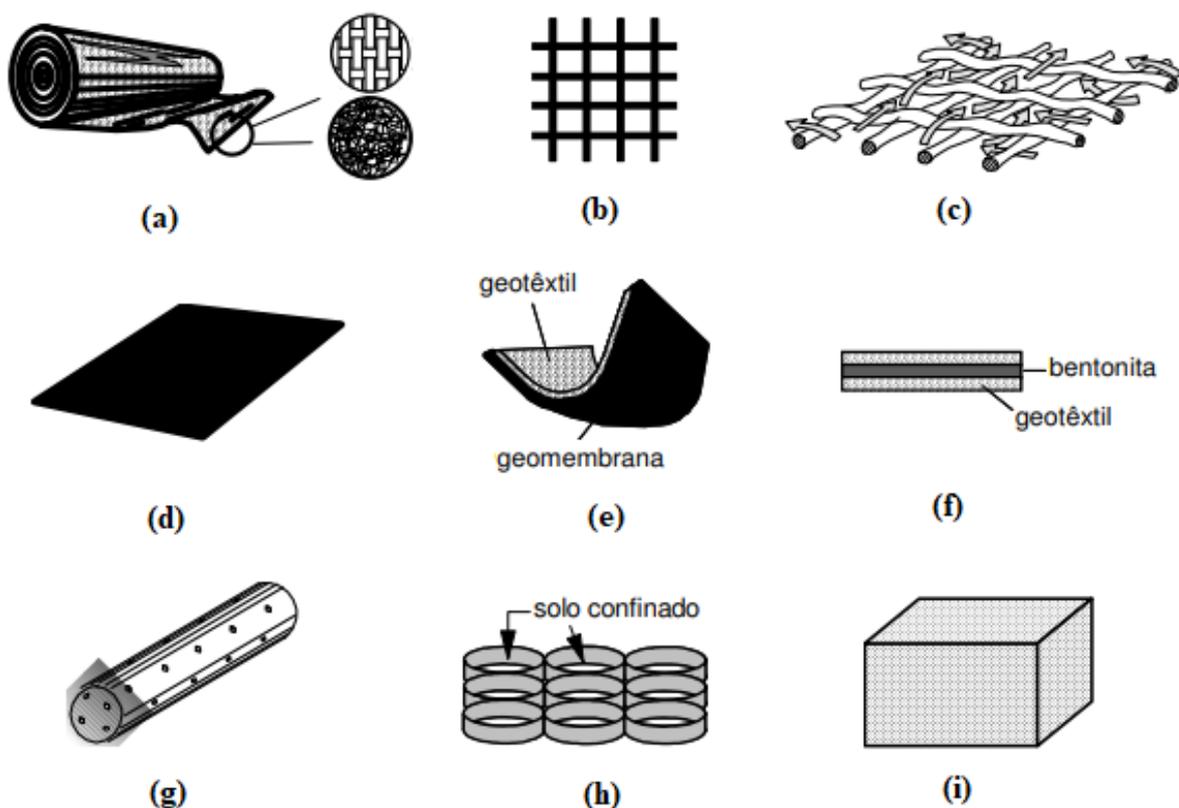


Figura 2.1: Exemplos de Geossintéticos: (a) Geotêxtil; (b) Geogrelha; (c) Georrede; (d) Geomembrana; (e) Geocomposto; (f) Geocomposto argiloso; (g) Geotubo; (h) Geocélula; (i) Geoexpandido (IGS, 2015)

Cada um desses geossintéticos pode desempenhar uma ou mais funções: reforço, separação, drenagem, filtração, barreira e proteção. A Tab. 2.1 esquematiza as possibilidades de função para cada geossintético exemplificado acima.

Tabela 2.1: Tipos de geossintéticos e aplicações típicas (MODIFICADO de Palmeira, 2018)

| Tipo | Função | | | | | | |
|---------------|---------|-----------|----------|-----------|------------------|----------|--------------------|
| | Reforço | Separação | Drenagem | Filtração | Barreira | Proteção | Outra |
| Geotêxteis | x | x | x | x | x ⁽¹⁾ | x | x ^(2,3) |
| Geogrelhas | x | | | | | | x ⁽²⁾ |
| Georredes | | | x | | | | |
| Geomembranas | | x | | | x | x | |
| Geocompostos | x | x | x | x | x | x | |
| Geotubos | | | x | | | | |
| Geocélulas | x | | | | | x | x ⁽⁴⁾ |
| Geoexpandidos | | | | | | | x ⁽⁵⁾ |

(1) se o geotêxtil não tecido impregnado por asfalto, como barreira capilar ou barreira para sedimentos; (2) confinamento de material granular em colunas granulares; (3) camada de aderência/interface entre materiais; (4) estrutura de contenção, quando empilhadas convenientemente; (5) material de preenchimento ou aterros de baixa densidade e redução de pressões sobre estruturas de contenção.

2.1. Geotêxteis

Um tipo de geossintético muito comum é o geotêxtil, um material têxtil, plano, permeável, podendo ser não tecido ou tecido, manufaturados de diferentes polímeros, sendo o polietileno, a poliamida (nylon), o poliéster (polietileno tereftalato) e o polipropileno os mais utilizados (Freitas, 2003).

Os geotêxteis tecidos (GT) são produzidos pelo entrelaçamento dos fios em direções ortogonais ao longo da manta (Fig. 2.2a). Já os geotêxteis não tecidos (GTN) são fabricados lançando as fibras de maneira aleatória (Fig. 2.2b) sobre uma esteira rolante que determina a espessura do material de acordo com a sua velocidade. Na etapa seguinte do processo de fabricação do GTN, o material é submetido a um processo de ligação das fibras que pode ser mecânico, térmico ou químico (Freitas, 2003).

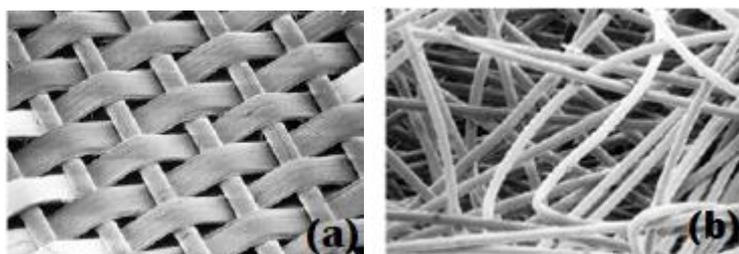


Figura 2.2: Tipos de geotêxteis (imagens ampliadas): (a) geotêxtil tecido, e (b) geotêxtil não tecido (Palmeira, 2017)

2.2. Filtros

Um elemento construtivo comum na engenharia geotécnica são os filtros. Esses filtros têm função de permitir o fluxo de algum fluido retendo as partículas do solo. Eles podem ser agrupados em filtros granulares ou sintéticos. Eles são comuns em obras de contenção, aterros rodoviários, barragens e outros (Giroud, 1981).

Durante muito tempo os filtros granulares (areia e pedregulhos) foram utilizados, mas devido a alguns fatores, principalmente restrições ambientais e praticidade, a utilização de filtros sintéticos tem sido crescente.

2.3. Filtros Geotêxteis Não Tecidos

Os geotêxteis não tecidos são materiais industrializados cujo processo de produção é dividido em quatro etapas: preparação das fibras, formação da malha, fixação dos elementos estruturais e armazenamento em rolos. As variações principais dos GTN estão relacionadas com o polímero utilizado, preparação das fibras (contínuas ou cortadas) e quanto ao processo de ligação (mecânico, térmico e químico) (Bhatia & Smith, 1996a). Os diferentes métodos de produção de geotêxteis não tecidos resultam em materiais compressíveis de alta permeabilidade, cuja estrutura e vazios variam com os processos de fabricação (Elsharief & Lovell, 1996).

O geotêxtil não tecido pode ser usado em obras exercendo diversas funções como, separação, proteção, reforço, controle de erosões, sendo a função de filtração uma das mais

utilizadas. Entre as vantagens dos geotêxteis não tecidos em relação aos tecidos citadas por Palmeira (2018), destacam-se: maior estabilidade quanto as dimensões das aberturas do filtro, menor susceptibilidade a danos mecânicos e tendência a repercussões menores de danos no funcionamento do filtro.

Para que um filtro geotêxtil esteja bem especificado, é necessário o estabelecimento de um fluxo contínuo, uma estrutura que se mantenha estável em contato com o filtro, ocorrendo a formação de pontes de grãos (Figura 2.3), sendo essa uma condição ideal, mas não única. Nesse processo, alguns grãos de solo atravessarão o filtro e outros ficarão retidos em seu interior, sem que, necessariamente, se comprometam as premissas de projeto (Palmeira, 2018).

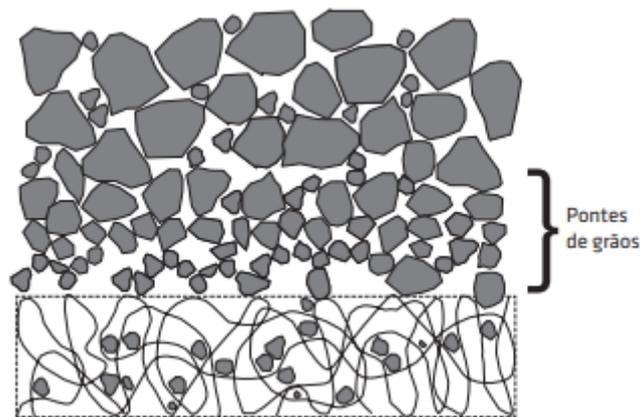


Figura 2.3: Configuração estável de grãos de solo em contato com o filtro geotêxtil (Palmeira, 2018)

Na função de filtro, pode ocorrer o fenômeno da colmatção, quando há o bloqueio dos poros por partículas de solo ou por fenômenos químicos ou biológicos. A colmatção do geotêxtil pode acontecer durante a instalação e a execução da obra ou durante a vida útil do filtro (Melo, 2018). Como consequência, o bloqueio dos poros provoca a diminuição da permissividade e transmissividade do geotêxtil, alterando suas características de projeto e comprometendo seu funcionamento (Palmeira & Gardoni, 2000).

2.4. Fabricação

A indústria de geotêxteis em rápido crescimento levou a uma variedade de novos processos e produtos. Muitos destes geotêxteis têm propriedades físicas semelhantes (massa

por unidade de área e espessura) mas têm distribuições de poros completamente diferentes (Bhatia & Smith, 1996a).

Os geotêxteis tecidos e não tecidos variam significativamente em suas propriedades físicas básicas. Os geotêxteis tecidos tipicamente variam de 80-200 g/m² em massa por unidade de área, 0,3-3 mm em espessura, 0,0008-0,01 cm/s em permeabilidade e 0,15-0,85 mm em *Apparent Opening Size* (AOS – Valor atribuído ao O₉₅). Os geotêxteis não tecidos variam tipicamente de 50-1700 g/m² em massa por unidade de área, 0,25-9 mm em espessura, 0,003-0,3 cm/s em permeabilidade e 0,075-0,85 mm em AOS. A explicação para essa ampla gama de propriedades físicas está no processo de fabricação (Bhatia & Smith, 1996a).

2.4.1. Matéria Prima: Polímeros

Geotêxteis são predominantemente fabricados de fibras sintéticas, em vez de fibras naturais. Os materiais sintéticos são produzidos em plantas de processamento químico a partir da polimerização dos polímeros que se transformam nos termoplásticos. Geotêxteis são comumente feitos a partir dos polímeros de polipropileno (PP), poliéster (PET), poliamida (nylon) ou polietileno (PE). Não há diferenças significativas nas propriedades físicas desses polímeros, como gravidade específica (0,9-1,3), temperatura de fusão (135°C–260°C) e absorção de água (0,0-2,0%); portanto, o tipo de polímero tem pouco efeito sobre a distribuição do tamanho dos poros dos geotêxteis (Bhatia & Smith, 1996a). No entanto, as fibras produzidas por diferentes processos de fabricação, mesmo que tenham o mesmo polímero como matéria prima, podem ter diferenças significativas devido à adição de aditivos ou pelo método de formação do polímero em um filamento (Bell & Hicks, 1980).

2.4.2. Matéria Prima: Fibras

As fibras geotêxteis são produzidas por extrusão de pastilhas de polímero fundido através de uma fieira. A fieira é semelhante a uma cabeça de chuveiro com 100-3000 orifícios muito pequenos. Os filamentos contínuos são normalmente feitos de uma fieira com 350 orifícios, e as fibras descontínuas são feitas de uma fieira com 3000 orifícios (Joseph, 1981). As fibras são extrudadas e endurecidas por um processo de fiação seco ou úmido para produzir

um filamento de seção transversal circular continuamente extrudado, uma fita plana continuamente extrudada, ou uma folha extrudada. Diferentes tipos de fibras são então feitos.

Existem também diferentes tipos de fibras usadas na fabricação de geotêxteis não tecidos: filamentos contínuos e fibras descontínuas. Ambos os tipos são feitos de filamentos de seção transversal circular continuamente extrudados. A única diferença entre os tipos de fibra é seu comprimento. Os filamentos contínuos (Fig. 2.4a) são fibras de longo comprimento e os filamentos descontínuos (Fig. 2.4b) são fibras muito curtas (na faixa de 25 a 100 mm de comprimento). As fibras cortadas podem ser torcidas e fiadas (Fig. 2.4c) (Bhatia & Smith, 1996a).

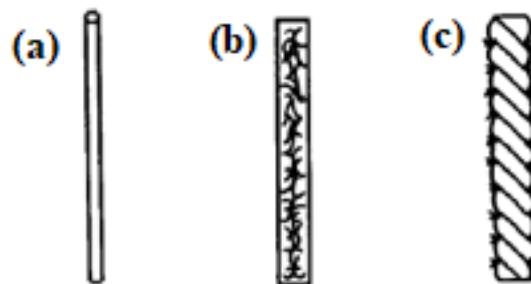


Figura 2.4: Tipos de fibras de geotêxteis não tecido: (a) filamento contínuo; (b) filamento descontínuo; (c) filamento descontínuo torcido (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996a)

A diferença na estrutura de poros pode ser vista comparando fotomicrografias da seção transversal de um geotêxtil de filamento contínuo (Fig. 2.5a) e um geotêxtil de fibras descontínuas (Fig. 2.5b) (geotêxteis com gramaturas semelhantes). Os filamentos contínuos tendem a ter mais ordem dentro da seção transversal, em oposição às fibras descontínuas, que são aleatórias em todo o geotêxtil (Bhatia & Smith, 1996a).

2.4.3. Tipos de ligação dos elementos estruturais

Os geotêxteis não tecidos são geralmente feitos a partir de um processo de *spunbonding*. *Spunbonding* é um processo de fabricação de uma única etapa, do estágio químico ou do polímero ao produto geotêxtil acabado em um rolo. Há quatro etapas principais no processo de agulhamento: preparação de fibra; formação da malha; ligação dos elementos estruturais; e armazenamento em rolos. O polímero fundido é primeiro alimentado em uma extrusora e

forçado através de uma fiação, as fibras são então esticadas após o resfriamento. A teia de fios é construída adicionando continuamente fibras, a uma profundidade ligeiramente maior que o do produto final, sobre uma correia transportadora em movimento. As fibras formam uma teia solta que pode ser unida por uma de três técnicas: ligação mecânica, ligação térmica ou ligação química (Bhatia & Smith, 1996a).

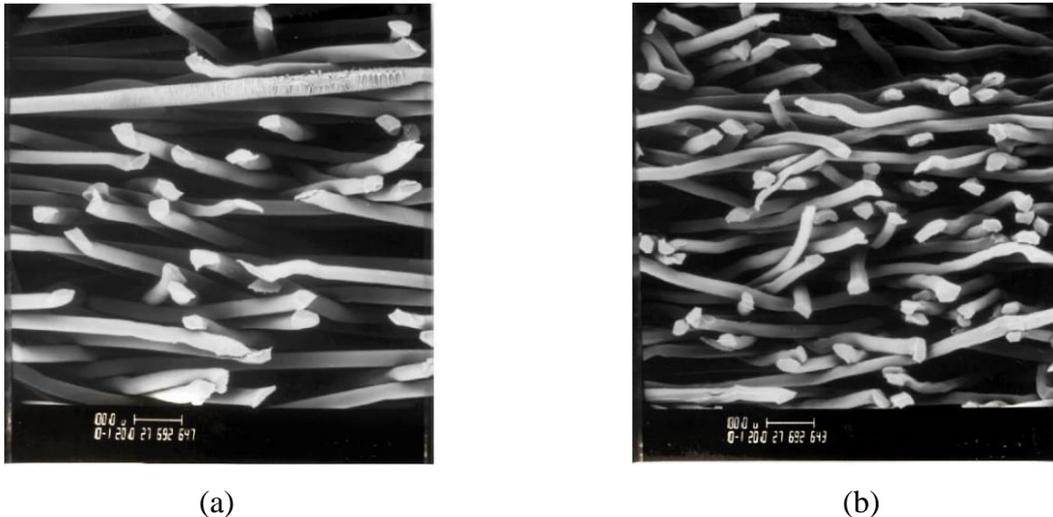


Figura 2.5: Fotomicrografias da seção transversal de geotêxteis não-tecido (ampliadas 80x): (a) filamentos contínuos; (b) filamentos descontínuos (Bhatia & Smith, 1996a)

2.4.3.1. Ligação mecânica

Needle-punching ou Agulhagem é o processo mecânico usado para unir geotêxteis não tecidos. No processo de agulhamento, a teia de fios é passada sob uma prancha composta de milhares de agulhas farpadas. As agulhas farpadas, com cerca de 76 mm de comprimento com 3 ou 4 farpas, são repetidamente empurradas para dentro e para fora da espessura total da tela a uma taxa de até 2200 movimentos por minuto, ou 500 penetrações por minuto, dependendo da densidade da agulha e velocidade da linha. Durante esse processo, as fibras externas são arrastadas para o interior da teia, fazendo com que entrem em contato com outras fibras (Fig. 2.6), e um geotêxtil espesso, com as fibras aleatoriamente arranjadas, é criado. A ligação do geotêxtil depende do emaranhamento mecânico e do atrito fibra-a-fibra (Bhatia & Smith, 1996a). O desenho da agulha, a densidade da punção e a profundidade da punção são variáveis adicionais que podem afetar a distribuição do tamanho dos poros de um geotêxtil (Kulter, 1985).



Figura 2.6: Fotomicrografia (ampliada 40x) do entrelaçamento da estrutura de fibras formadas pelo processo de *needle-punching* (Bhatia & Smith, 1996a)

2.4.3.2. Ligação Térmica

A ligação térmica, também conhecida como “ligação por calor” ou “ligação por fusão”, é um processo de ligação que, na verdade, funde a teia em pontos de cruzamento das fibras (Fig. 2.7). Neste processo, a teia de fios é submetida a uma fonte de calor, tal como vapor pressurizado ou ar quente, que causa a fusão nos pontos de cruzamento da fibra.

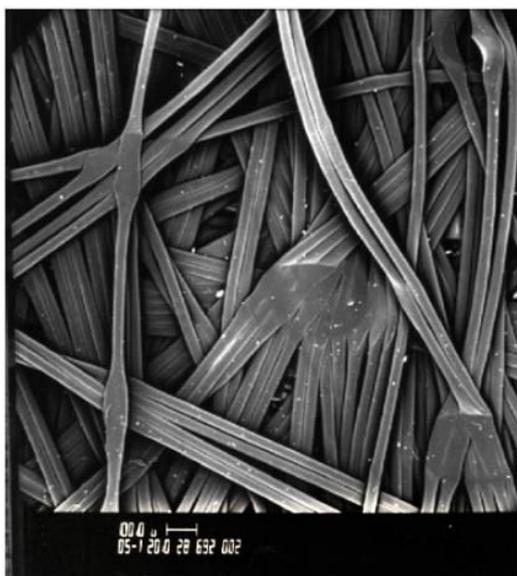


Figura 2.7: Fotomicrografia (ampliada 40x) de uma vista de plano de um geotêxtil ligado por calor (Bhatia & Smith, 1996a)

Podem ser utilizados homofilamentos ou heterofilamentos, filamentos contínuos ou fibras descontínuas para o processo de ligação térmica. Ligações fortes e flexíveis podem ser formadas nos pontos de cruzamento, porque somente o invólucro externo se funde e se liga a outros heterofilamentos e homofilamentos (Fig. 2.8). O produto acabado é um geotêxtil fino (normalmente 0,20-0,60 mm de espessura) devido à compressão da estrutura através da pressão. O grau de fusão, a velocidade da linha e o padrão gravado no rolo afetam a distribuição do tamanho do poro geotêxtil acabado (Bhatia & Smith, 1996a).

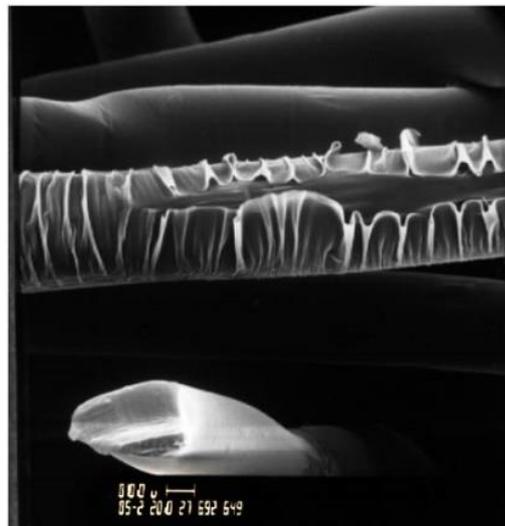


Figura 2.8: Fotomicrografia (ampliada 400x) da seção transversal de um heterofilamento onde a casca exterior começou a derreter e o núcleo interno ainda não (Bhatia & Smith, 1996a)

2.4.3.3. Ligação Química

A ligação química é a terceira técnica usada para a ligação de geotêxteis não tecidos. Um ligante químico, tal como uma resina acrílica, pode ser aplicado por imersão total ou por pulverização. Após o aglutinante ser aplicado, a teia de fios é passada através de um forno ou rolos quentes para curar o aglutinante químico (Ingold & Miller, 1988). Outra técnica de ligação química utiliza o gás cloreto de hidrogênio. Neste processo, o gás é passado sobre fibras de teia de fios que são mantidas em contato próximo umas das outras por tensão. O gás quebra as ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas e forma um complexo com o grupo amida. Por dessorção, o processo é revertido e novas ligações de hidrogênio são formadas entre cadeias poliméricas em diferentes fibras. A ligação química geralmente ocorre após a ligação mecânica ou térmica (Bhatia & Smith, 1996a).

2.5. Abertura de filtração

Os geotêxteis não tecidos possuem aberturas de vários tamanhos e formatos, necessitando-se da curva de distribuição de abertura dos poros para a sua caracterização como filtro. Essa curva de distribuição é obtida de modo similar à curva de distribuição granulométrica do solo (Giroud, 1981).

Na literatura é possível encontrar diferentes valores e nomenclaturas utilizadas para se referir ao maior poro de um geotêxtil. Uma delas é a abertura aparente ou AOS (*Apparent Opening Size*) correspondente ao valor de O_{95} , ou seja, o tamanho em que 95% dos poros são iguais ou inferiores a esse valor. Outras duas nomenclaturas de referência são a abertura equivalente ou EOS (*Equivalent Opening Size*) e a abertura de filtração ou FOS (*Filtration Opening Size*). Alguns valores usualmente utilizados por autores para o dimensionamento de filtros geotêxteis são: O_{90} , O_{85} , O_{50} e O_{15} .

Os tamanhos da abertura dos poros e da maior partícula capaz de atravessar o geotêxtil são duas características indispensáveis para se satisfazer o critério de retenção de um geotêxtil (Palmeira & Fannin, 1998). Apesar das metodologias existentes e da importância dessas informações, a abertura de filtração ainda não é rotineiramente obtida com fidelidade em relação às condições de campo, principalmente pela dificuldade de obtenção deste valor e da falta de consenso sobre a melhor metodologia a ser utilizada (Bathia & Smith, 1996a).

Alguns estudos visando o melhor entendimento e previsão de valores importantes de abertura de filtração foram e estão sendo feitos, sendo um deles o de Fatema & Bhatia (2019). As autoras fizeram um estudo na Universidade de Syracuse com o objetivo de fazer uma correlação entre dois valores de abertura de poros, o O_{98} obtido pelo ensaio de ponto de bolha e o O_{95} ou AOS obtido por peneiramento a seco para 51 amostras de geotêxteis de todo o mundo. O estudo incluiu 20 geotêxteis tecidos, sendo 7 monofilados, 11 *slit-film*, e 2 multifilados, 29 geotêxteis não-tecidos, sendo 8 de ligação térmica, e 21 agulhados, e 2 de compósitos (uma combinação de geotêxteis tecidos e não-tecidos). Os resultados do ensaio de peneiramento a seco foram obtidos dos fabricantes para alguns geotêxteis e para outros geotêxteis os ensaios de peneiramento a seco foram realizados na Universidade de Syracuse. O teste t de Student foi realizado para fornecer um intervalo aceitável de valores AOS previstos com um nível de confiança de 99%. O erro quadrático médio da raiz (RMSE) foi também calculado para determinar a precisão dos modelos. Três ferramentas de aprendizagem de

máquina foram utilizadas para correlacionar os valores: Regressão Linear, Floresta Aleatória e Máquina de Vetores de Suporte (SVM), onde este último se mostrou a ferramenta mais precisa para previsão dos valores de AOS sem que o ensaio de peneiramento a seco precise ser realizado.

2.6. Critérios de projeto para filtros de GTN

Os projetos de filtro utilizando geotêxtil não tecido levam em consideração quatro critérios, sendo eles: retenção, permeabilidade, anticolmatação e sobrevivência e durabilidade.

O critério de retenção previne a migração excessiva de partículas de solo pelo geotêxtil; o critério de permeabilidade garante o fluxo livre de líquidos pelo geotêxtil; o critério anticolmatação evita que ocorra bloqueio dos poros que impeçam o geotêxtil de desempenhar sua função; e o critério de sobrevivência e durabilidade garante que o geotêxtil vai atender adequadamente aos critérios anteriores durante a vida útil da estrutura e sobreviver a instalação na obra. A capacidade de um geotêxtil em atender esses requisitos é principalmente função das maiores aberturas de poros e da distribuição de tamanho de seus poros (Bhatia & Smith, 1996a).

2.6.1. Critério de retenção

Um filtro geotêxtil adequadamente projetado deve garantir a retenção de partículas de materiais erodíveis e possuir capacidade de descarga adequada durante toda a vida útil da estrutura (Bhatia & Smith, 1996a).

O critério de retenção tem como objetivo assegurar que os grãos do solo não atravessarão o filtro em um volume suficiente que possa comprometer a estabilidade da obra. Ele é, normalmente, expresso pela relação entre a medida de abertura de filtração, ou de poros do geotêxtil, e a medida de tamanho de grãos, devendo essa relação ser inferior ao estabelecido por um dos diversos critérios disponíveis na literatura. Na Tabela 2.2, Palmeira (2018) reúne alguns dos critérios de retenção encontrados na literatura.

Tabela 2.2: Alguns critérios de retenção encontrados na literatura (Palmeira, 2018)

| Referência | Critério | Comentários |
|---|--|--|
| AASHTO (1986) | $O_{95} < 0,59 \text{ mm}$ | Se 50% dos grãos de solo $\leq 0,074 \text{ mm}$. |
| | $O_{95} < 0,30 \text{ mm}$ | Se 50% dos grãos de solo $> 0,074 \text{ mm}$. Sem limitações no tipo de geotêxtil. |
| Giroud (1982) | $O_{95}/D_{50} < C_u'$ | Se $I_D < 35\%$, $1 < C_u' < 3$. |
| | $O_{95}/D_{50} < 9/C_u'$ | Se $I_D < 35\%$, $C_u' > 3$. |
| | $O_{95}/D_{50} < 1,5C_u'$ | Se $35\% < I_D < 65\%$, $1 < C_u' < 3$. |
| | $O_{95}/D_{50} < 13,5/C_u'$ | Se $35\% < I_D < 65\%$, $C_u' > 3$. |
| | $O_{95}/D_{50} < 2C_u'$ | Se $I_D > 65\%$, $1 < C_u' < 3$. |
| | $O_{95}/D_{50} < 18/C_u'$ | Se $I_D > 65\%$, $C_u' > 3$. Admite migração de finos para valores altos de C_u . |
| FHWA - Christopher & Holtz (1985) | $O_{95}/D_{85} \leq 1-2$ | Depende do tipo de solo e do valor de C_u . |
| | $O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou $O_{50}/D_{85} \leq 0,5$ | Fluxo dinâmico, pulsante ou cíclico se o solo pode se mover abaixo do geotêxtil. |
| Fischer, Christopher & Holtz (1990) | $O_{50}/D_{85} \leq 0,8$ | Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, depende do valor de C_u . |
| | $O_{95}/D_{15} \leq 1,8-7,0$ | |
| | $O_{50}/D_{50} \leq 0,8-2,0$ | |
| UK DTp - Murray & McGown (1992 apud Corbet, 1993) | $O_{90}/D_{90} = 1$ a 3 | Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos. Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2 \text{ mm}$) - critério alternativo. |
| | $O_{90}/D_{90} < 1$ a 3 | |
| | $O_{90}/D_{50} < 1,8$ a 6 | Solos com $5 < C_u < 10$, não tecidos espessos ($t_{GT} > 2 \text{ mm}$) - critério alternativo. |
| Fannin, Vaid & Shi (1994) | $O_f/D_{85} < 1,5$ e $O_f/D_{50} < 1,8$ | Não tecidos, $1 < C_u < 2$. |
| | $O_f/D_{85} < 0,2$; $O_f/D_{50} < 2,0$ e | Não tecidos, $3 < C_u < 7$. |
| | $O_f/D_{15} < 4,0$ | |
| Bhatia & Huang (1995) | $O_{95}/D_{85} < 0,65-0,05C_C$ | $n < 60\%$ e $C_C > 7$. |
| | $O_{95}/D_{85} < 2,71-0,36C_C$ | $n < 60\%$ e $C_C < 7$. |
| | $O_{95} < D_{85}$ | $n < 60\%$. |
| Lafleur (1999) | $O_f/D_1 < 1$ | Solos estáveis ($C_u \geq 6$ e $D_1 = D_{85}$ nesse caso), solos com $C_u > 6$, mas com curva granulométrica linear ($D_1 = D_{50}$ nesse caso), solos descontínuos ($C_u > 6$) internamente instáveis ($D_1 = D_G$) e solos com $C_u > 6$ com curva granulométrica com concavidade voltada para cima e internamente estáveis ($D_1 = D_{30}$). |

Tabela 2.2 cont.: Alguns critérios de retenção encontrados na literatura (Palmeira, 2018)

| | | |
|----------------|-------------------|---|
| Lafleur (1999) | $1 < O_f/D_1 < 5$ | Solos instáveis com $D_1 = D_{30}$ para solos descontínuos internamente instáveis e para solos internamente instáveis com curvas granulométricas com concavidades voltadas para cima (risco de migração de finos). Critério desenvolvido para solos não coesivos. |
|----------------|-------------------|---|

2.6.2. Critério de permeabilidade

Para evitar perdas de carga significativas, a permeabilidade inicial do filtro deve ser igual ou superior a do solo, o que é uma vantagem na maioria dos geotêxteis já que, devido à sua porosidade e pequena espessura, sua contribuição para a perda de carga do sistema geralmente é muito pequena. Alguns critérios de permeabilidade são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Alguns critérios de permeabilidade encontrados na literatura (Palmeira, 2018)

| Referência | Critério | Comentários |
|--|---------------------------------------|--|
| Calhoun (1972), Schoeber & Teindl (1979), Wates (1980), Giroud (1982), Carroll (1983) e Christopher & Holtz (1985) | $k_{GT} > k_s$ | Fluxo estacionário em aplicações não críticas e condições de solo não severas. |
| Carroll (1983) e Christopher & Holtz (1985) | $k_{GT} > 10k_s$ | Condições críticas e condições severas hidráulicas e de solo. |
| Christopher & Holtz (1985) | $k_{GT} > 100k_s$ | Quando houver risco de colmatação biológica. |
| Departamento de Transportes do Reino Unido - Corbet (1993) | $k_{GT} > 10k_s$ $k_{GT} > 100k_s$ | Para geotêxteis tecidos e não tecidos ($t_{GT} < 2$ mm). Para não tecidos espessos ($t_{GT} > 2$ mm). |
| Lafleur (1999) | $k_{GT} > 20k_s$ | |

2.6.3. Critério anticolmatação

O critério anticolmatação garante que o filtro não apresentará nenhum dos três mecanismos de colmatação: cegamento, bloqueamento e obstrução dos poros (Fig. 2.9).

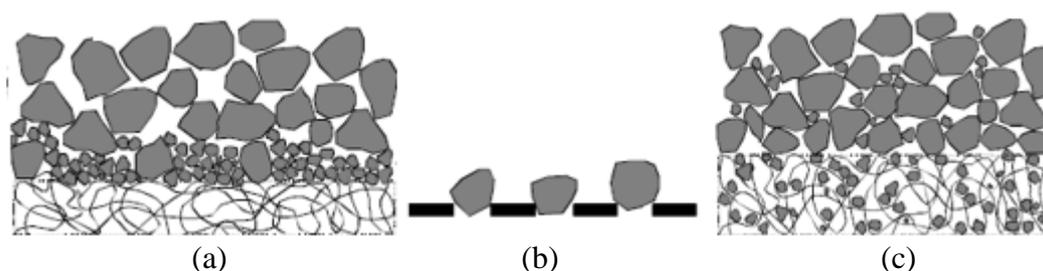


Figura 2.9: Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis: (a) cegamento; (b) bloqueamento; (c) obstrução interna (Palmeira, 2017)

A metodologia de Christopher & Holtz (1985) estabelece que para situações menos críticas e menos severas deve-se adotar uma abertura de filtração característica (O_{95}) maior ou igual a três vezes o diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passando (D_{15}) quando o coeficiente de uniformidade do solo (C_u) for maior que 3. Quando for inferior a este valor, deve-se selecionar o geotêxtil com o maior valor de O_{95} que atenda ao critério de retenção. Em situações críticas e/ou severas, recomenda-se a realização de ensaios de filtração utilizando os solos e as condições de campo. A Tabela 2.4 apresenta os itens a serem levados em consideração para classificação de severidade e natureza crítica de uma aplicação.

2.6.4. Critério de sobrevivência e durabilidade

Esse critério garante que o filtro possui propriedades mecânicas suficientes para resistir a esforços durante o manuseio, instalação, execução e vida útil da obra. Christopher & Fischer (1992) apontam as principais propriedades que os filtros geotêxteis devem apresentar, sendo elas a resistência a tração, deformação e resistência ao puncionamento e degradações por radiação ultravioletas e químicas. Os valores mínimos sugeridos são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.4: Recomendações para a avaliação da natureza crítica e severidade (Carroll, 1983 *apud* Palmeira, 2018)

| Natureza crítica ou não crítica da aplicação | | |
|---|---|----------------------------------|
| Item | Condição crítica | Condição não crítica |
| 1. Risco de perda de vida e/ou dano estrutural devido à falha do dreno | Alto | Nenhum |
| 2. Custo de reparo <i>versus</i> custo de instalação do dreno | Muito maior | Igual ou menor |
| 3. Evidência de colmatção do dreno antes de potencial de falha catastrófica | Nenhuma | Sim |
| Grau de severidade da aplicação | | |
| Item | Condição severa | Condição não severa |
| 1. Solo a ser drenado | Solos descontínuos, sujeitos a <i>piping</i> ou dispersivos | Solos bem graduados ou uniformes |
| 2. Gradiente hidráulico | Alto | Baixo |
| 3. Condições de fluxo | Dinâmico, cíclico ou pulsos | Fluxo permanente |

Tabela 2.5: Requisitos do critério de sobrevivência (Christopher & Fischer, 1992 *apud* AASHTO, 1986)

| Propriedade | Classe A | Classe B | Metodologia de ensaio |
|---|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Resistência a tração tipo <i>grab</i> (N) | 800 | 356 | ASTM D4632 |
| Alongamento (%) | na | na | ASTM D4633 |
| Resistência da costura (N) | 710 | 310 | ASTM D4634 |
| Resistência à perfuração (N) | 356 | 110 | ASTM D4833 |
| Resistência ao estouro (kPa) | 2000 | 896 | ASTM D3787 |
| Resistência ao rasgo trapezoidal (N) | 220 | 130 | ASTM D4533 |
| Degradação ultravioleta | 50% da resistência retida após 150 h | | ASTM D4355 |

Classe A: casos mais severos que os da Classe B.

Classe B: aplicações em casos onde o geotêxtil não estará em contato com superfícies pontiagudas.

2.7. Determinação de características de filtração

Como visto nas Tabelas 2.2 a 2.5, para atender os critérios de projeto de filtros geotêxteis, algumas propriedades são requeridas para os geossintéticos. Para isso, foram

desenvolvidos ensaios que fornecem os dados solicitados pelos critérios para o dimensionamento.

Os critérios existentes de anticolmatação são geralmente baseados em: ensaios de filtração de solo/geotêxtil; medições de porosidade de geotêxtil (Christopher & Holtz, 1985); ou nas relações entre um tamanho de poro característico do geotêxtil, como O_{95} , O_{90} , O_{50} ou O_{15} (Christopher & Holtz 1985; Fischer et al. 1990) e a distribuição granulométrica do solo protegido. O potencial de colmatação de um geotêxtil pode ser avaliado por ensaios de desempenho, como o Ensaio de Filtração de Longa Duração (Koerner & Ko, 1982), o Ensaio de Razão entre Gradientes (ASTM D5101) ou o Ensaio de Condutividade Hidráulica (ASTM D5567). Esses ensaios de desempenho geralmente são pouco realizados por possuir um alto custo caros e fornecem apenas informações para um sistema específico de solo/geotêxtil.

Já os ensaios índice têm como objetivo determinar as propriedades filtrantes dos geotêxteis independente do solo de base, tensões da obra e condições ambientais, avaliando a abertura de filtração e, a depender do método, a distribuição das restrições; esses ensaios são considerados de curta duração quando comparados com os ensaios de desempenho (Melo, 2018).

Os valores de tamanho dos poros obtidos experimentalmente dependem da técnica utilizada para a sua medição. Diversas técnicas foram desenvolvidas: métodos indiretos, como peneiramento a seco (Calhoun, 1972), peneiramento hidrodinâmico (Fayoux, 1977) e peneiramento úmido (Saathoff & Kohlhase, 1986); métodos diretos, tais como, análise de imagens (Rollin et al. 1977), porosimetria por intrusão de mercúrio (Prapaharan et al. 1989) e o método do ponto de bolha (Bhatia & Smith, 1995); e modelos teóricos ou semi-empíricos; no entanto, nenhum método foi universalmente aceito (Bhatia & Smith, 1996a).

2.7.1. Modelo teórico

O modelo teórico ou analítico utiliza um modelo de porometria onde as fibras e filamentos são empilhados em planos elementares para se prever, analítica ou probabilisticamente, a distribuição do tamanho dos poros (Rawal, 2010).

Giroud (1996) propôs uma metodologia matemática para estimar a abertura de filtração de um geotêxtil não tecido por meio da expressão a seguir.

$$\frac{O_f}{d_f} \approx \frac{1}{\sqrt{1-n}} - 1 + \frac{\xi n}{(1-n)t_{GT}/d_f} \quad (2.1)$$

Onde O_f é a abertura máxima de filtração do geotêxtil; d_f é o diâmetro do filamento do geotêxtil; t_{GT} é a espessura do geotêxtil; n é a porosidade do geotêxtil; e ξ é um parâmetro empírico.

Elsharief & Lovell (1996) utilizaram uma abordagem probabilística baseada na distribuição de dimensões dos poros, espessura e porosidade do geotêxtil para prever a espessura requerida de um geotêxtil que retenha um certo diâmetro de partícula. Faure et al. (1989) utilizaram uma abordagem semelhante. Eles assumiram o geotêxtil como uma pilha de malhas com membros retilíneos lançados aleatoriamente no plano da camada. Os autores afirmam que para aplicações sob condições normais, o grau de confiabilidade é da ordem de 80%.

2.7.2. Peneiramento

O peneiramento é uma técnica indireta de obtenção da curva de distribuição do tamanho dos poros, podendo ser seco, úmido ou hidrodinâmico. Desse ensaio obtêm-se o valor da abertura de filtração do geotêxtil a partir da análise granulométrica do solo que passou pelo geotêxtil.

O método de peneiramento a seco foi desenvolvido como resultado do trabalho realizado para desenvolver critérios de projeto e especificações de aceitação para filtro sintético em aplicações de filtração (Calhoun, 1972). O método consiste em peneirar partículas de areia uniforme arredondadas através de um geotêxtil para determinar o tamanho das partículas passantes pelo geotêxtil quando 5%, em peso, tivesse sido peneirado. Esta fração foi definida como o *Equivalent Opening Size* (EOS) ou O_{95} do geotêxtil. Devido às dificuldades em especificar partículas de areia para o ensaio, o método de peneiramento a seco tornou-se padronizado com esferas de vidro (Bhatia & Smith, 1996b). O método padronizado é conhecido como o método de *Apparent Opening Size* (AOS) (ASTM D4751). Na Fig. 2.10 é apresentado um resultado típico desse ensaio.

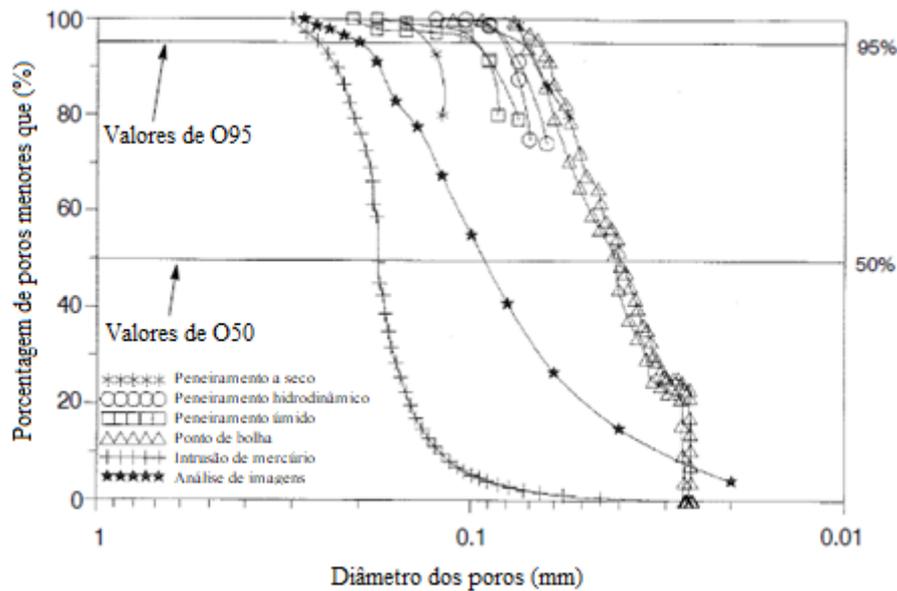


Figura 2.10: Resultado típico do ensaio de peneiramento a seco com boa repetibilidade e realizado em amostra de geotêxtil não tecido (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996b)

O método de peneiramento hidrodinâmico é baseado na filtração hidrodinâmica (Fayoux 1977), onde misturas de esferas de vidro, com tamanho de partículas conhecidos, são peneiradas através de geotêxteis alternando o fluxo de água, que ocorre como resultado da imersão e emersão repetidas dos geotêxteis em água. O peneiramento hidrodinâmico também pode ser usado para determinar o O_{95} de um geotêxtil; no entanto, para este ensaio, o valor é conhecido como *Filtration Opening Size* (FOS) (Bhatia & Smith, 1996b).

O método de peneiramento úmido é semelhante ao método de peneiramento a seco. As principais diferenças são: um spray contínuo de água é aplicado às partículas e ao geotêxtil durante a agitação; e misturas de partículas são usadas como partículas de teste em vez de frações. O pulverizador contínuo de água reduz as condições eletrostáticas associadas às esferas de vidro. O uso de misturadores de partículas reduz o tempo necessário para realizar este ensaio. Vários tamanhos de amostra, materiais de peneiramento, massa de partículas e características de vibração podem ser usados no método de peneiramento úmido (Bhatia & Smith, 1996b).

2.7.3. Análise de imagens

A análise de imagens é uma técnica utilizada para a medição direta do tamanho dos poros em um plano de um geotêxtil. A distribuição do tamanho dos poros de lâminas de

geotêxtil não tecido impregnado com resina e espessura superior a 1,5 mm pode ser obtida com um analisador de imagens conectado a um microscópio e um computador (Rollin et al., 1977; Masounave et al., 1980; Gourc, 1982; Bhatia et al., 1993; Elsharief e Lovell, 1996). Porém, esse ensaio, além do custo financeiro, não fornece a forma do canal do fluxo, nem as dimensões das constrições (Palmeira, 2018).

2.7.4. Intrusão de mercúrio

Esse método é baseado na teoria da equação de Washburn, que relaciona a pressão necessária para forçar um fluido não molhante (mercúrio) através dos poros de um geotêxtil, preenchendo as aberturas de poros com mercúrio. Essa aplicação só é possível porque o mercúrio não entra nos poros por ação capilar; logo, uma relação pode ser encontrada entre o tamanho dos poros e a pressão aplicada, determinando as propriedades de filtração do geotêxtil. A partir disso, o volume do poro e a distribuição do volume de poros de um geotêxtil podem ser determinados. Entretanto, na análise dos resultados, os poros são considerados cilíndricos. Se existirem poros que só podem ser alcançados através de gargantas mais estreitas, o volume que corresponde ao espaço real dos poros é incorretamente atribuído aos raios das gargantas (Bhatia & Smith, 1996b). A Fig. 2.11 apresenta um resultado típico desse ensaio.

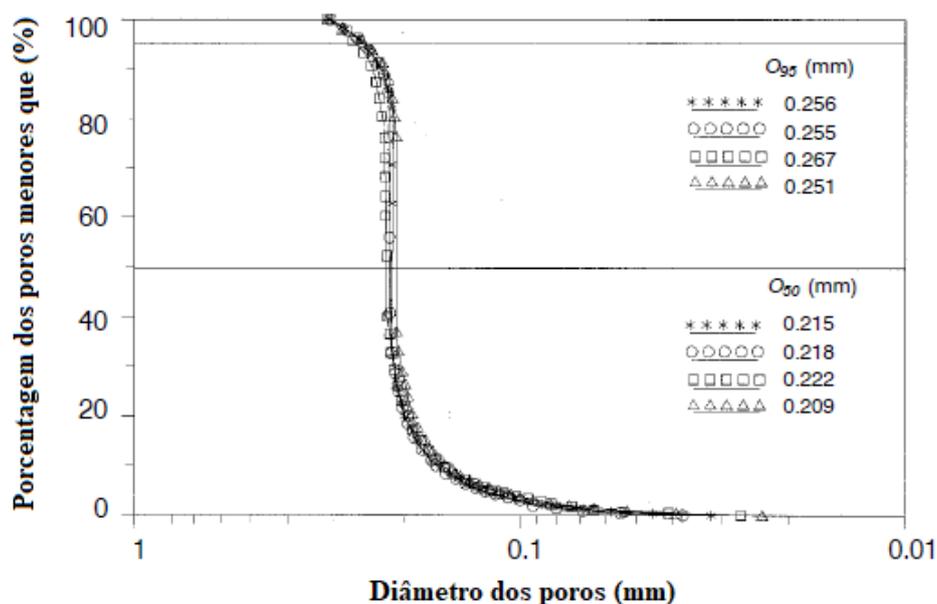


Figura 2.11: Resultado típico do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio com boa repetibilidade e realizado em amostra de geotêxtil não tecido de gramatura 311 g/m² (MODIFICADO de Bhatia & Smith, 1996b)

2.7.5. Ensaio de Ponto de Bolha (*Bubble point test, BBP*)

Esse ensaio é baseado no princípio de que um fluido molhante é contido nos poros por ação capilar e tensão superficial, e a pressão necessária para forçar a saída do fluido por esses poros é uma função do diâmetro dos poros. Ao geotêxtil saturado impõe-se uma pressão de ar. A uma pressão crítica, a primeira bolha de ar passará através da maior restrição no geotêxtil, ou seja, o ar irá passar por um poro quando a pressão aplicada nele exceder a atração capilar do fluido no poro. Com base na teoria do fluxo capilar, o diâmetro do maior poro pode ser calculado. Comparando-se as taxas de fluxo de ar no geotêxtil nos estados seco e saturado para uma mesma pressão, a porcentagem de poros maiores ou iguais a um determinado valor pode ser calculada a partir da relação pressão-diâmetro do poro (ASTM, 2016).

Existem métodos de ensaio padrão para determinar o O_{95} (peneiramento a seco e peneiramento hidrodinâmico) e o O_{90} (peneiramento a úmido) de um geotêxtil. No entanto, esses métodos fornecem pouca ou nenhuma informação sobre os tamanhos de poros mais finos de um geotêxtil, como o O_{50} e o O_{15} (Bhatia & Smith, 1996b). Porém, o ensaio BBP permite encontrar a curva de distribuição de todos os valores de abertura de poros. Além disso, o ensaio de BBP apresenta as seguintes vantagens em comparação com outras técnicas: ele é rápido de executar, simula o fluxo de fluido nos canais de fluxo do geotêxtil e seus resultados podem ser repetidos (Fischer et al. 1996).

A metodologia de ensaio de BBP fornece dois gráficos importantes. O primeiro é o de vazão de ar de saída *versus* pressão de ar de entrada (Fig. 2.12). O segundo é a curva de distribuição dos poros (Fig. 2.13), de onde são extraídos os valores de abertura de filtração.

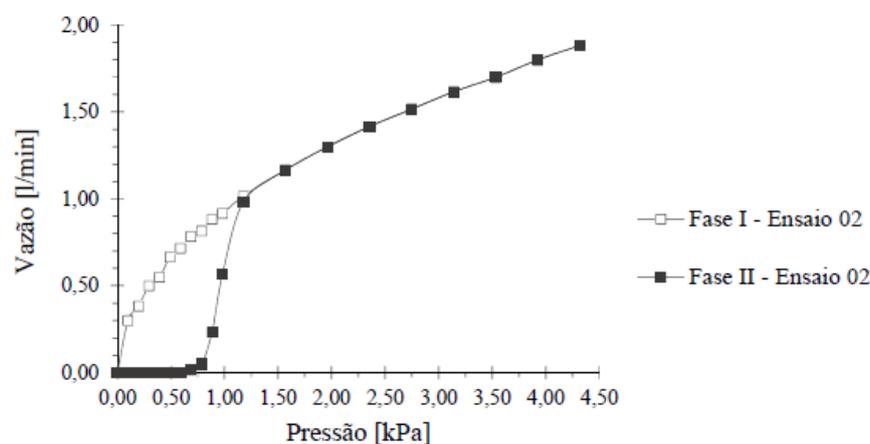


Figura 2.12: Vazão de ar versus pressão aplicada – Calibração com tela metálica #170 (Melo, 2018)

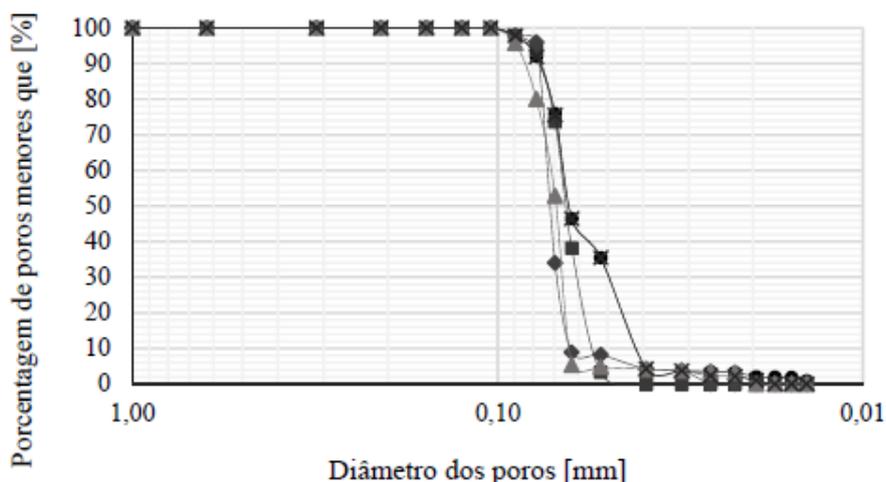


Figura 2.13: Curvas de distribuição de poros de cinco telas metálicas #170 (Melo, 2018)

2.8. Confinamento dos filtros de GTN

No campo o geotêxtil está sujeito a tensão confinante que pode influenciar as dimensões e formas dos poros e, conseqüentemente, seu comportamento de filtração (Palmeira & Fannin, 1998).

Exceto sob tensões muito baixas, os critérios de filtro atuais não reproduzem com precisão as condições que um filtro geotêxtil pode encontrar no campo (Palmeira et al. 2012). Além de outros fatores, o nível de tensão pode influenciar a capacidade de retenção e as condições de colmatação do filtro (Heerten, 1982; Faure et al. 1999; Gardoni e Palmeira, 2002; Palmeira e Fannin, 2002; Palmeira et al. 2005, 2010).

Os resultados de ensaios de filtração sob confinamento (Gourc, 1982; Faure, 1988; Fischer et al. 1996; Palmeira et al. 1996; Palmeira & Gardoni, 2000; Gardoni e Palmeira 2002; Palmeira et al. 2005; Palmeira et al. 2010; Koerner & Koerner, 2015; Moraci et al. 2016; Palmeira & Trejos Galvis, 2016) mostraram que o tamanho das partículas do solo capazes de passar pelo filtro geotêxtil pode ser reduzido significativamente devido ao confinamento. Isso acontece, porque o filtro apresentará uma maior capacidade de retenção quando confinado no solo.

2.8.1. Alguns estudos recentes

Palmeira et al. (2012) utilizaram geotêxteis não tecidos em ensaios de Razão entre Gradientes com modificações para o acomodamento de uma camada subjacente de esferas de

aço e cascalho com aplicação de cargas de até 2000 kPa. O objetivo era examinar as deformações nos espaços vazios entre uma partícula e outra, já que esse tipo de fenômeno pode causar danos físicos ao material. O estudo mostrou que para um mesmo arranjo e diâmetros similares, as deformações entre vazios com cascalho como material subjacente foram até 71% superiores aos obtidos com esferas de aço. Observou-se também que os orifícios deixados pelas agulhas durante o processo de fabricação por *needle-punching* podem controlar o tamanho da maior partícula de solo de base capaz de canalizar através de um filtro geotêxtil não tecido.

Palmeira & Trejos Galvis (2016) investigaram a variação de tamanho dos poros de geotêxteis não-tecido submetidos a confinamento e colmatação parcial utilizando o ensaio de ponto de bolha (BBP). A análise apontou que o produto dos fatores de redução para contabilizar os efeitos de confinamento e colmatação parcial sobre o valor de O_{95} variou entre 1 e 3, dependendo do geotêxtil, tensão vertical e nível de colmatação parcial. A capacidade de retenção de geotêxteis aumenta devido a reduções de tamanho de abertura causadas pelo confinamento e colmatação parcial. No entanto, as condições para o cegamento do geotêxtil e colmatação interna também são alteradas para condições não consideradas pelos critérios de filtro atuais.

Palmeira et al. (2019) investigaram a influência de esforços de tração uniaxiais e biaxiais, bem como do confinamento, nas características do filtro de geotêxteis não tecidos por meio de ensaios de ponto de bolha (BBP). Assim como trabalhos anteriores (Palmeira et al. 2012; Palmeira & Trejos Galvis, 2016), os autores identificaram uma redução dos poros dos geotêxteis quando submetidos à compressão. O mesmo comportamento foi observado mesmo para amostras submetidas a tração biaxial quando confinadas.

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1. Materiais

3.1.1. Geotêxtil não tecido

Foram utilizados três geotêxteis não tecidos de poliéster (PET) de filamentos contínuos para a avaliação proposta nesse trabalho. A única variação de propriedade das amostras foi em sua gramatura, sendo selecionados os valores de 200, 300 e 500 g/m². As amostras serão identificadas pelos códigos GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀, respectivamente. As informações fornecidas pelo fabricante do material são apresentadas na Tabela 3.1. Essas amostras foram as mesmas utilizadas em trabalhos desenvolvidos no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília por Silva (2014), Trejos Galvis (2016), Moraes Filho (2018) e Melo (2018).

Tabela 3.1: Propriedades dos geotêxteis fornecidas pelo fabricante

| Nome | Geotêxtil | O ₉₅ (mm) | O ₉₀ (mm) | Q (l/s/m ²) | K _n (cm/s) | Ψ (s ⁻¹) |
|--------------------|-----------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| GTN ₂₀₀ | OP-20 | 0,100 | 0,190 | 100 | 0,30 | 2,0 |
| GTN ₃₀₀ | OP-30 | 0,090 | 0,170 | 75 | 0,26 | 1,5 |
| GTN ₅₀₀ | RT-31 | 0,080 | 0,130 | 39 | 0,20 | 0,9 |

Nota: O₉₅ e O₉₀ = aberturas de filtração (ASTM D751), Q = fluxo de água; K_n = permeabilidade normal ao plano (ABNT NBR5223), Ψ = permissividade (ASTM D4491).

Vale ressaltar que os tipos OP-20 e OP-30 de geotêxteis não são mais fabricados com essa nomenclatura pelo fabricante, sendo agora referenciadas de RT-10 e RT-16, respectivamente. Essa nova terminologia atende a uma nova classificação de geotêxteis tendo a sua resistência a tração como fator classificatório e não a gramatura, como anteriormente.

3.1.2. Líquido de saturação

O processo de saturação do ensaio de ponto de bolha (*Bubble Point Test*) exige um líquido de saturação. Seguindo recomendação da ASTM D6767 (2016) e o estudo comparativo

entre etanol e água como líquidos de saturação feito por Silva (2014), escolheu-se utilizar o etanol, que possui uma tensão superficial de 22,1 mN/m a 20 °C. A compra do material foi feita em postos de gasolina e armazenado em um galão próprio para isso e adaptado com uma torneira para facilitar o manuseio do líquido.

3.1.3. Brita

A fim de se avaliar a influência do material subjacente ao filtro na sua abertura de filtração, escolheu-se utilizar a brita. Devido às limitações de tamanho da célula do *Bubble Point Test* (BBP), escolheu-se trabalhar com a menor brita disponível no mercado, a brita 0. O material foi adquirido em uma loja de construções de Brasília-DF (Fig. 3.1).



Figura 3.1: Brita utilizada no ensaio de ponto de bolha (BBP)

Para a caracterização da brita utilizada, foram feitos dois ensaios, o de granulometria e o de densidade dos grãos.

Visualmente foi possível identificar que a brita possuía presença de finos, por esse motivo foi feita a granulometria grossa e fina especificada pela ABNT NBR 7181/2016. Para o ensaio, a brita foi seca ao ar livre no laboratório com auxílio de lâmpadas e, em seguida, foi pesada uma amostra de 500g. Os resultados do ensaio de granulometria é apresentado na Fig. 3.2.

A célula do ensaio de ponto de bolha (BBP) da Universidade de Brasília (UnB) não comporta a presença de finos inferiores a 1 mm, visto que eles podem causar o entupimento dos furos do prato de compressão da célula. Além disso, partículas pequenas poderiam provocar a colmatação do geotêxtil, o que não é objeto de estudo deste trabalho. Por esses

motivos, foi necessário delimitar uma faixa de trabalho. Para isso, foram utilizadas as peneiras com aberturas de 1,2 e 9,5mm, afim de garantir que nenhuma partícula fina estivesse presente na amostra, foi feita a lavagem da brita nas peneiras mencionadas, seguida de um processo de secagem também ao ar livre.

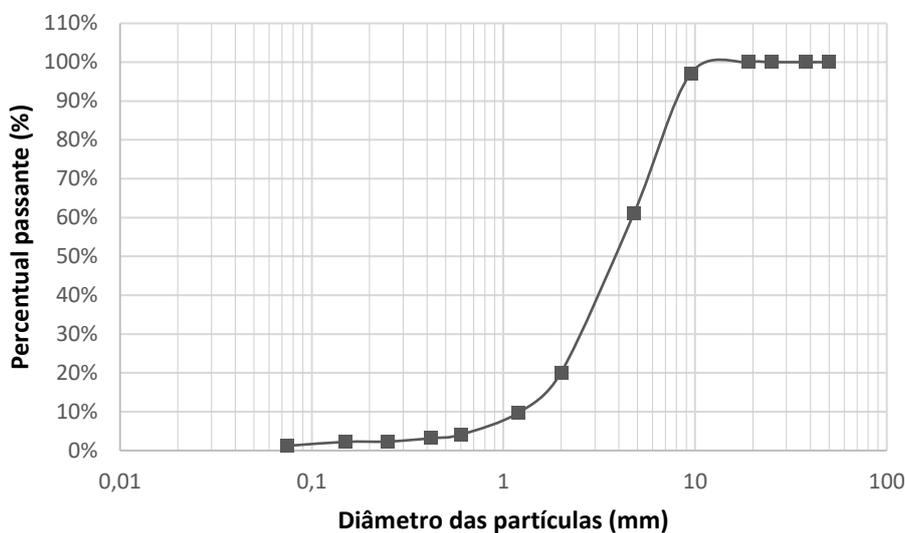


Figura 3.2: Curva granulométrica da brita utilizada nos ensaios

O ensaio de massa específica dos grãos foi feito com o pentapicnômetro digital do laboratório, seguindo a ABNT NBR 6458/2016. O ensaio foi repetido 5 vezes e obteve-se como resultado um valor médio de 2,752 g/cm³ apresentado na Tab. 3.2.

Tabela 3.2: Massa específica dos grãos da brita utilizada nos ensaios

| Amostra | δ_m (g/cm ³) |
|---------|---------------------------------|
| 1 | 2,754 |
| 2 | 2,751 |
| 3 | 2,751 |
| 4 | 2,750 |
| 5 | 2,753 |
| Média | 2,752 |

3.2. Equipamentos

3.2.1. Fluxômetro - Fluke 922

O ensaio de ponto de bolha (BBP) necessita de duas aferições de fluxo de ar, uma de entrada e outra de saída. Para isso, foram necessários dois fluxômetros. Um deles foi

posicionado no sistema da tubulação de entrada, e era responsável por aferir a pressão de entrada de ar, e o outro foi posicionado na saída e era responsável pela medição da vazão de saída de ar do sistema. Ambos os fluxômetros eram da marca Fluke, modelo 922 (Fig. 3.3), o qual permitia também a aferição de temperaturas.



Figura 3.3: Fluxômetros utilizados no ensaio de ponto de bolha (BBP)

3.2.2. Conjunto de equipamentos do *Bubble Point Test*

O ensaio escolhido nesse trabalho para a determinação da abertura de filtração do geotêxtil foi o *Bubble Point Test*. Ele foi realizado seguindo as recomendações preconizadas pela norma ASTM D6767-16: “*Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillar Flow Test*”. O equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília e utilizado por Silva (2014), Trejos Galvis (2016), Moraes Filho (2018) e Melo (2018) é formado pelos componentes mostrados na visão geral do conjunto na Fig. 3.4. O elemento mais importante do ensaio é a sua célula. Uma vista externa da mesma é mostrada na Fig. 3.5 e seu interior é mostrado na Fig. 3.6.

A célula do ensaio de ponto de bolha utilizada neste trabalho não possuía um sistema de vedação interno com o-rings. Por esse motivo, além do jogo de parafusos e porcas da própria célula, foi necessário utilizar uma vedação na lateral da célula. Alguns materiais foram

testados, mas o que apresentou uma melhor performance foi uma fita de silicone de autofusão (Fig. 3.7).

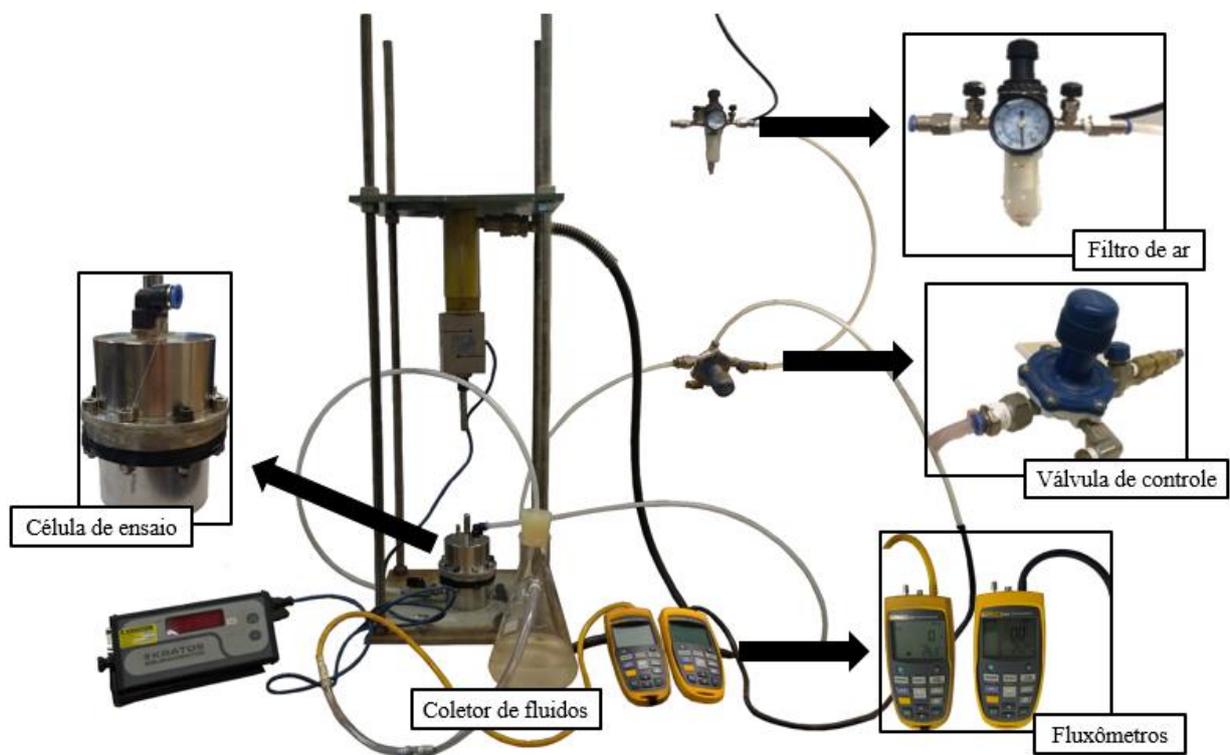


Figura 3.4: Conjunto de equipamentos do ensaio de ponto de bolha da UnB

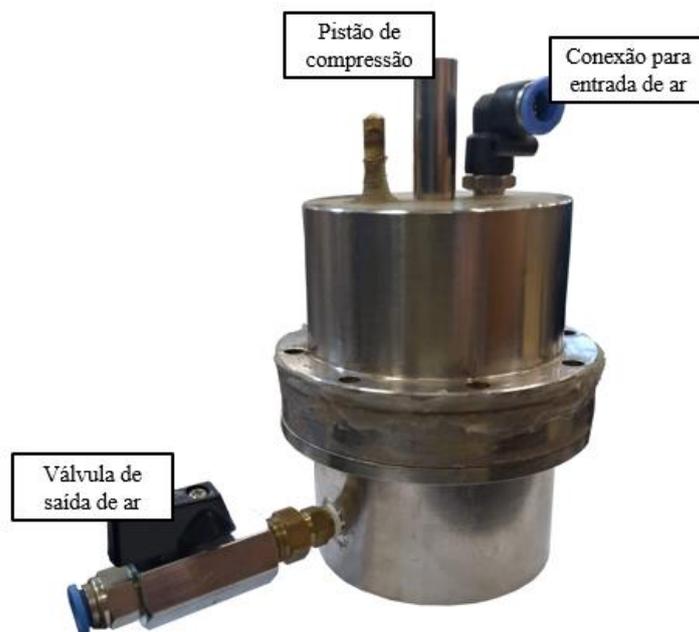


Figura 3.5: Vista externa da célula de ensaio

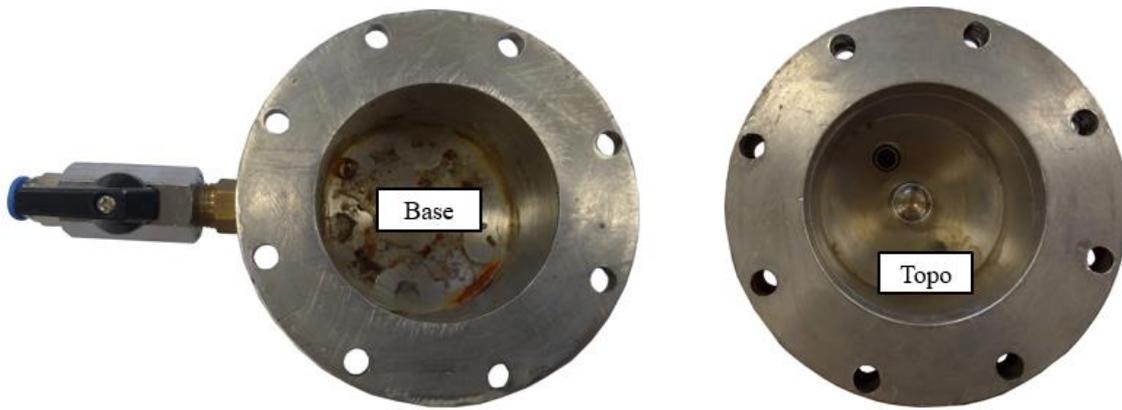


Figura 3.6: Vista interna da célula de ensaio



Figura 3.7: Fita de silicone utilizada para vedar a lateral da célula de ensaio

3.2.3. Sistema de Aplicação de Tensões de Confinamento

O sistema de aplicação de confinamento no espécime de geotêxtil já existia no laboratório e foi utilizada anteriormente por Moraes Filho (2018) e Melo (2018). Esse sistema, apresentado na Fig. 3.8, possui uma estrutura de reação metálica, um cilindro hidráulico fixado no topo da estrutura, uma bomba hidráulica conectada ao cilindro, uma célula de carga fixada no pistão hidráulico e um pendural para aplicação de tensões de confinamento mais baixas. Além disso, no interior da célula, a transmissão do confinamento é feita por um prato metálico perfurado e uma tela metálica (Fig. 3.9).

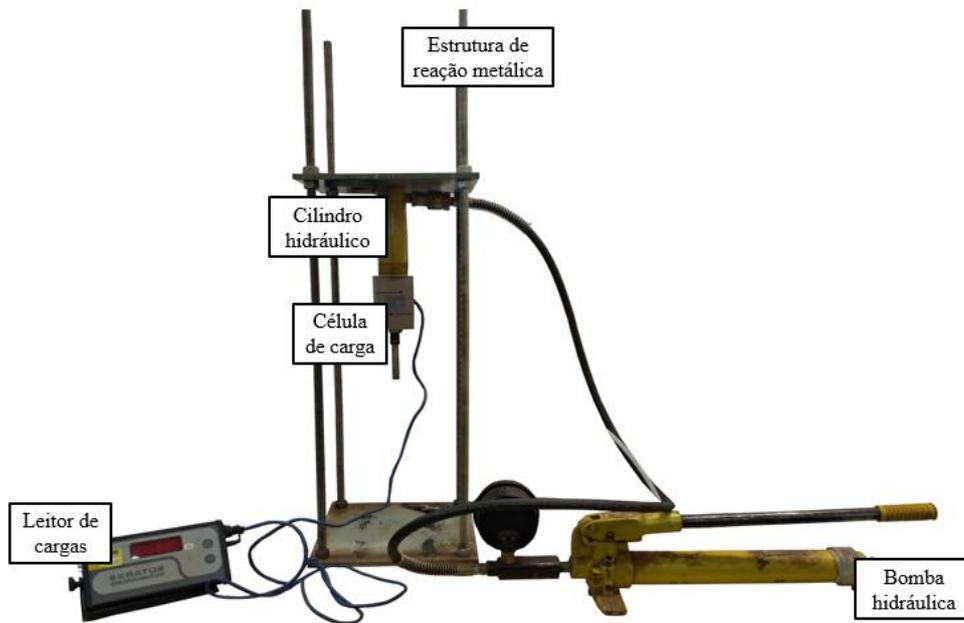


Figura 3.8: Sistema de aplicação de confinamento



Figura 3.9: Prato de transmissão de compressão interno à célula de ensaio

3.2.4. Equipamento de Aquisição de Dados

Como a configuração de ensaio necessária neste trabalho utiliza apenas um tipo de sollicitação, o de compressão, não foi preciso utilizar um sistema de aquisição de dados complexo. Optou-se então por utilizar o leitor digital da KRATOS (Fig. 3.10). O equipamento foi conectado diretamente à célula de carga do conjunto mostrado na Fig. 3.8.



Figura 3.10: Leitor digital de cargas utilizado nos ensaios

4. METODOLOGIA

4.1. Preparação das Amostras

Para a preparação das amostras de geotêxteis não tecidos, foram seguidas as especificações da NBR ISO 9862/2013. As dimensões dos espécimes foram determinadas de acordo com o tamanho da célula de ensaio, que possui 100 mm de diâmetro externo. Sendo assim, para fornecer uma folga, as amostras foram todas de 120 mm por 120 mm.

Os geotêxteis GTN₂₀₀ e GTN₃₀₀ estavam armazenados em rolos e, por esse motivo, foi preciso ignorar sua primeira volta, já que a exposição poderia ter contaminado a manta. Para os três tipos de geotêxtil, os procedimentos seguidos foram os mesmos e são descritas a seguir.

- i. Primeiramente foram cortadas as mantas dos geotêxteis. Devido as dimensões da bancada disponível no laboratório, as mantas foram cortadas com 2,10 m por 1,10 m (Fig. 4.1). Por uma questão de amostragem e número de ensaios, uma única manta foi suficiente para todos os tipos
- ii. Depois de estirada na bancada limpa e seca, a manta era então deixada em repouso por pelo menos 24h.
- iii. Conforme recomendado por norma, foram descartadas pelo menos 100 mm das bordas das mantas. Com as dimensões restantes, foram então verificados o número máximo de amostras que caberiam no espaço restante. Um detalhe importante nessa etapa foi que algumas deformações nas mantas (dobras e frisos, Fig. 4.2) não se desfizeram durante o repouso, precisando assim ser descartadas, o que gerou um número diferente de amostras para cada tipo de geotêxtil. Para o GTN₂₀₀ foi feita uma malha de 14 por 9, o que dariam 126 espécimes, porém um espécime de canto foi perdido, sendo assim, o total foi de 125. Para o GTN₃₀₀ a malha foi de 16 por 9, totalizando 144 espécimes. A malha do GTN₅₀₀ foi de 16 por 8 e, assim como no GTN₂₀₀, uma área de canto foi perdida, totalizando 127 espécimes.

- iv. Com o auxílio de uma régua, uma trena e uma caneta permanente foram traçadas as linhas verticais e horizontais da malha.
- v. Com as marcações feitas, os espécimes foram identificados com um código e depois submetidas ao corte.
- vi. Todos espécimes foram pesados para a determinação da gramatura.



Figura 4.1: Amostragem de uma das mantas utilizadas para corte dos espécimes

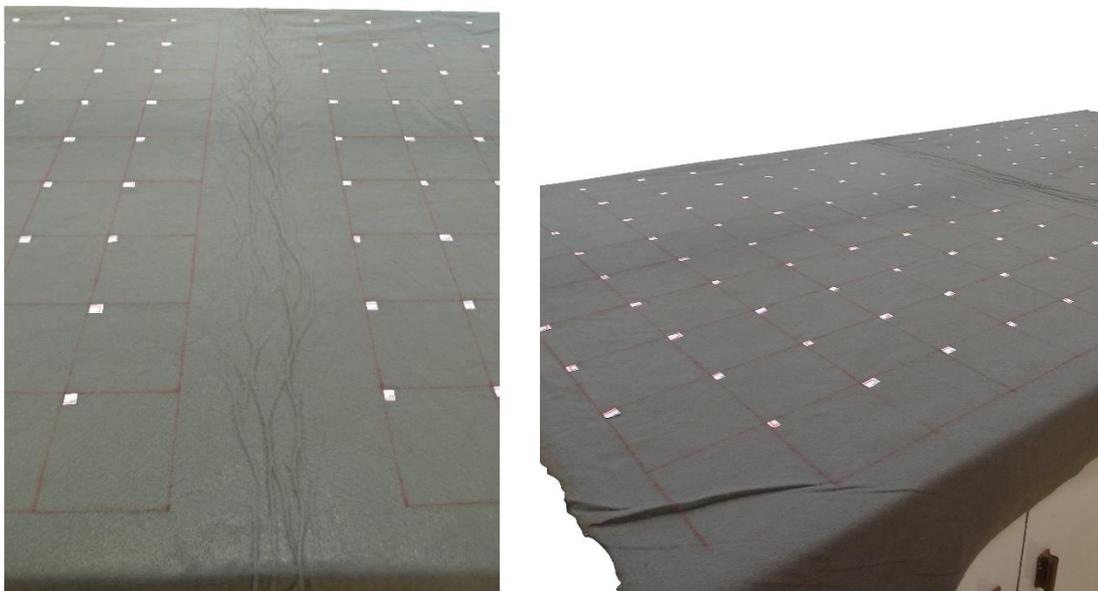


Figura 4.2: Dobras e frisos descartados nas mantas

Para a escolha das amostras a serem ensaiadas, foram desprezadas aquelas com variabilidade da gramatura fora do intervalo de $\pm 10\%$ do valor nominal especificado pelo fabricante.

4.2. Gramatura

Como os espécimes preparados possuíam dimensões definidas e conhecidas, com seus pesos foi então possível calcular suas gramaturas, determinadas pela Eq. 4.1.

$$M_A = m/A \quad (4.1)$$

Onde, M_A é a massa por unidade de área ou gramatura (g/m^2), m é a massa da amostra (g) e A a área das amostras (m^2).

Como mencionado na preparação das amostras, os espécimes que obtiveram gramatura fora de um limite de 10%, para mais ou para menos, foram desconsideradas, visto que suas gramaturas destoavam das estudadas anteriormente. Esse valor limite também foi utilizado por Melo (2018). Com isso, o total de espécimes restantes foi de 70 para o GTN₂₀₀, 107 para o GTN₃₀₀ e 116 para o GTN₅₀₀. A Fig. 4.3 apresenta as médias e desvio padrões dos espécimes restantes de cada tipo de geotêxtil.

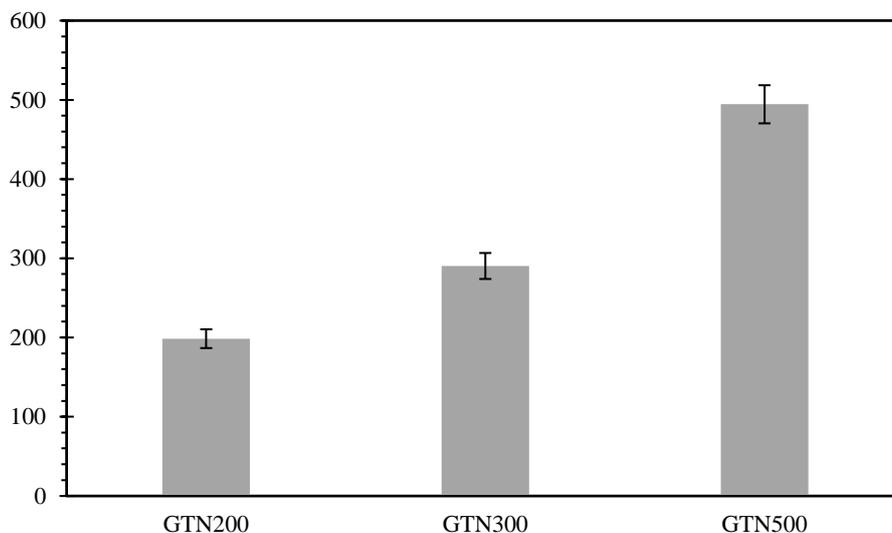


Figura 4.3: Médias e desvios padrão dos espécimes disponíveis para os ensaios

Para a escolha dos espécimes a serem ensaiados, utilizando-se os códigos dos espécimes restantes, foi feito um sorteio aleatório no Excel. A Fig. 4.4 apresenta as médias e desvios padrão dos espécimes nos ensaios deste trabalho.

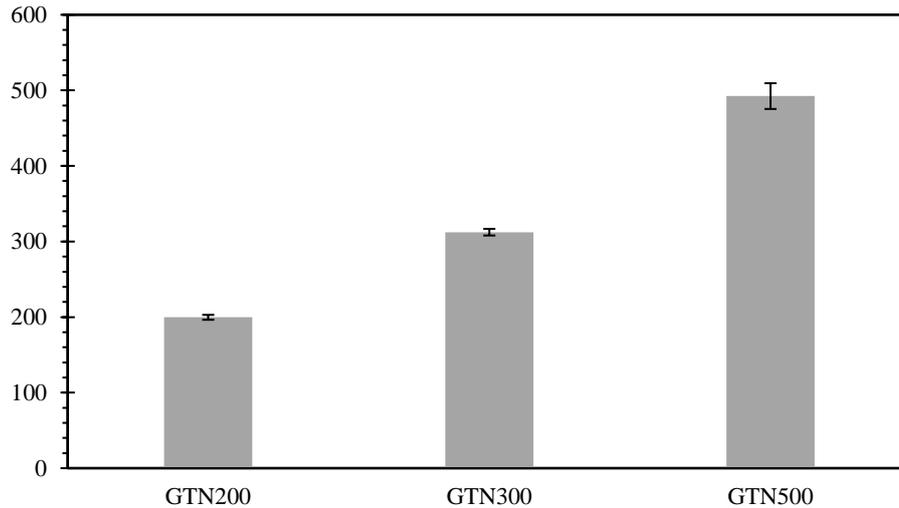


Figura 4.4: Médias e desvios padrões dos espécimes utilizados nos ensaios

4.3. Programa de ensaios

Os ensaios a serem apresentados neste trabalho possuem duas variáveis: o tipo do geotêxtil e a tensão de carregamento. As tensões verticais de confinamento utilizadas foram 0, 10, 100, 400 e 1000 kPa. Além disso, para avaliar a variabilidade do arranjo das britas dentro da célula do BBP, foi efetuada uma triplicata dos ensaios. Todas as variáveis, quando combinadas, totalizaram 45 ensaios, ou seja, 45 curvas de distribuição de poros.

4.4. Calibração do Sistema de Aplicação de Carga

Foi utilizada uma célula de carga, e um leitor a ela acoplado, para a medição da aplicação dos esforços de compressão na célula do ensaio. Para garantir que os valores lidos correspondiam aos valores desejados, foi feita a calibração desse sistema. A célula e o leitor foram levados ao Laboratório da Mecânica da UnB, onde esforços de carregamento e descarregamento foram aplicados, e as leituras registradas. Com esses valores, foi possível então traçar a reta de calibração (Fig. 4.5) com a relação entre as cargas aplicadas e lidas.

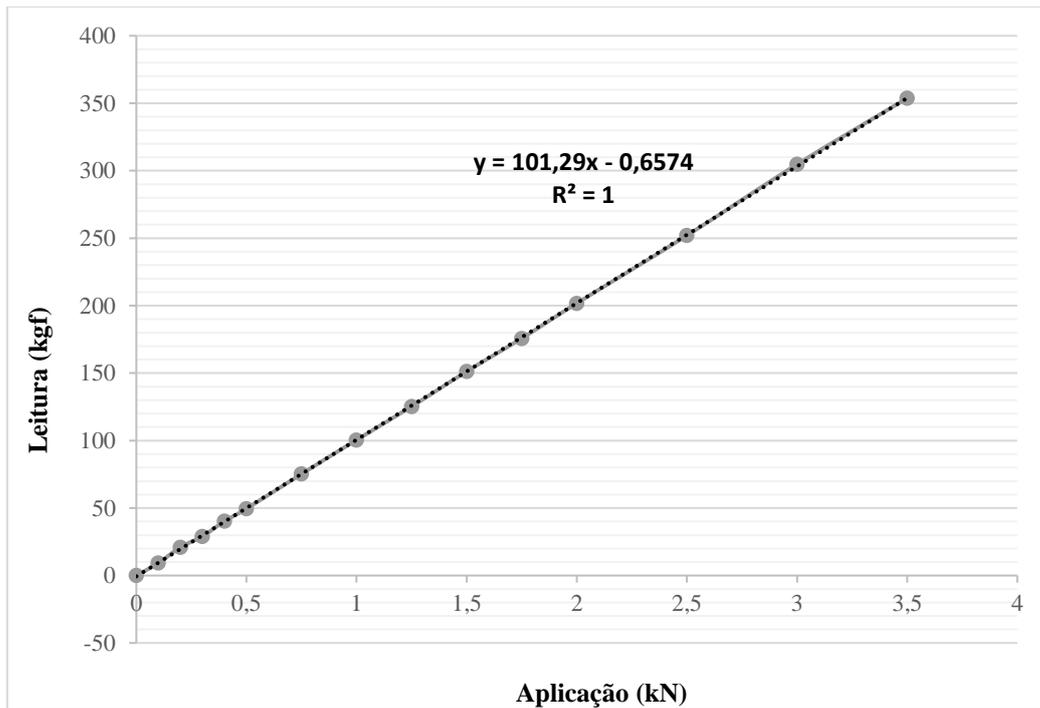


Figura 4.5: Curva força aplicada *versus* leitura do sistema de aplicação de carga

Com a equação da reta apresentada na Fig. 4.5, foi então possível estabelecer os valores a serem lidos no equipamento para cada carga aplicada. Como o leitor só apresenta valores múltiplos de 0,5, os valores a serem aplicados foram de 0; 19,62; 274,68; 1.118,34 e 2805,66 N, que utilizando a área da célula de ensaio, geravam as correspondentes tensões verticais de 0, 10, 100, 400 e 1000 kPa, respectivamente.

4.5. Confinamento do Sistema

O confinamento do conjunto brita, geotêxtil, brita foi feito dentro da célula de ensaio utilizando um prato de compressão e uma tela metálica, conectados com a célula de carga por duas esferas metálicas e um eixo de compressão. A célula de carga estava acoplada a um macaco hidráulico bombeado a óleo. A medida que o macaco era acionado manualmente, o embolo começava a exercer compressão, até que a carga desejada fosse alcançada e o procedimento interrompido para a estabilização da carga.

4.6. Procedimentos para o Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)

O ensaio de ponto de bolha (BBP) possui dois estágios, um seco e outro saturado. Para a fase de saturação, o líquido escolhido sob recomendação da ASTM D6767 foi o etanol. Quanto ao tempo de saturação, Bhatia & Smith (1996b) apontam que 25 minutos é tempo suficiente para a saturação do geotêxtil. Visando uma maior agilidade do ensaio e levando em conta que a presença das britas poderiam dificultar o processo de saturação, alguns ensaios foram feitos para avaliar a aplicabilidade desse tempo à configuração do ensaio. Observou-se que, com a saturação dentro da célula, depois de 30 minutos já era possível garantir a saturação do conjunto. Abaixo são descritas as atividades passo a passo para a realização desse tipo de ensaio.

Estágio 1: Seco

- i. Escolheu-se um dos espécimes de forma aleatória com o auxílio do Excel.
- ii. Cortou-se o espécime no formato e tamanho exato da célula de ensaio.
- iii. Furou-se o espécime nas posições e tamanhos dos 8 parafusos da célula de ensaio.
- iv. Apoiou-se o prato de compressão e uma tela metálica dentro da parte superior da célula com o auxílio de uma esfera metálica.
- v. Colocou-se brita tanto na parte superior como na parte inferior da célula (Fig. 4.6), até que elas atingissem a superfície de contato com o espécime.
- vi. Posicionou-se o espécime entre as partes da célula preenchidas com brita.
- vii. Aparafusou-se o conjunto de 8 parafusos e porcas da célula, garantindo a vedação da célula.
- viii. Vedou-se a lateral da célula utilizando-se uma fita de autofusão hidráulica.
- ix. Posicionou-se a célula na estrutura de reação do ensaio.
- x. Conectaram-se os tubos de entrada e saída de ar, assim como os dois fluxômetros (Fluke 922).
- xi. Registrou-se a temperatura inicial no fluxômetro e verificou-se se eles estavam zerados e nas unidades desejadas.

- xii. Posicionou-se uma câmera para registrar os valores dos fluxômetros.
- xiii. Iniciou-se o ensaio abrindo o registro de entrada de ar comprimido aos poucos até que o valor máximo aferido pelo Fluke 922 de pressão de entrada (40 cmH₂O) fosse atingido.
- xiv. Fechou-se o sistema de aplicação de ar comprimido e registrou-se a temperatura final.
- xv. Registraram-se os valores de pressão e vazão medidos pelos fluxômetros em uma planilha no Excel.
- xvi. Aplicou-se o primeiro nível de tensão utilizando o sistema de confinamento.
- xvii. Repetiram-se os passos xi ao xv.
- xviii. Aplicou-se o nível seguinte de confinamento e repetiram-se os passos xi ao xv até que todos os carregamentos tivessem sido feitos.
- xix. Retirou-se o carregamento aplicado.

Estágio 2: Saturado

- i. Retiraram-se os tubos de entrada e saída de ar.
- ii. Colocou-se o tubo de injeção de etanol no conector de baixo da célula.
- iii. Injetou-se etanol por diferença de carga altimétrica até que o mesmo começasse a sair em um fluxo contínuo no conector de entrada da célula.
- iv. Suspendeu-se o fluxo de etanol.
- v. Esperou-se 15 minutos.
- vi. Repetiram-se os passos iii, iv e v.
- vii. Repetiu-se os passos iii e iv.
- viii. Conectaram-se os tubos de entrada e saída de ar, assim como os dois fluxômetros (Fluke 922).
- ix. Registrou-se a temperatura inicial no fluxômetro e verificou-se se eles estavam zerados e nas unidades desejadas.
- x. Posicionou-se uma câmera para registrar os valores dos fluxômetros.

- xi. Iniciou-se o ensaio abrindo o registro de entrada de ar comprimido aos poucos até que o valor máximo aferido pelo Fluke 922 de pressão de entrada (40 cmH₂O) fosse atingido.
- xii. Fechou-se o sistema de aplicação de ar comprimido e registrou-se a temperatura final.
- xiii. Registrou-se os valores de pressão e vazão medidos pelos fluxômetros em uma planilha no Excel.
- xiv. Aplicou-se o primeiro nível de tensão utilizando o sistema de confinamento.
- xv. Repetiram-se os passos i ao xiii.
- xvi. Aplicou-se o nível seguinte de confinamento e repetiram-se os passos i a xv até que todos os carregamentos tivessem sido feitos.
- xvii. Retirou-se o carregamento aplicado.

Esses procedimentos foram repetidos para todos os ensaios a serem apresentados neste trabalho. Vale ressaltar que apesar do ensaio de ponto de bolha (BBP) ser considerado um ensaio rápido, o tempo total de ensaio, no presente trabalho depende do tempo de montagem e desmontagem da célula de ensaio, além do tempo de saturação de cada ensaio. Para a célula utilizada neste trabalho, o tempo estimado para realizar os procedimentos acima descritos foram em torno de 4 horas e 30 minutos.

4.7. Obtenção da Curva de Distribuição da Dimensão dos Poros

A ASTM D6767 apresenta a formulação que leva ao cálculo do tamanho dos poros (Eq. 4.2). O lado esquerdo é a força resistiva desenvolvida a partir da ação da tensão superficial atuando entre o líquido e o poro; o lado direito é a força motriz desenvolvida a partir da multiplicação da pressão aplicada pela área de constrição.

$$\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \theta = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2 \cdot P \quad (4.2)$$

Onde d é o diâmetro do poro (μm), σ é a tensão superficial do líquido de saturação (mN/m), B é uma constante capilar, θ é o ângulo de contato entre o líquido e o poro do material e P é a pressão (Pa).

Reescrevendo a Eq. 4.2 em função da variável de estudo d , tem-se

$$d = \frac{4 \cdot B \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P} \quad (4.3)$$

O ângulo θ para o caso do etanol como líquido de saturação pode ser considerado nulo. Além disso, a constante capilar B tem valor igual a 0,715. Substituindo esses valores e adicionando uma conversão de unidade para que o valor de d seja fornecido em mm, tem-se.

$$d = \frac{2860 \cdot \sigma}{P} \quad (4.4)$$

Perez et al. (2010) apresenta a tensão superficial do etanol pela Eq. 4.5.

$$\sigma_{etanol} = 0,0244 \cdot e^{-0,0046 \cdot T} \quad (4.5)$$

Onde σ_{etanol} é a tensão superficial do etanol (mN/m) e T é a temperatura (°C).

Logo, a Eq. 4.4 pode ser reescrita para o caso do etanol como fluido de saturação como exposto na Eq. 4.6.

$$d = \frac{69,784 \cdot e^{-0,0046 \cdot T}}{P} \quad (4.6)$$

As curvas de distribuição de dimensões dos poros são definidas pelo diâmetro dos poros, encontrados com a formulação acima, e as porcentagens, obtidas por uma relação entre as vazões do estágio seco e saturado (ASTM D6767):

$$\text{Porcentagem de poros menores que } d = \left(1 - \frac{Vazão_{seca}}{Vazão_{saturada}} \right) \cdot 100\% \quad (4.7)$$

4.8. Calibração e Repetibilidade do Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)

Com o objetivo de garantir o perfeito funcionamento do conjunto do ensaio presente no Laboratório de Geotecnia da UnB, foi feita a calibração do equipamento. Essa avaliação utiliza uma tela metálica de peneira, com abertura conhecida, para validar os resultados obtidos pelo equipamento. A peneira utilizada foi a #170, com abertura padrão de 0,09mm.

Para avaliar a repetibilidade do ensaio, essa calibração com malha metálica foi repetida cinco vezes. Todos os ensaios não possuíam confinamento e nem brita e, foram realizados sob as mesmas condições e procedimentos.

Os resultados obtidos são apresentados abaixo, onde a Fig. 4.6 é a curva que relaciona as pressões de entrada de ar com as vazões de saída e a Fig. 4.7 apresenta as cinco curvas de distribuição dos poros.

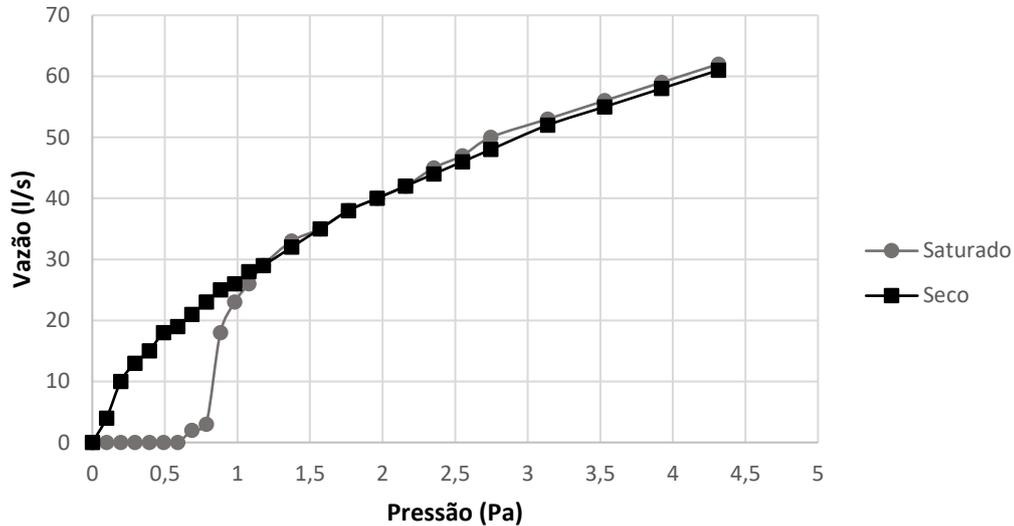


Figura 4.6: Curva de pressão de entrada *versus* vazão de saída da calibração do BBP

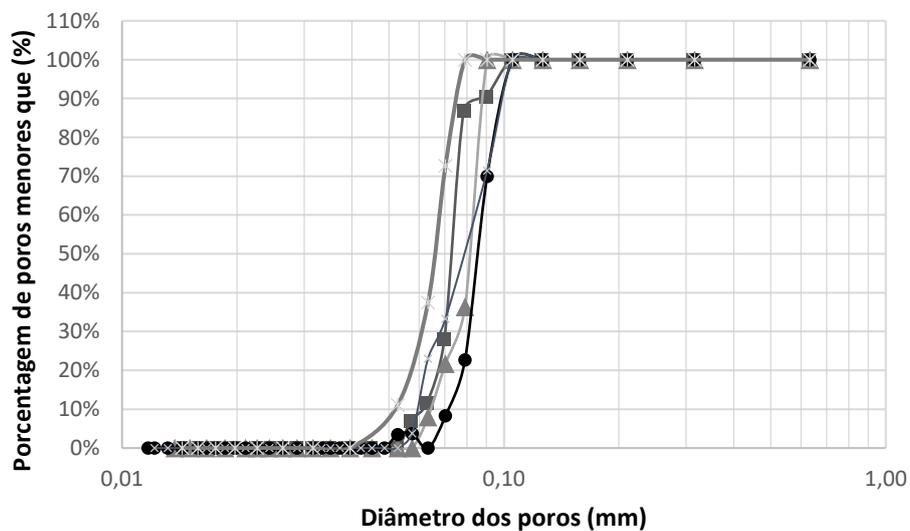


Figura 4.7: Curva de distribuição da dimensão dos poros da peneira #170

As aberturas de poro obtidas na Fig. 4.7 tiveram o valor médio de 0,09mm e um desvio padrão de 0,01mm. Como o valor esperado para a malha metálica #170 era exatamente de 0,09mm, considera-se que o sistema apresenta repetibilidade satisfatória.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentadas as curvas de distribuição de dimensão de poros dos ensaios realizados. Além disso, serão também discutidos estes resultados e seus impactos na metodologia de dimensionamento de filtros geotêxteis não tecidos.

5.1. Condição sem Confinamento

5.1.1. Apresentação dos Resultados

Os primeiros ensaios realizados foram na condição sem confinamento. Esses ensaios foram repetidos algumas vezes até se encontrar a metodologia correta de ensaio descrita no capítulo anterior.

Para cada tipo de geotêxtil foi ensaiada uma triplicata de ensaios nessa condição de referência. A Fig. 5.1 mostra as três curvas para o GTN₂₀₀, e a Tab. 5.1 apresenta os dados de abertura de filtração obtidos pelas curvas para esse tipo de geotêxtil.

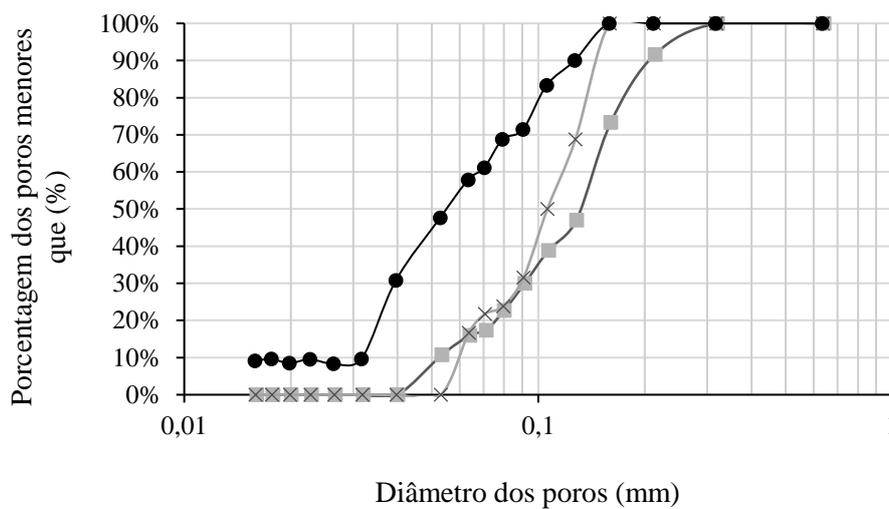


Figura 5.1: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN₂₀₀

Tabela 5.1: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN₂₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,265 | 0,235 | 0,204 | 0,132 | 0,091 | 0,053 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,154 | 0,151 | 0,145 | 0,106 | 0,089 | 0,060 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,149 | 0,14 | 0,128 | 0,055 | 0,039 | 0,032 |
| Desvio Padrão | | 0,066 | 0,052 | 0,040 | 0,039 | 0,029 | 0,015 |
| Média | | 0,189 | 0,175 | 0,159 | 0,098 | 0,073 | 0,048 |

Para o GTN₃₀₀, a Fig. 5.2 apresenta as curvas de distribuição dos poros e a Tab. 5.2 os valores de abertura de filtração obtidos através das curvas.

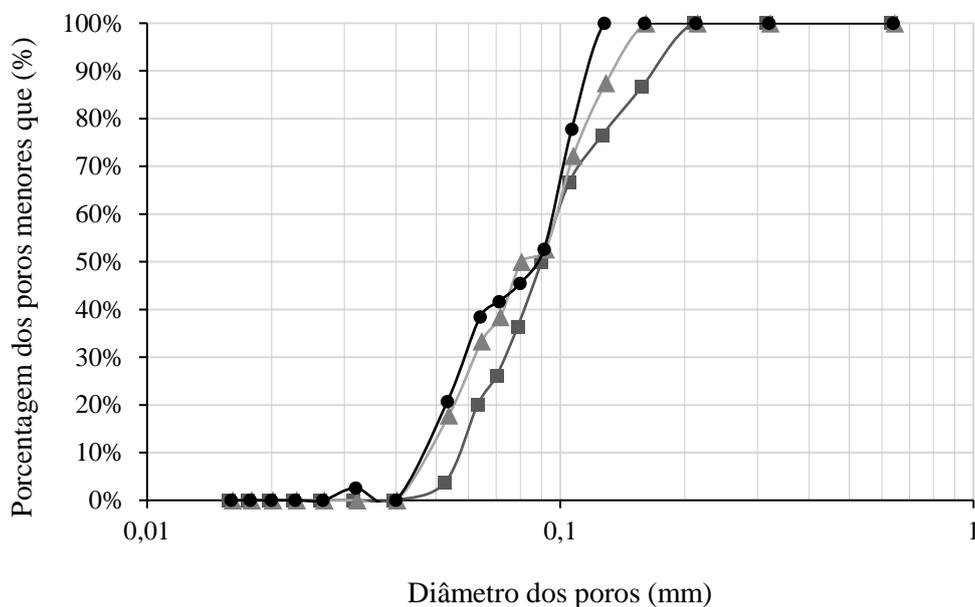


Figura 5.2: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN₃₀₀

Tabela 5.2: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN₃₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,196 | 0,183 | 0,168 | 0,09 | 0,074 | 0,057 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,153 | 0,145 | 0,134 | 0,081 | 0,062 | 0,048 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,124 | 0,12 | 0,115 | 0,089 | 0,059 | 0,047 |
| Desvio Padrão | | 0,036 | 0,032 | 0,027 | 0,005 | 0,008 | 0,006 |
| Média | | 0,158 | 0,149 | 0,139 | 0,087 | 0,065 | 0,051 |

O último geotêxtil ensaiado foi o GTN₅₀₀. A Fig. 5.3 apresenta as curvas e a Tab. 5.3 as aberturas de filtração.

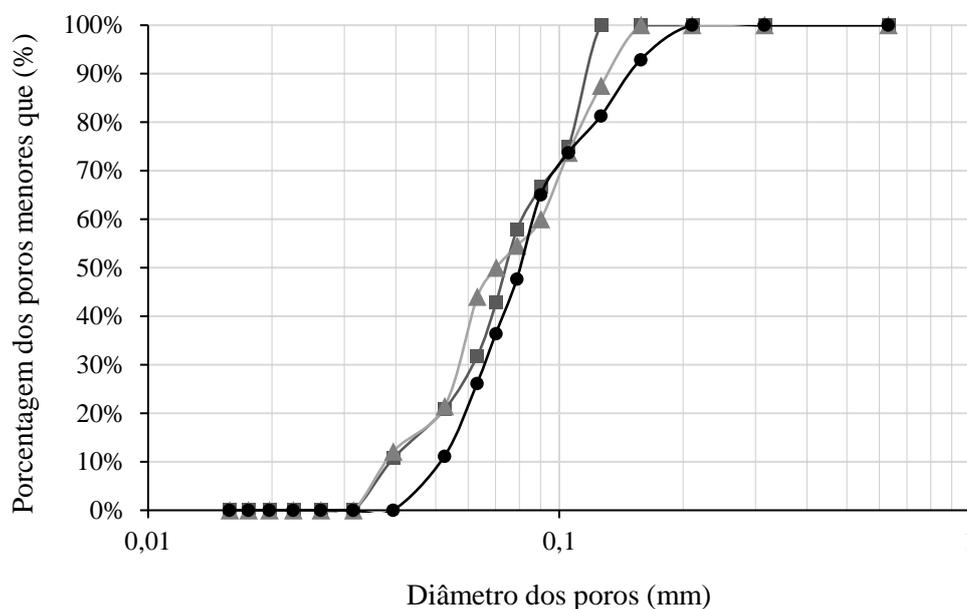


Figura 5.3: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios sem confinamento com o GTN₅₀₀

Tabela 5.3: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios sem confinamento do GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | | | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,123 | 0,12 | 0,116 | 0,074 | 0,062 | 0,039 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,149 | 0,142 | 0,132 | 0,07 | 0,057 | 0,038 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,186 | 0,168 | 0,148 | 0,08 | 0,066 | 0,051 |
| Desvio Padrão | | 0,032 | 0,024 | 0,016 | 0,005 | 0,005 | 0,007 |
| Média | | 0,153 | 0,143 | 0,132 | 0,075 | 0,062 | 0,043 |

Na Tab. 5.4 estão resumidas as médias de aberturas de filtração dos ensaios sem confinamento de todos os tipos de geotêxteis ensaiados.

Tabela 5.4: Médias dos valores de abertura de filtração dos ensaios sem confinamento para o GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | | | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,189 | 0,175 | 0,159 | 0,098 | 0,073 | 0,048 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,158 | 0,149 | 0,139 | 0,087 | 0,065 | 0,051 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,153 | 0,143 | 0,132 | 0,075 | 0,062 | 0,043 |

5.1.2. Intervalo de Confiabilidade

Com o intuito de avaliar a influência da presença das britas nos resultados obtidos com os dados de estudos anteriores (Silva, 2014; Trejos Galvis, 2016; Moraes Filho, 2018; Melo, 2018), escolheu-se traçar os intervalos de confiança (IC) dos valores encontrados anteriormente e analisar como os novos resultados se comportam nesses intervalos. Apesar desses ensaios prévios possuírem semelhanças com os realizados neste trabalho, mesmos geotêxteis, e mesmas condições de carregamento, eles foram realizados por diferentes operadores, equipamentos de leituras de pressão e vazão e células de ensaio. Essas diferenças geram uma menor confiabilidade para os resultados.

O IC é uma ferramenta estatística que permite avaliar se os valores obtidos por uma metodologia se encontram dentro dos valores esperados para esta variável. Ou seja, a aplicação desse conceito nesta pesquisa tem por objetivo traçar o IC e verificar a inclusão dos novos resultados nesse intervalo.

A distribuição t de Student, similar a distribuição normal padrão, mas com caudas mais largas, foi utilizada para determinar os limites inferiores e superiores do intervalo de confiabilidade em virtude do número de dados analisados. Os valores destes limites são apresentados nas Eq. 5.1 e 5.2.

$$\mu_{inferior} = \bar{X} - S \cdot t / \sqrt{n} \quad (5.1)$$

$$\mu_{superior} = \bar{X} + S \cdot t / \sqrt{n} \quad (5.2)$$

Onde $\mu_{inferior}$ e $\mu_{superior}$ são os valores que determinam o intervalo de confiança, \bar{X} é a média de valores utilizados para determinar o intervalo, S é o desvio padrão dessa média, n é o número de ensaios e t é o valor da distribuição de Student, tabelado e dependente do número de graus de liberdade (k), do número de caudas (uma ou duas) e do grau de confiabilidade.

O número de graus de liberdade (k) é igual ao número de ensaios (n) menos um, como se tinha acesso a dados de quatro trabalhos anteriores com os mesmos geotêxteis, o valor de k foi igual a três.

As Tab. 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os valores de aberturas encontrados nos trabalhos de Silva (2014), Trejos Galvis (2016), Moraes Filho (2018) e Melo (2018). As médias, desvios padrões e limites superiores e inferiores encontrados para um nível de confiança de 99%,

mesmo valor utilizado por Fatema & Bhatia (2019) para uma análise da mesma variável, são mostrados na Tab. 5.4. Os valores de abertura de filtração sombreados nas tabelas indicam valores não informados pelos autores, mas que foi possível obter através das curvas apresentadas nos trabalhos.

Tabela 5.5: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN₂₀₀

| GTN ₂₀₀ | Diâmetro (mm) | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| Melo, 2018 | 0,162 | 0,154 | 0,145 | 0,107 | 0,067 | 0,034 |
| Moraes Filho, 2018 | 0,147 | 0,137 | 0,135 | 0,124 | 0,098 | 0,061 |
| Trejos Galvis, 2016 | 0,151 | 0,147 | 0,138 | 0,107 | 0,09 | 0,055 |
| Silva, 2014 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,048 | 0,04 | 0,03 |
| Média | 0,153 | 0,145 | 0,137 | 0,097 | 0,074 | 0,045 |
| Desvio Padrão | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,033 | 0,026 | 0,015 |
| Limite Superior | 0,172 | 0,167 | 0,155 | 0,194 | 0,150 | 0,090 |
| Limite Inferior | 0,133 | 0,122 | 0,119 | -0,001 | -0,002 | 0,000 |

Tabela 5.6: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN₃₀₀

| GTN ₃₀₀ | Diâmetro (mm) | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| Melo, 2018 | 0,148 | 0,14 | 0,129 | 0,087 | 0,062 | 0,033 |
| Moraes Filho, 2018 | 0,139 | 0,13 | 0,127 | 0,106 | 0,095 | 0,063 |
| Trejos Galvis, 2016 | 0,135 | 0,13 | 0,117 | 0,088 | 0,078 | 0,045 |
| Silva, 2014 | 0,14 | 0,12 | 0,09 | 0,047 | 0,04 | 0,02 |
| Média | 0,141 | 0,130 | 0,116 | 0,082 | 0,069 | 0,040 |
| Desvio Padrão | 0,005 | 0,008 | 0,018 | 0,025 | 0,023 | 0,018 |
| Limite Superior | 0,156 | 0,154 | 0,168 | 0,155 | 0,137 | 0,094 |
| Limite Inferior | 0,125 | 0,106 | 0,063 | 0,009 | 0,000 | -0,013 |

As Fig. 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os valores de aberturas de filtração encontrados neste trabalho para cada tipo de geotêxtil ensaiado, assim como os intervalos de confiança de cada um deles. Como fisicamente os valores de abertura não podem ser negativos, valores menores que zero foram considerados nulos.

Como é possível observar pelas Fig. 5.4, 5.5 e 5.6, a maioria das médias de aberturas de filtrações encontradas neste trabalho para a condição de referência sem confinamento se encaixaram no intervalo de confiança determinado por trabalhos anteriores e um nível de confiança de 99%.

Notou-se também pelas Fig. 5.4, 5.5 e 5.6 que os intervalos de confiança para as aberturas O_{50} , O_{30} e O_{10} para todos os tipos de geotêxteis tem uma baixa confiabilidade. Isso se deve a variabilidade de resultados encontrados em estudos anteriores. Além disso, a maioria das metodologias de dimensionamento de filtros não utilizam esses valores. Por estes motivos, escolheu-se utilizar apenas os valores de O_{98} , O_{95} e O_{90} nas análises seguintes.

É observado pelos intervalos encontrados que os valores das maiores aberturas (O_{98} , O_{95} e O_{90}) foram os mais afetados, visto que são os que apresentaram um distanciamento dos limites do IC. Isso implica em uma possível influência das britas nessas aberturas. Como os arranjos são únicos para cada ensaio, tanto acima, como abaixo do geotêxtil, a repetibilidade do ensaio é prejudicada e os valores de aberturas de filtração apresentam uma maior variabilidade que as encontradas em estudos anteriores.

Tabela 5.7: Valores de aberturas de filtração, médias, desvios padrões e intervalo de confiabilidade de trabalhos anteriores para o GTN_{500}

| GTN ₅₀₀ | Diâmetro (mm) | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ | O ₅₀ | O ₃₀ | O ₁₀ |
| Melo, 2018 | 0,122 | 0,118 | 0,113 | 0,077 | 0,057 | 0,036 |
| Moraes Filho, 2018 | 0,108 | 0,106 | 0,093 | 0,093 | 0,09 | 0,066 |
| Trejos Galvis, 2016 | 0,11 | 0,101 | 0,098 | 0,059 | 0,052 | 0,031 |
| Silva, 2014 | 0,13 | 0,1 | 0,09 | 0,045 | 0,03 | 0,01 |
| Média | 0,118 | 0,106 | 0,099 | 0,069 | 0,057 | 0,036 |
| Desvio Padrão | 0,010 | 0,008 | 0,010 | 0,021 | 0,025 | 0,023 |
| Limite Superior | 0,148 | 0,130 | 0,128 | 0,130 | 0,130 | 0,103 |
| Limite Inferior | 0,087 | 0,082 | 0,069 | 0,007 | -0,015 | -0,032 |

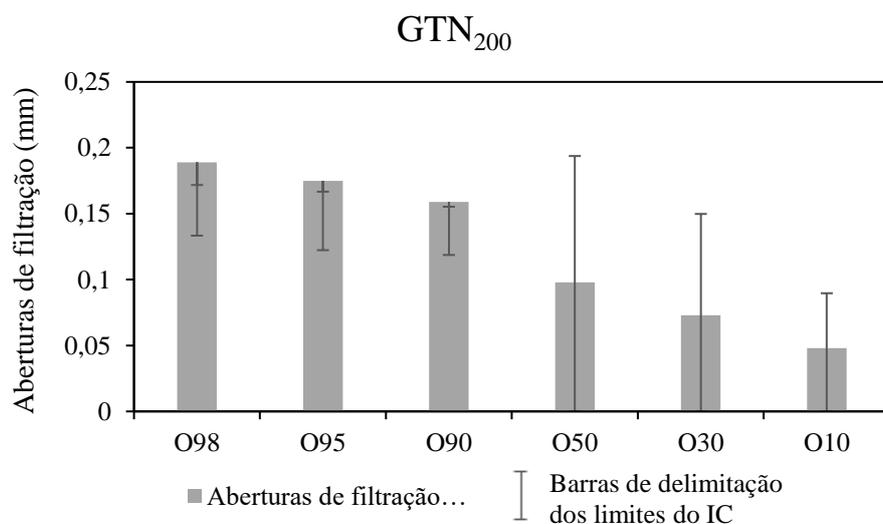


Figura 5.4: Gráfico das aberturas de filtração do GTN_{200} com as barras delimitadoras do intervalo de confiança

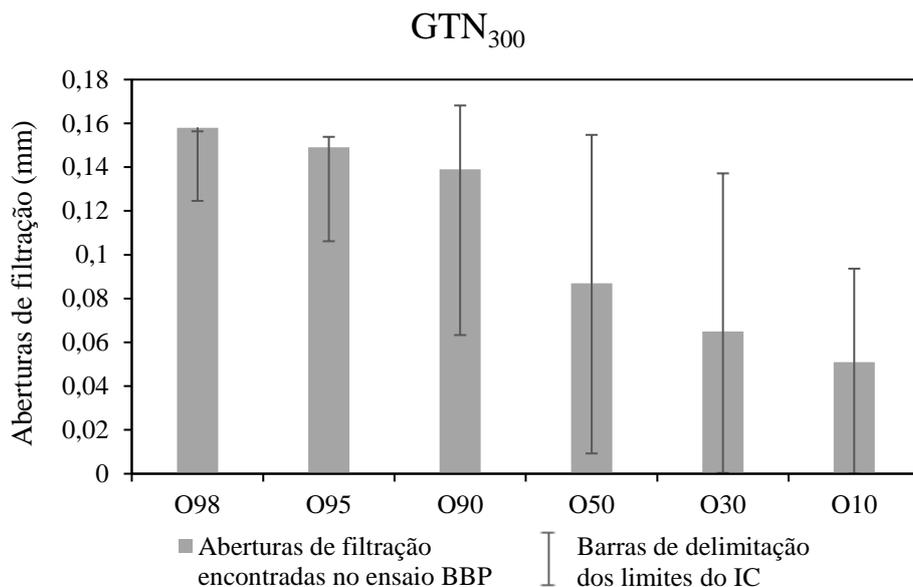


Figura 5.5: Gráfico das aberturas de filtração do GTN₃₀₀ com as barras delimitadoras do intervalo de confiança

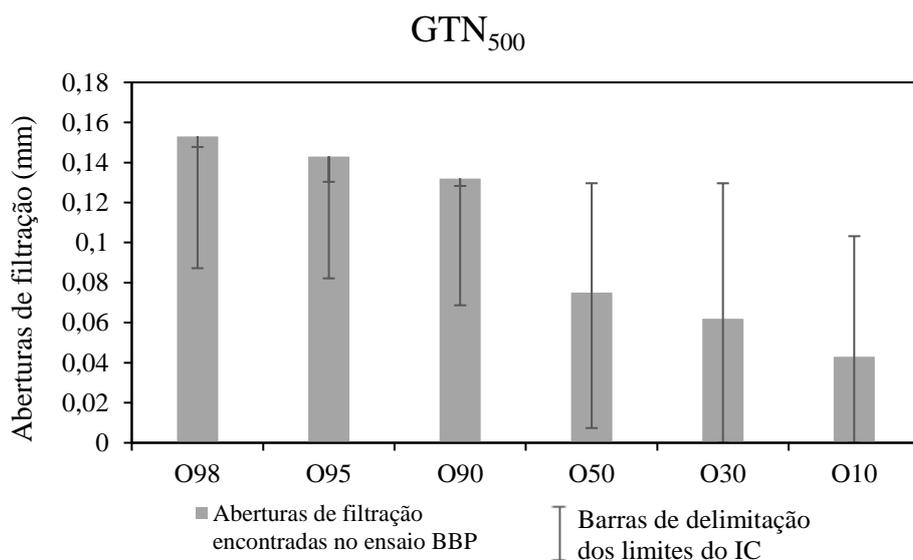


Figura 5.6: Gráfico das aberturas de filtração do GTN₅₀₀ com as barras delimitadoras do intervalo de confiança

5.2. Condições com Confinamento

Com os valores de aberturas para o caso sem confinamento validados pelos intervalos de confiança, realizou-se as triplicatas de ensaios com confinamento. Os próximos subitens apresentarão os dados obtidos desses ensaios.

5.2.1. Carregamento de 10kPa

O programa de ensaios incluía quatro fases de carregamento, sendo a primeira delas de 10kPa e abordada neste tópico. A Fig. 5.7 e Tab. 5.8 apresentam as curvas de distribuição dos poros e os valores de aberturas de filtração encontrados para o GTN₂₀₀.

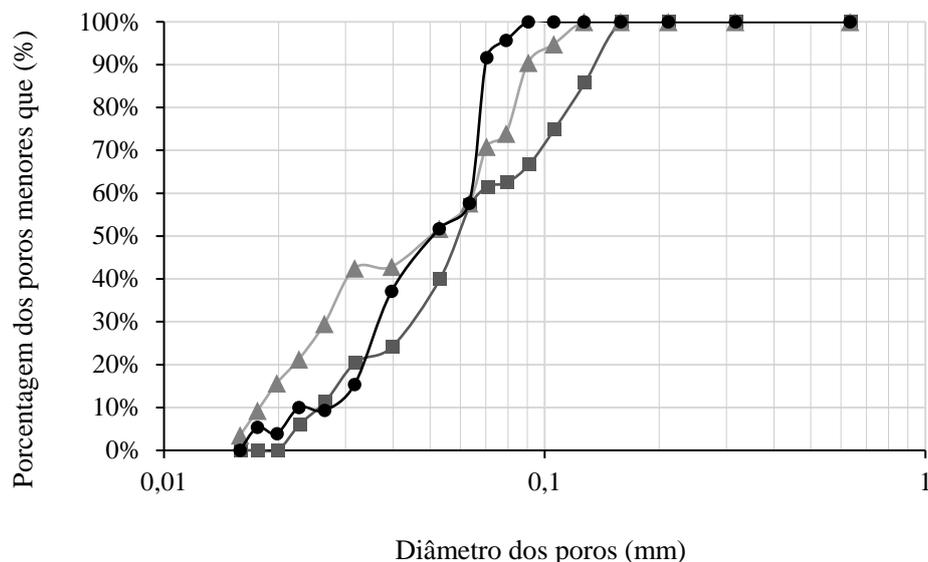


Figura 5.7: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN₂₀₀

Tabela 5.8: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN₂₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,151 | 0,145 | 0,135 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,085 | 0,077 | 0,07 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,116 | 0,106 | 0,089 |
| Desvio Padrão | | 0,033 | 0,034 | 0,033 |
| Média | | 0,117 | 0,109 | 0,098 |

Para o GTN₃₀₀, são apresentadas suas curvas de distribuição dos poros na Fig. 5.8 e os valores de aberturas de filtração na Tab. 5.9.

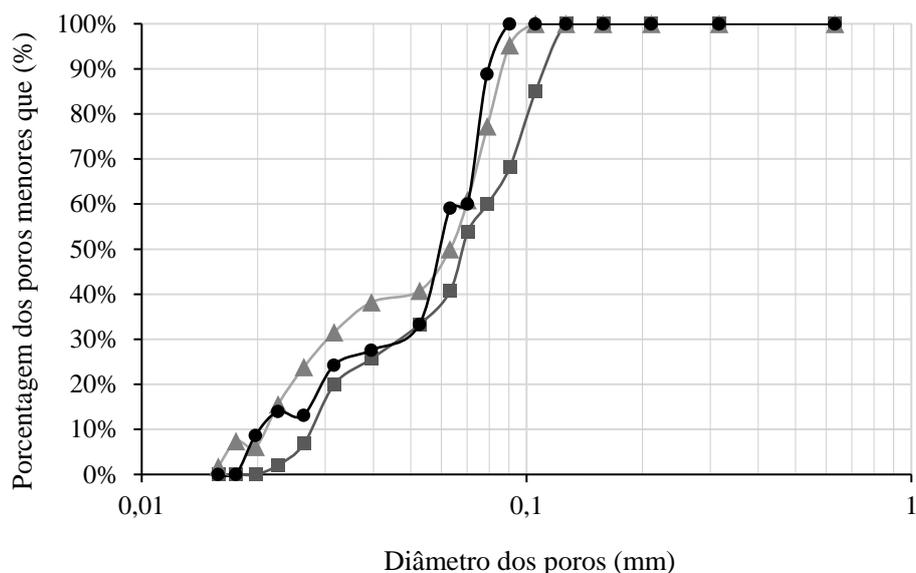


Figura 5.8: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN₃₀₀

Tabela 5.9: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN₃₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,121 | 0,117 | 0,111 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,095 | 0,09 | 0,086 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,087 | 0,084 | 0,08 |
| Desvio Padrão | | 0,018 | 0,018 | 0,016 |
| Média | | 0,101 | 0,097 | 0,092 |

Para o último tipo de geotêxtil, o GTN₅₀₀, a Fig. 5.9 e Tab. 5.10 apresentam as distribuições de poros e aberturas de filtração, respectivamente.

Tabela 5.10: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 10kPa de carregamento do GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,067 | 0,056 | 0,052 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,099 | 0,095 | 0,089 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,088 | 0,085 | 0,081 |
| Desvio Padrão | | 0,016 | 0,020 | 0,019 |
| Média | | 0,085 | 0,079 | 0,074 |

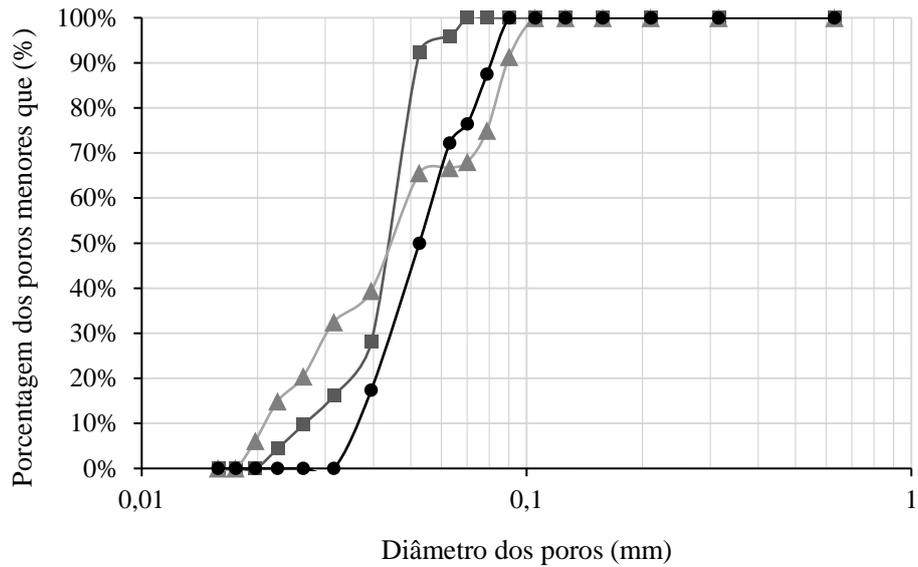


Figura 5.9: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 10kPa para o GTN₅₀₀

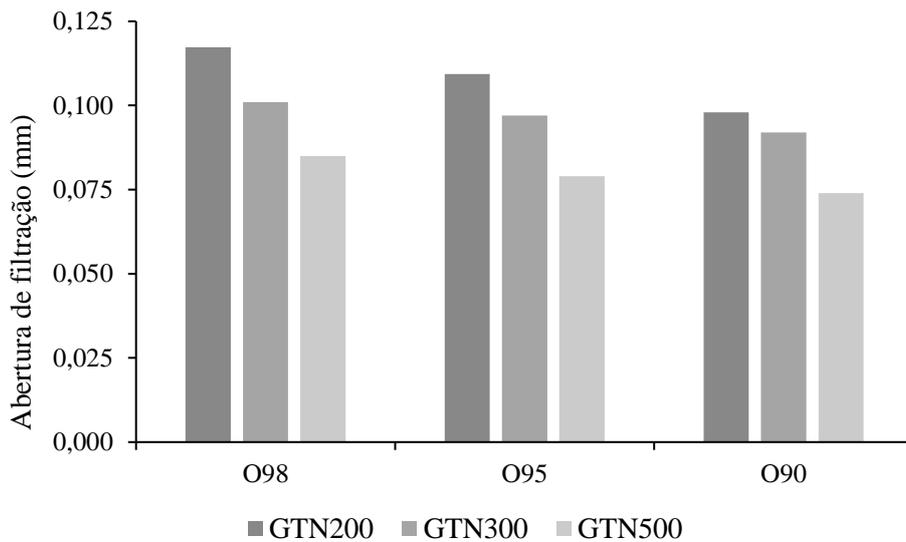


Figura 5.10: Médias das aberturas de filtração dos GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ com carregamento de 10kPa

A Fig. 5.10 apresenta as médias de cada geotêxtil para as três aberturas de filtração estudadas. Como esperado, as aberturas de filtração diminuem em torno de 10 a 20% de um tipo de geotêxtil para outro de maior gramatura.

5.2.2. Carregamento de 100kPa

O segundo valor de carregamento ensaiado foi o de 100kPa. A Fig. 5.11 apresenta as curvas de distribuição dos poros e a Tab. 5.11 as aberturas de filtração dos três GTN₂₀₀ ensaiados.

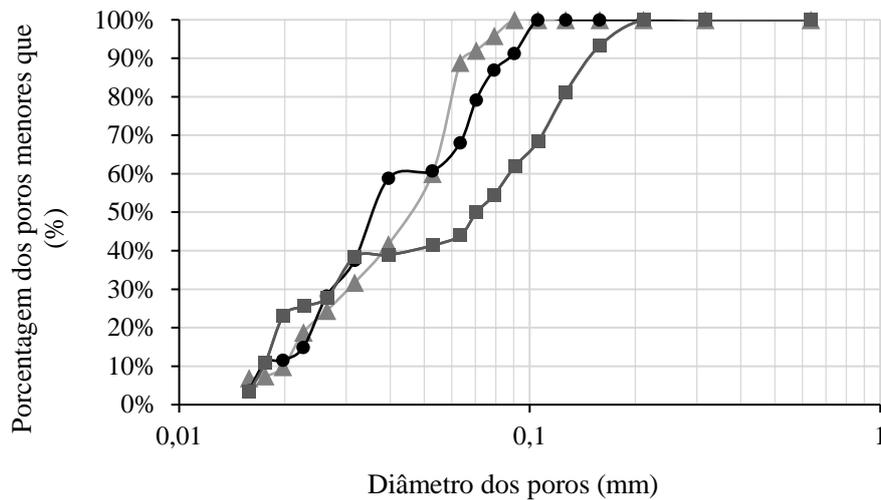


Figura 5.11: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN₂₀₀

Tabela 5.11: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN₂₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,184 | 0,167 | 0,147 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,084 | 0,078 | 0,064 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,101 | 0,096 | 0,087 |
| Desvio Padrão | | 0,054 | 0,047 | 0,043 |
| Média | | 0,123 | 0,114 | 0,099 |

Para o GTN₃₀₀ e carregamento de 100kPa, a Fig. 5.12 apresenta as curvas de distribuição dos poros e a Tab. 5.12 as principais aberturas de filtração.

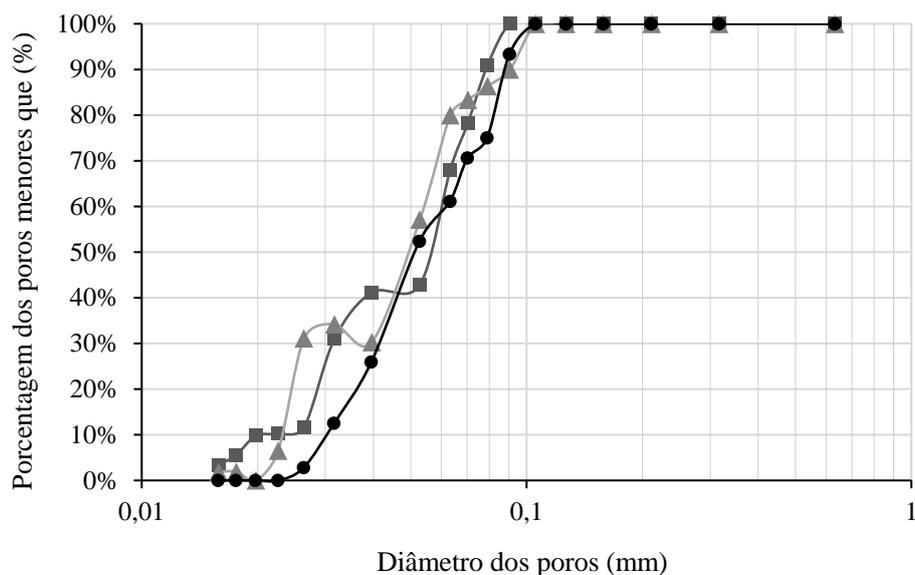


Figura 5.12: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN₃₀₀

Tabela 5.12: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN₃₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,087 | 0,083 | 0,078 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,101 | 0,097 | 0,09 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,098 | 0,093 | 0,088 |
| Desvio Padrão | | 0,007 | 0,007 | 0,006 |
| Média | | 0,095 | 0,091 | 0,085 |

A Fig. 5.13 apresenta as curvas de distribuição dos poros do GTN₅₀₀ para o confinamento de 100kPa e a Tab. 5.13 as respectivas aberturas de filtração.

A Fig. 5.14 apresenta as médias de abertura de filtração de cada tipo de geotêxtil. Ao contrário do caso com 10kPa de carregamento, o GTN₅₀₀ exibiu um comportamento atípico, visto que esperado que suas aberturas de filtração sejam inferiores as dos outros geotêxteis com menor gramatura. Sabendo-se que as amostras ensaiadas são as mesmas, é possível atribuir esse comportamento a uma menor susceptibilidade a compressão, ou seja, por possuir uma maior gramatura, o GTN₅₀₀ é menos compressível, sendo assim, o esforço afeta menos sua abertura de filtração. Entre o GTN₂₀₀ e GTN₃₀₀ a diminuição dos valores de abertura de poros variou entre 14 e 22%, um pouco acima dos valores para o carregamento de 10kPa.

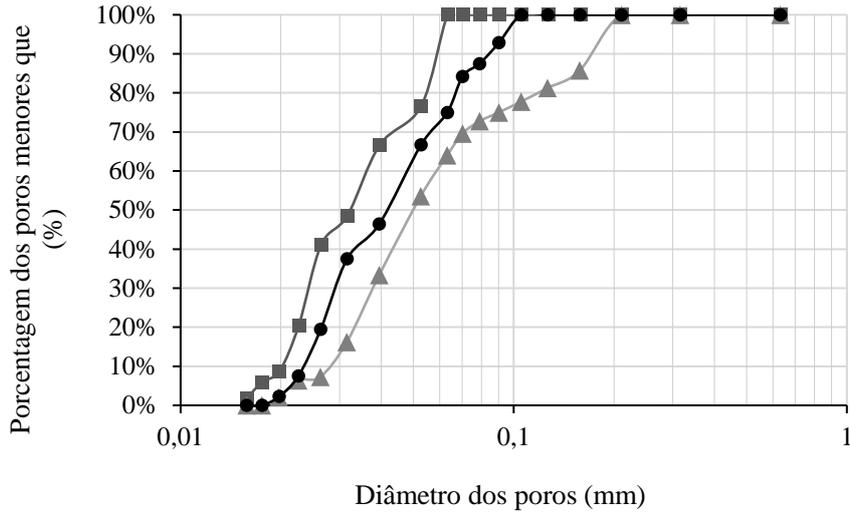


Figura 5.13: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 100kPa para o GTN₅₀₀

Tabela 5.13: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 100kPa de carregamento do GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,062 | 0,061 | 0,059 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,196 | 0,186 | 0,172 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,099 | 0,094 | 0,085 |
| Desvio Padrão | | 0,069 | 0,065 | 0,059 |
| Média | | 0,119 | 0,114 | 0,105 |

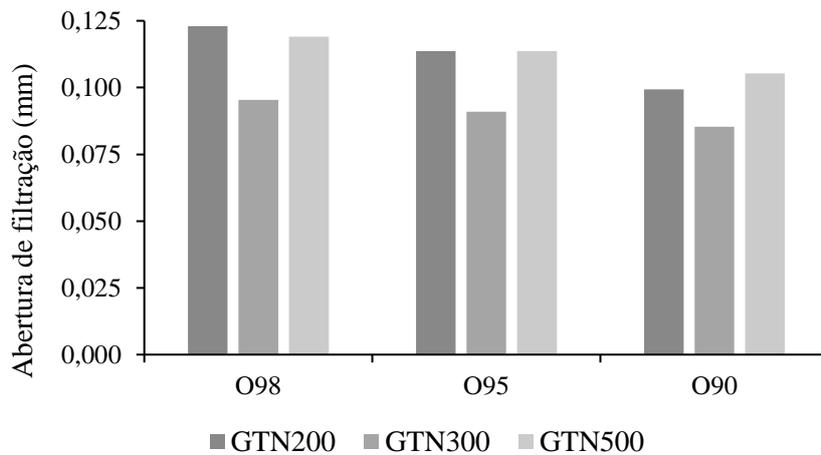


Figura 5.14: Médias das aberturas de filtração dos GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ com carregamento de 100kPa

5.2.3. Carregamento de 400kPa

O terceiro estágio de carregamento ensaiado foi de 400kPa. Para esse valor de carregamento, a dispersão dos resultados obtidos nos ensaios foi muito alta, sendo necessário a repetição de alguns ensaios para confirmação dos valores obtidos.

A Fig. 5.15 apresenta as curvas de distribuição de poros encontradas para os três ensaios do GTN₂₀₀ e a Tab. 5.14 contém os valores de aberturas de filtração desse geotêxtil.

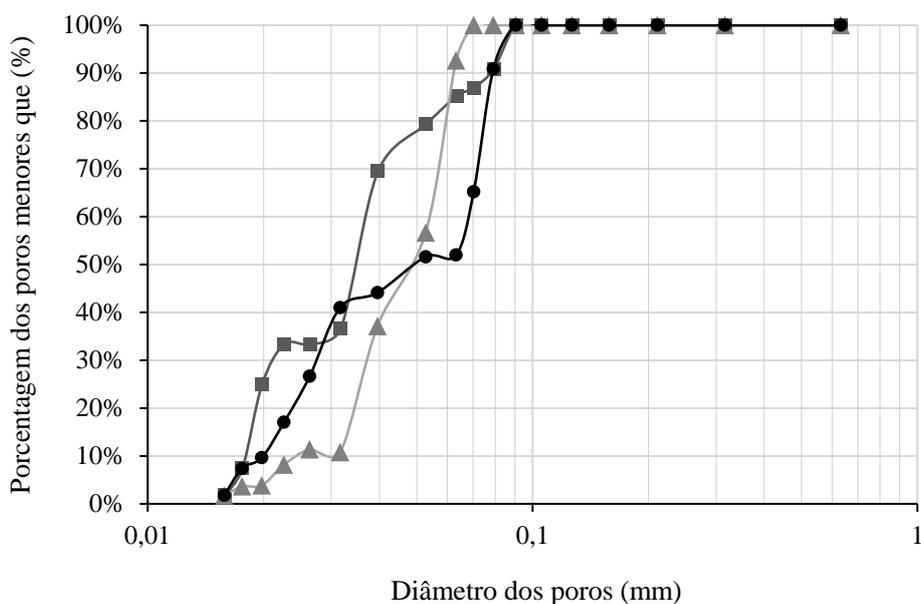


Figura 5.15: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN₂₀₀

Tabela 5.14: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN₂₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,087 | 0,084 | 0,078 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,067 | 0,065 | 0,062 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,086 | 0,082 | 0,079 |
| Desvio Padrão | | 0,011 | 0,010 | 0,010 |
| Média | | 0,080 | 0,077 | 0,073 |

Para o GTN₃₀₀, são apresentadas suas curvas de distribuição na Fig. 5.16 e as principais aberturas de filtração na Tab. 5.15.

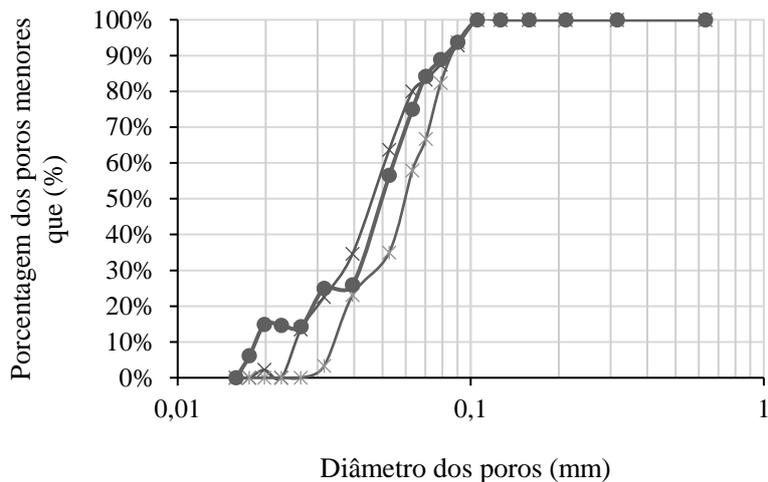


Figura 5.16: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN₃₀₀

Tabela 5.15: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN₃₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,099 | 0,095 | 0,085 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,098 | 0,093 | 0,086 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,099 | 0,094 | 0,082 |
| Desvio Padrão | | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| Média | | 0,099 | 0,094 | 0,084 |

Para o último geotêxtil, o GTN₅₀₀, a Fig. 5.17 e Tab. 5.16 apresentam as curvas de distribuição dos poros e as aberturas de filtração, respectivamente.

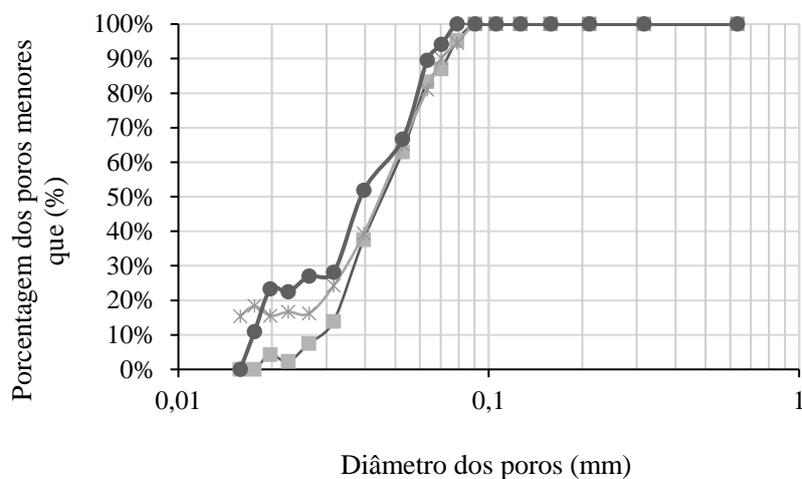


Figura 5.17: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 400kPa para o GTN₅₀₀

Tabela 5.16: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 400kPa de carregamento do GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,084 | 0,079 | 0,074 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,075 | 0,072 | 0,064 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,085 | 0,081 | 0,07 |
| Desvio Padrão | | 0,006 | 0,005 | 0,005 |
| Média | | 0,081 | 0,077 | 0,069 |

A Fig. 5.18 ilustra as médias de aberturas de filtração para cada tipo de geotêxtil sob carregamento de 400kPa. Para estágios maiores de carregamento, é esperado que os valores de abertura comecem a diminuir a variabilidade, visto que se chega a um ponto em que o geotêxtil começa a ser bem menos compressível. É possível identificar isto entre os valores do GTN₂₀₀ e GTN₅₀₀, que são praticamente iguais. Porém, o GTN₃₀₀ de alguma forma apresentou um comportamento destoante. Essa mesma inconsistência foi identificada por Melo (2018) para o GTN₃₀₀.

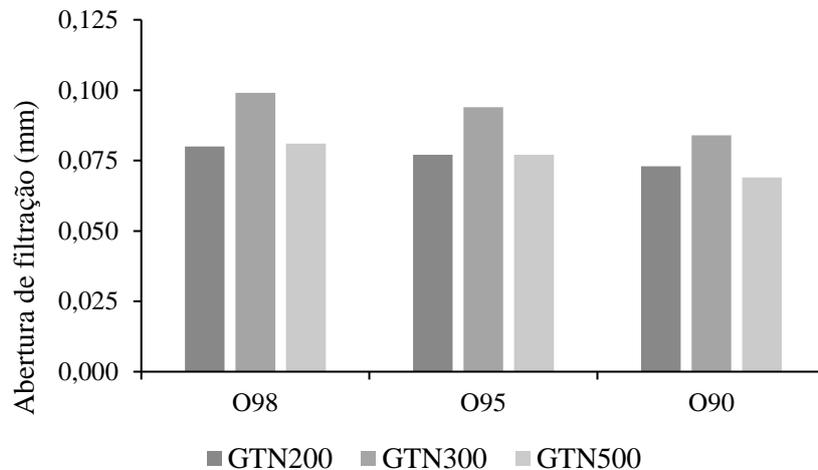


Figura 5.18: Médias das aberturas de filtração dos GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ com carregamento de 400kPa

5.2.4. Carregamento de 1000kPa

O último nível de carregamento ensaiado foi com confinamento de 1000kPa. Este estágio apresentou as maiores dificuldades de convergência de resultados, precisando assim de repetições de ensaio para todos os tipos de geotêxtil.

Os resultados para o GTN₂₀₀ são apresentados na Fig. 5.19 com as curvas de distribuição dos poros e na Tab. 5.17 com os valores de abertura de filtração.

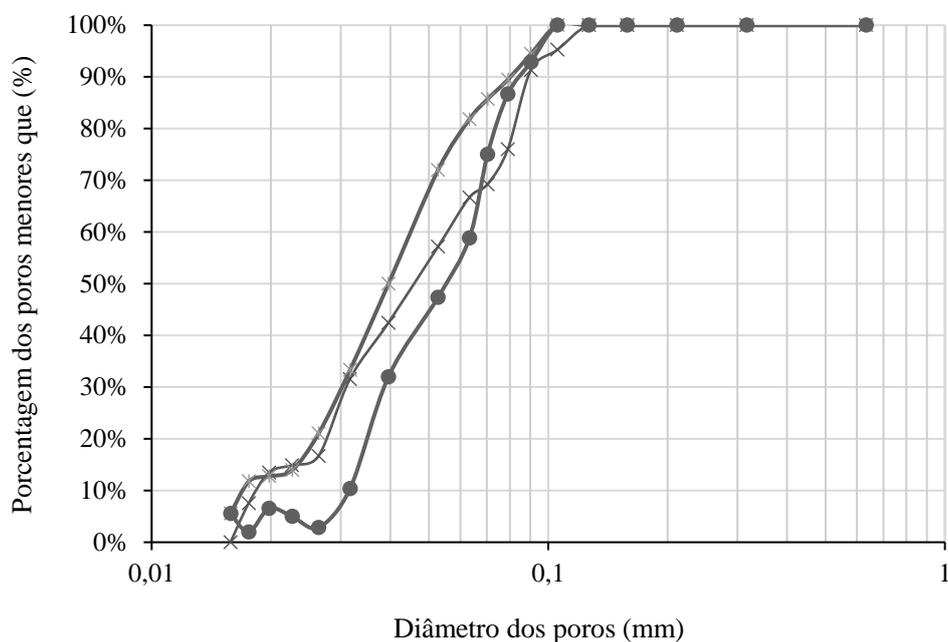


Figura 5.19: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN₂₀₀

Tabela 5.17: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN₂₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,115 | 0,106 | 0,089 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,098 | 0,092 | 0,08 |
| GTN ₂₀₀ | 200 | 0,099 | 0,094 | 0,084 |
| Desvio Padrão | | 0,010 | 0,008 | 0,005 |
| Média | | 0,104 | 0,097 | 0,084 |

Para o GTN₃₀₀, as curvas de distribuição obtidas são apresentadas na Fig. 5.20 e as aberturas de filtração na Tab. 5.18.

Para o terceiro tipo de geotêxtil, o GTN₅₀₀, os resultados são apresentados na Fig. 5.21 e Tab. 5.19.

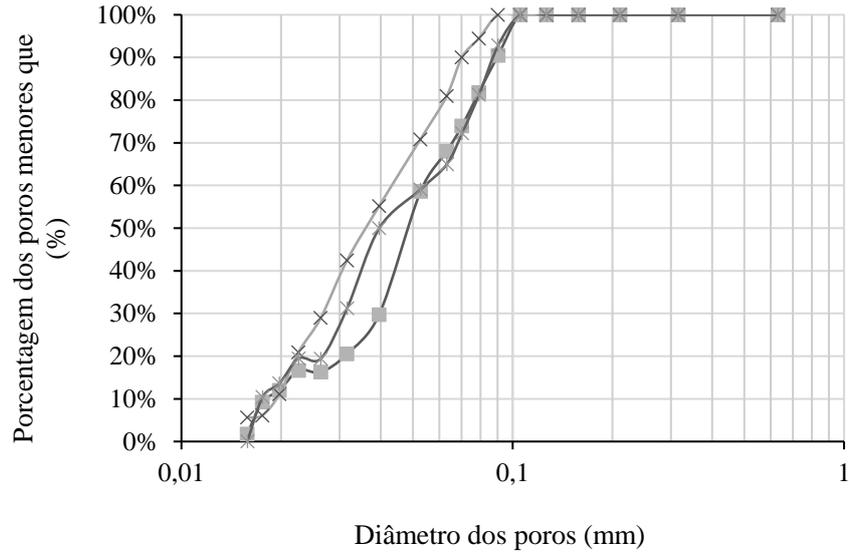


Figura 5.20: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN₃₀₀

Tabela 5.18: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN₃₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,101 | 0,096 | 0,09 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,085 | 0,08 | 0,07 |
| GTN ₃₀₀ | 300 | 0,099 | 0,094 | 0,087 |
| Desvio Padrão | | 0,009 | 0,009 | 0,011 |
| Média | | 0,095 | 0,090 | 0,082 |

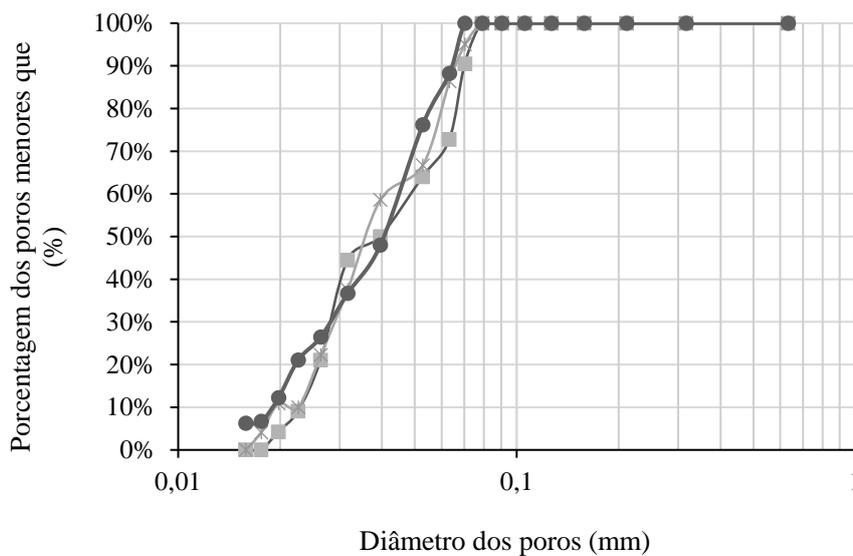


Figura 5.21: Curvas de distribuição dos poros dos três ensaios com carregamento de 1000kPa para o GTN₅₀₀

Tabela 5.19: Principais valores de abertura de filtração dos três ensaios com 1000kPa de carregamento do GTN₅₀₀

| Geotêxteis | Gramatura (g/m ²) | Diâmetro (mm) | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | O ₉₈ | O ₉₅ | O ₉₀ |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,076 | 0,073 | 0,07 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,075 | 0,071 | 0,066 |
| GTN ₅₀₀ | 500 | 0,068 | 0,067 | 0,065 |
| Desvio Padrão | | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| Média | | 0,073 | 0,070 | 0,067 |

A Fig. 5.22 resume as aberturas de filtração de cada geotêxtil utilizando as médias obtidas. Observa-se uma variabilidade entre os tipos geotêxteis com diminuição entre 9 e 23% para o O₉₈, 7 e 22% para o O₉₅ e 2 e 18% para o O₉₀. Essa diminuição é, em todos os casos, maior entre os GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀, provavelmente porque a diferença entre as gramaturas é maior. Esse comportamento é semelhante ao encontrado para o carregamento de 10kPa, onde a abertura de filtração diminuiu com o aumento da gramatura dos geotêxteis.

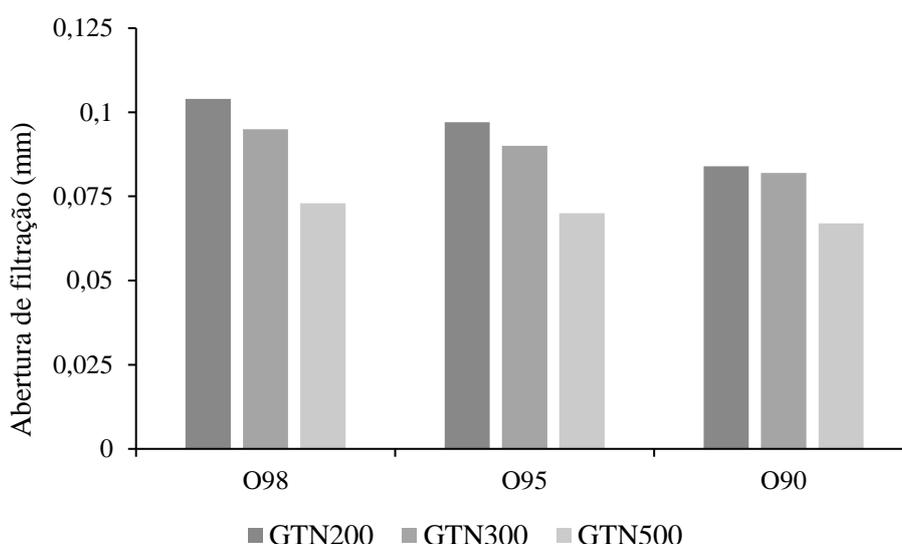


Figura 5.22: Médias das aberturas de filtração dos GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ com carregamento de 1000kPa

5.3. Avaliação das Amostras Ensiadas sob Confinamento

Após a realização dos ensaios, foi observado que a face superior das amostras de GTN sofriam maiores deformações advindas da aplicação de confinamento ao sistema. A Fig. 5.23 mostra as duas faces e como elas não apresentam aparências semelhantes. Esta diferença é

provocada pela compressão e rearranjo da brita na parte inferior, que permitiu que o geotêxtil se deslocasse para baixo. Tal fenômeno pode, em parte, explicar a dispersão de resultados, já que, sob uma mesma tensão vertical, canais de fluxo no geotêxtil podem ser afetados e se deformarem de formas diferentes, dependendo da proximidade, do arranjo e das formas dos grãos de brita vizinhos.

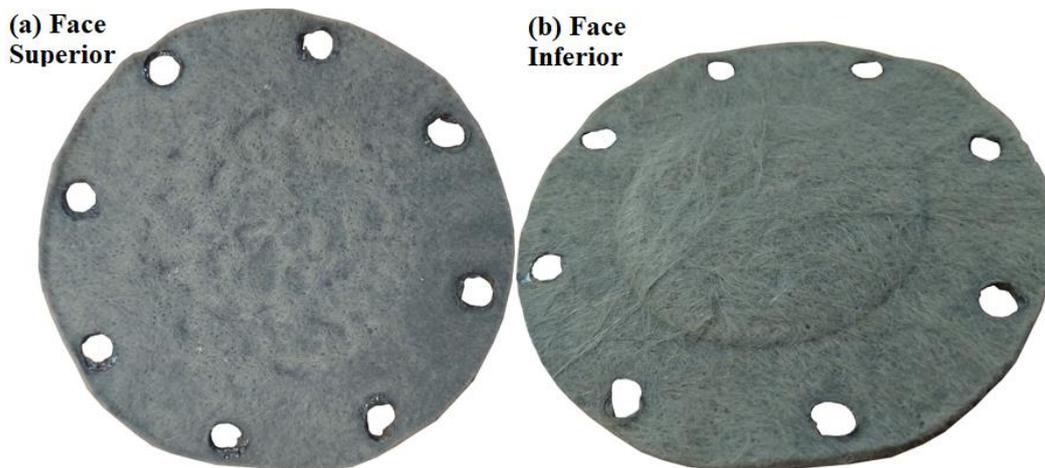


Figura 5.23: Faces (a) superior e (b) inferior de uma das amostras de GTN ensaiadas com compressão de 1000kPa

5.4. Análise da Influência do Confinamento

Estudos anteriores utilizando o ensaio de ponto de bolha já apontavam a influência do confinamento em uma amostra de geotêxtil não tecido. Entretanto, nenhum desses estudos avaliou a combinação da compressão com a presença de algum tipo de solo. A seção anterior apresentou os resultados obtidos para esse caso utilizando brita sub e sobrejacente às amostras de GTN.

A Fig. 5.24 apresenta um gráfico de aberturas de filtração (O_{98} , O_{95} e O_{90}) versus os carregamentos aplicados para o GTN₂₀₀. Esse tipo de gráfico foi anteriormente apresentado por Silva (2014) e Trejos Galvis (2016). O comportamento identificado pelas autoras foi semelhante, as curvas sofriam uma diminuição brusca entre 0 e 100kPa, e entre 100 e 1000kPa a curva exibia um patamar com uma diminuição muito pequena das aberturas de filtração.

Para o GTN₂₀₀, é possível observar na Fig. 5.24 que existem dois picos na curva, um convexo em 100kPa e um côncavo em 400kPa. Esse comportamento não é similar ao

encontrado em trabalhos anteriores, porém, pode indicar a influência da brita na deformabilidade de canais de fluxo, como comentado anteriormente. Ainda é possível notar que para a abertura O₉₀ esses picos começam a suavizar e se assemelhar ao encontrado por Silva (2014) e Trejos Galvis (2016).

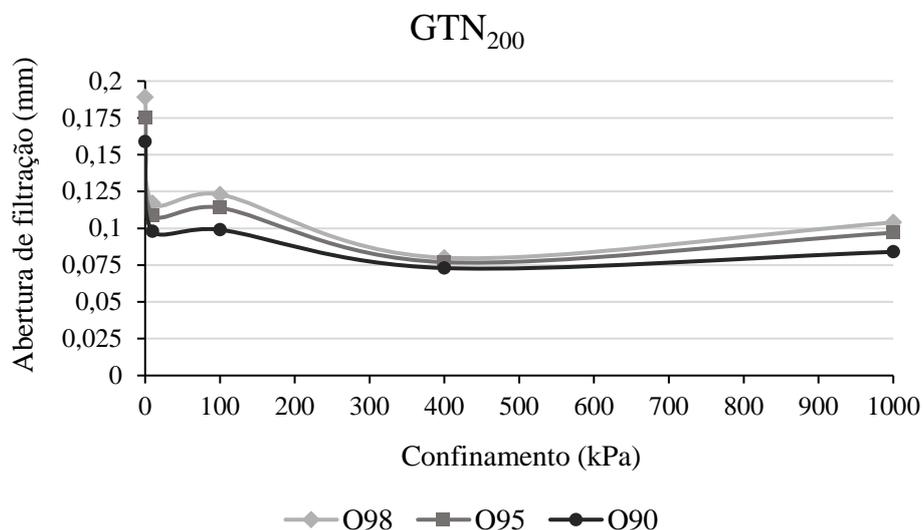


Figura 5.24: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN₂₀₀

O mesmo gráfico foi plotado para o GTN₃₀₀ e é mostrado na Fig. 5.25. Pela figura, nota-se que para esse tipo de GTN₃₀₀ foram os resultados quase que dentro do esperado pelo observado em trabalhos anteriores, com a diferença de que após o carregamento de 100kPa aparece um patamar quase que retilíneo. Porém, acredita-se que não necessariamente isto indique uma conformidade com a configuração de ensaio realizada neste trabalho, visto que, como já mencionado, o GTN₃₀₀ apresentou um comportamento errático para o carregamento de 400kPa, corroborado pela inconsistência comportamental encontrada por Melo (2018).

Para o terceiro tipo de geotêxtil ensaiado, o GTN₅₀₀, a Fig. 5.26 mostra um comportamento muito semelhante ao encontrado na Fig. 5.24 para o GTN₂₀₀, porém, com pico mais acentuados no carregamento de 100kPa e praticamente não existente no de 400kPa. Tal comportamento pode ser explicado pela espessura do geotêxtil associada com a sua intrusão nos vazios entre grãos de brita subjacentes sob a tensão de 10 kPa, que tenderiam a reduzir as dimensões das aberturas na face superior do geotêxtil. Com o aumento da tensão confinante, o geotêxtil tenderia a ser tracionado (Fig. 5.27) nos vazios entre grãos, associado a novos rearranjos dos grãos de brita, o que tenderia a aumentar as suas aberturas. Para tensões maiores,

uma situação de estabilidade seria alcançada, com o geotêxtil já tendo se deformado o que poderia deformar nos vazios entre grãos de brita. Além disso, poros que levariam às maiores aberturas de filtração podem ser obstruídos por grãos de brita, levando a reduções na abertura de filtração do geotêxtil. Tal situação pode se alterar com o aumento da tensão e rearranjos dos grãos de brita durante o ensaio. Danos mecânicos nos contatos brita-geotêxtil também podem ter influenciado os resultados dos ensaios. No entanto, estudos adicionais são necessários para confirmar estas hipóteses.

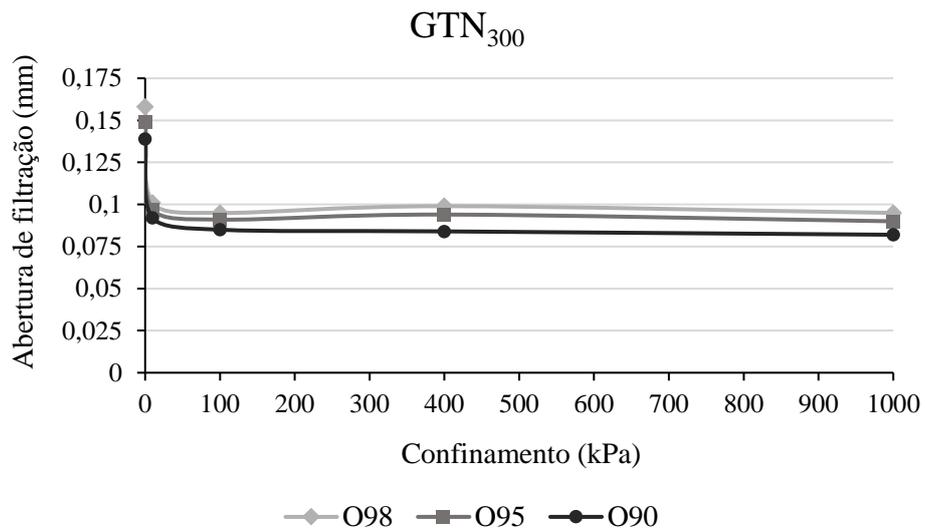


Figura 5.25: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN₃₀₀

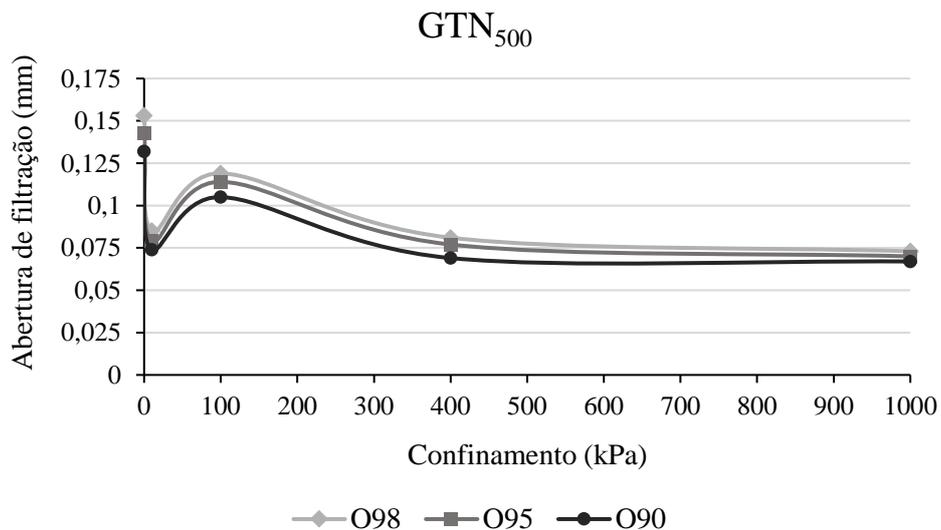


Figura 5.26: Curvas de abertura de filtração versus nível de confinamento para o GTN₅₀₀

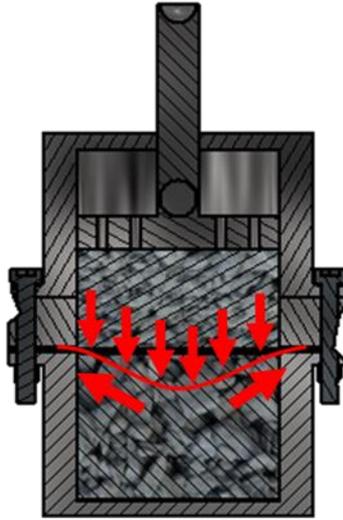


Figura 5.27: Seção transversal da célula de ensaio apresentando o efeito de tracionamento nas amostras durante o ensaio

A similaridade entre os comportamentos do GTN₂₀₀ e GTN₅₀₀ juntamente com a possibilidade de comportamento errático do GTN₃₀₀ encontrado neste e no trabalho de Melo (2018), indicam um novo padrão de comportamento dessas curvas quando da presença de brita no ensaio de ponto de bolha.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1. Conclusões

A presente dissertação estudou o comportamento da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento em presença de brita sub e sobrejacente ao filtro. A obtenção das aberturas de filtrações foi feita utilizando o ensaio de ponto de bolha (BBP). As amostras utilizadas eram todas do mesmo fabricante, todas de filamentos de poliéster, agulhado e com três valores de gramatura: 200, 300 e 500g/m². Os geotêxteis foram identificados por GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀, de acordo com a sua gramatura. Quanto ao confinamento, foram utilizados cinco níveis de carregamento: 0, 10, 100, 400 e 1000kPa. As principais conclusões desse estudo serão apresentadas a seguir.

O primeiro estágio ensaiado foi o sem confinamento. Com o uso da ferramenta estatística intervalo de confiança, foi possível avaliar se a presença das britas influenciavam este estágio de carregamento a ponto de não se encaixar dentro do intervalo traçado. Não se tem conhecimento de que esses intervalos já haviam sido traçados em estudos anteriores e eles mostram que as variáveis envolvidas no ensaio prejudicam a precisão dos resultados encontrados. Isso é acentuado ainda mais nos valores dos poros menores (O₅₀, O₃₀ e O₁₀) o que indica uma grande variação do tamanho desses poros, podendo esta ser atribuída a aleatoriedade da disposição das fibras. Para os valores de maiores aberturas de filtração (O₉₈, O₉₅ e O₉₀), a maioria não se adequou aos intervalos encontrados, indicando que a presença e diferentes arranjos das britas que modificava para cada ensaio, tem uma maior influência para esses valores de abertura.

A gramatura das amostras também apresentou uma grande variação, considerando-se que elas vieram da mesma manta. Este fator pode também estar ligado a variação da dimensão dos poros, visto que é esperado que uma gramatura menor apresente maiores aberturas de filtração. Houve uma limitação de erro de $\pm 10\%$ do valor de gramatura fixado (200, 300 e 500g/m²), mas, mesmo assim, foi observado que amostras com gramaturas equivalentes

parecidas apresentaram valores de abertura distintos. Um aspecto a ser levado em consideração é que o GTN₂₀₀ e GTN₃₀₀ estavam armazenados em rolos e as mantas utilizadas para amostragem desse trabalho eram a última volta de seus respectivos rolos. Isto pode ser um problema visto que, essa é a parte do rolo que mais recebeu esforços durante o armazenamento, seja de compressão no transporte, como de tração quando a manta é puxada. Além disso, essa manta é a mais susceptível a dobras e deformações do próprio processo de rolagem na fábrica. Todos esses fatores mencionados podem desempenhar um impacto nos resultados obtidos, aumentando ou diminuindo os poros do geotêxtil.

Os ensaios foram realizados em triplicata e, em muitos casos, as curvas se apresentaram distintas. Como consequência, valores de abertura de filtração não convergiam, para alguns desses casos, a repetição do ensaio ajudou a identificar uma tendência de comportamento, mas, mesmo assim, os valores de desvio padrão foram mais altos que o desejado. O que possivelmente causou esse efeito foi o arranjo das britas dentro da célula de ensaio. Como não havia uma maneira de garantir que a configuração de britas, especialmente aquelas em contato direto com o geotêxtil, fosse sempre a mesma, isso pode ter interferido no valor das aberturas de filtração.

Para os ensaios com confinamento, como esperado os esforços de compressão diminuíram as aberturas de filtração. O maior impacto foi causado com a menor das tensões, a de 10kPa, o que implica dizer que mesmo tensões baixas podem influenciar a abertura de filtração do geotêxtil. Isso é um importante alerta para projetistas, visto que a compressão do geotêxtil imerso em solo não é levada em consideração no dimensionamento de filtros geotêxteis.

O GTN₂₀₀ e GTN₅₀₀ apresentaram uma resposta ao confinamento similares, com um pico acentuado e convexo no carregamento de 100kPa. Como esse pico não foi identificado em outros trabalhos, é provável que isto tenha sido causado pelo rearranjo das britas dentro da célula de ensaio. Uma possível maneira de confirmar isto seria a execução do ensaio de ponto de bolha em uma célula transparente. Já o GTN₃₀₀ não apresentou esse pico para nenhuma das aberturas de filtração estudadas. Um comportamento diferenciado para esse tipo de geotêxtil já havia sido identificada por Melo (2018), o que pode indicar alguma particularidade com o rolo utilizado, visto que era o mesmo. A certeza do que causa esse comportamento errático desse geotêxtil poderia ser obtida com um estudo estrutural mais detalhado do mesmo.

No geral, os resultados encontrados mostram que há uma mudança no comportamento do geotêxtil sob confinamento na presença de materiais sub e sobrejacentes, abrindo um novo caminho de descobertas e estudos a serem realizados.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

São listadas abaixo as sugestões feitas para próximos trabalhos:

- Utilização de outros materiais sub e sobrejacentes, como areia e esferas de aço, por exemplo;
- Avaliação de outros tipos de esforços, como o de tração, na presença de materiais sub e sobrejacentes;
- Ampliação da célula de ensaio para utilização de graduações diferentes de britas;
- Incluir mais níveis de estágio de carregamento, principalmente entre o de 400 e 1000kPa, para confirmar o patamar que as aberturas de filtração formaram;
- Utilização de uma célula de ensaio transparente para uma análise visual do ensaio de ponto de bolha;
- Avaliação estrutural e microscópica dos geotêxteis e sua influência em suas propriedades;
- Automatização dos processos realizados manualmente evitando a propagação de erros de operação;
- Avaliação do impacto da variação das aberturas de filtração em projetos de filtros geotêxteis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2013). Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. NBR ISO 9862. ABNT, Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT (2016). Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. NBR 6458. ABNT, Rio de Janeiro, 10 p.
- ABNT (2016). Solo - Análise granulométrica. NBR 7181. ABNT, Rio de Janeiro, 12 p.
- ABNT (2018). Geotêxteis - Parte 1: Termos e definições. NBR ISO 10318. ABNT, Rio de Janeiro, 6 p.
- AGUIAR, P.R. & VERTEMATTI, J.C. (2004). Aplicações em filtração. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Blucher, pp. 175-198.
- ASTM (2016). Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile. D4751-16. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 9 p.
- ASTM (2016). Standard test method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test. D6767-16. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6 p.
- ASTM (2017). Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio. D5101-12. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8 p.
- ASTM (2018). Standard Test Method for Hydraulic Conductivity Ratio (HCR) Testing of Soil/Geotextile Systems. D5567-98. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 9 p.
- BELL, J.R. & HICKS, R.G. (1980). Evaluation of Test Methods and Use Criteria for Geotechnical Fabrics in Highway Applications. Interim Report FHWA/RD-80/021, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 290 p.
- BHATIA, S.K., HUANG, Q. & SMITH, J. (1993). Application of Digital Image Processing in Morphological Analysis of Geotextiles. Conference on Digital Image Processing: Techniques and Applications in Civil Engineering, ASCE, Hawaii, USA, 95-108.
- BHATIA, S.K. & SMITH, J.L. (1995). Application of the Bubble Point Method to the Characterization of the Pore-Size Distribution of Geotextiles. ASTM Geotechnical Testing Journal, 18(1): 94-105.

- BHATIA, S.K. & SMITH, J.L. (1996a). Geotextile Characterization and Pore-Size Distribution: Part I. A Review of Manufacturing Processes. *Geosynthetics International*, 3(1): 85–105.
- BHATIA, S.K. & SMITH, J.L. (1996b). Geotextile Characterization and Pore-Size Distribution: Part II. A Review of Test Methods and Results. *Geosynthetics International*, 3(2): 155–180.
- CALHOUN, C.C. (1972). Development of Design Criteria and Acceptance Specifications for Plastic Filter Cloth. Technical Report F-72-7, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, USA, 105 p.
- CHRISTOPHER, B.R. & HOLTZ, R.D. (1985). Geotextile Engineering Manual. Report FHWA-TS-86/203, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 1044 p.
- CHRISTOPHER, B.R. & FISCHER, G.R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(4–6): 337–353.
- ELSHARIEF, A.H. & LOVELL, C.W. (1996). Determination and Comparison of Structural Properties of Nonwoven Geotextiles. Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites, ASTM Special Technical Publication, Denver, Colorado, USA, 19 p.
- FATEMA, N. & BHATIA, S.K. (2019). Correlation between capillary flow and dry sieving test results of woven and nonwoven geotextiles. *Geosynthetics Conference*, Houston, Texas, USA, 1: 974-983.
- FAURE, Y.H. (1988). Approche Structurale du Comportement Filtrant-Drainant des Geotextiles. PhD Thesis, L'Institut National Polytechnique de Grenoble, L'Universite Joseph Fourier, France, 352 p.
- FAURE, Y. H., GOURC, J. P. & GENDRIN, P. (1989). Structural study of porometry and filtration opening size of geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, PA, USA, 18 p.
- FAURE, Y.H., FARKOUH, B., DELMAS, P.H. & NANCEY, A. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextiles and Geomembranes*, 17(5-6): 353-370.
- FAYOUX, D. (1977). Filtration Hydrodynamique des Sols par des Textiles. *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, Paris, France, 2: 329-332.
- FISCHER, G.R., CHRISTOPHER, B.R. & HOLTZ, R.D. (1990). Filter Criteria Based on Pore Size Distribution. *Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Balkema, The Hague, Netherlands, 1: 289-294.
- FISCHER, G. R., HOLTZ, R. D. & CHRISTOPHER, B. R. (1996). Evaluating geotextile pore structure. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage*

- Geocomposites, ASTM Special Technical Publication, West Conshohocken, PA, USA, 15 p.
- FREITAS, R.A.S. (2003) Comportamento de Geotêxteis como Filtro em Resíduos – Fosfogesso e Lama Vermelha. Tese de mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 122 p.
- GARDONI, M.G. & PALMEIRA, E.M. (2002). Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. *Geotechnique*, 52(6): 405-418.
- GIROUD, J.P. (1981). Designing with geotextiles. *Matériaux et Constructions*, 14(82): 257–272.
- GIROUD, J.P. (1996). Granular filters and geotextile filters. *Geosynthetics International*, 2(3): 635-641.
- GOURC, J.P. (1982). Quelques Aspects du Comportement des Géotextiles en Mécanique des Sols. Thèse de Docteur des Sciences, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 249 p.
- HEERTEN, G. (1982). Dimensioning the filtration properties of geotextiles considering long-term conditions. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 115-120.
- IGS (2015). Classificação dos geossintéticos. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2015/08/Classifica%C3%A7%C3%A3o-dos-Geossint%C3%A9ticos.pdf>>. Acessado em: 12 de junho de 2019.
- INGOLD, T.S. & MILLER, K.S. (1988). *Geotextiles Handbook*. Thomas Telford Ltd., London, UK, 152 p.
- JOSEPH, M. L. (1981). *Introductory Textile Science*. CBS Publishing, New York, USA, 4 ed., 406 p.
- KOERNER, R.M. & KO, F.M. (1982). Laboratory Studies on Long-Term Drainage Capability of Geotextile. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 91-95.
- KOERNER, R.M. & KOERNER, G. R. (2015). Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3): 272–281.
- KULTER, H. (1985). *Non-Woven Bonded Fabric*. Lunenschloss, J. and Albrecht, W., Eds., Ellis Horwood, Ltd., Chichester, UK, 178 p.
- MASOUNAVE, J., DENIS, R. & ROLLIN, A.L. (1980). Prediction of hydraulic behaviour of synthetic non-woven filter fabrics used in geotechnical works. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4): 517-525.
- MELO, D.L.A. de (2018). Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis Não Tecidos sob Diferentes Esforços Solicitantes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 80 p.

- MORACI, N., MANDAGLIO, M. C. & SALMI, M. (2016). Long term behavior of woven and nonwoven geotextile filters. *GeoAmericas 2016*, Miami, FL, USA, 1: 740–749.
- MORAES FILHO, I.P. (2018). Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Diferentes Condições de Solicitação Mecânica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 122 p.
- PALMEIRA, E. M., FANNIN, R. J. & VAID, Y. P. (1996). A study on the behaviour of soil–geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4): 899–912.
- PALMEIRA, E.M. & FANNIN, R.J. (1998). A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. *Geosynthetics International*, 5(3): 347–357.
- PALMEIRA, E.M. & GARDONI, M.G. (2000). 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. & FANNIN, R.J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, 3: 853-872.
- PALMEIRA, E. M., GARDONI, M. G. & BESSA DA LUZ, D. W. (2005). Soil–geotextile filter interaction under high stress levels in the gradient ratio test. *Geosynthetics International*, 12(4): 162–175.
- PALMEIRA, E.M., BEIRIGO, E.A. & GARDONI, M.G. (2010). Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2): 136–148.
- PALMEIRA, E.M., TATTO, J. & ARAÚJO, G.L.S. (2012). Sagging and filtration behaviour of nonwoven geotextiles overlying different bedding materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 31(1): 1–14.
- PALMEIRA, E.M. & TREJOS GALVIS, H.L. (2016). Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions. *Geosynthetics International*, 24(2): 125–138.
- PALMEIRA, E.M. (2017). Notas de Aula de Ensaio em Geossintéticos, Propriedades de Filtração, Determinação da Abertura de Filtração de Geotêxteis. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF.
- PALMEIRA, E.M. (2018). Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294 p.
- PALMEIRA, E.M., MELO, D.L.A. & MORAES FILHO, I.P. (2019). Geotextile filtration opening size under tension and confinement. *Geotextiles and Geomembranes*, In press, 11 p.
- PRAPAHARAN, S., HOLTZ, R.D. & LUNA, J.D. (1989). Pore Size Distribution of Nonwoven Geotextiles. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 12(4): 261-268.

- PEREZ, O.O., DIAZ, J.R., ZUMALACARREGUI, L. & GOZA, O.L. (2010). Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 52: 62-74.
- RAWAL, A. (2010). Structural analysis of pore size distribution of nonwovens. *Journal of the Textile Institute*, 101(4): 350–359.
- ROLLIN, A.L., MASOUNAVE, J. & DALLAIRE, G. (1977). Etudes des proprietes hydrauliques des membranes non-tissees. *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, Paris, France, 2: 201-206.
- SAATHOFF, F. & KOHLHASE, S. (1986). Research at the Franzius-Institut on Geotextile Filters in Hydraulic Engineering. *Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division*, Seoul, Korea, 2 p.
- SILVA, A.M. da. (2014). Geotêxteis sob Confinamento. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 129 p.
- TREJOS GALVIS, H. (2016). Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Confinamento e Parcialmente Colmatados. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 142 p.